Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Казанский национальный исследовательский технологический
университет»

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент Хамматова Э.А.

Казань – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список условных сокращений и обозначений 5

Введение 6

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ СОРБЦИОННЫМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЛУБЯНЫХ ВОЛОКОН 17

1.1 Лубяные волокна как объект комплексной модификации 17

1.1.1 Структурные и морфологические свойства лубяных волокон 30

1.1.2 Сорбционные свойства лубяных волокон 33

1.1.3 Механические свойства лубяных волокон 35

1.2 Анализ существующих методов модификации и управления свойствами текстильных материалов 36

1.2.1 Традиционные методы структурирования текстильных материалов 37

1.2.2 Электрофизические методы направленного структурирования текстильных материалов 40

1.3 Задачи диссертации 47

ГЛАВА 2. ВЫБОР ОБЪЕКТОВ, МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СОРБЦИОННЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ВОЛОКОН ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНОПЛИ 48

2.1 Выбор и описание объектов исследования 48

2.2 Описание оборудования для проведения плазменной обработки 49

2.3 Методики исследования сорбционных и механических свойств текстильных материалов из волокон технической конопли 54

2.4 Методы и оборудование для исследования структуры текстильных материалов из волокон технической конопли 58

текстильных материалов из волокон технической конопли 58
2.5. Методы статистической обработки результатов экспериментальных исследований 59
ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ 63
3.1 Экспериментальное исследование сорбционных и механических показателей текстильных материалов из волокон технической конопли, подвергнутых плазменной модификации 63
3.1.1 Исследование механических свойств текстильных материалов из волокон технической конопли 64
3.1.2 Исследование сорбционных свойств текстильных материалов из волокон технической конопли 85
3.1.3 Исследование устойчивости показателей сорбционных и механических текстильных материалов из волокон технической конопли после плазменной обработки 96
3.2 Исследование структуры и морфологии текстильных материалов из технической конопли 98
ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОЛУЧЕНИЮ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНОПЛИ 119
4.1 Разработка технологических рекомендаций по получению наноструктурированных текстильных материалов из волокон технической конопли 119
4.2 Обоснование экономической эффективности получения наноструктурированных текстильных материалов из волокон технической конопли 125

Заключение 132
Список использованной литературы 135
Приложения 150
Приложение А. Дифрактограммы 151
Приложение Б. ИК-спектры 156
Приложение В. Микрофотографии текстильных материалов из технической конопли 161
Приложение Г. Акт внедрения и испытаний 165

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧАНИЙ

Сокращения

ВЧЕ – высокочастотный емкостной разряд пониженного давления;

НТП – низкотемпературная плазма;

ПХО – плазмохимическая обработка;

ТЭО – технико-экономическая оценка;

UV – ультрафиолетовый индекс, УФ-индекс;

ИК – инфракрасный диапазон излучения;

РФА – рентгенофлуоресцентный анализ.

Условные обозначения

E – напряженность электрического поля;

f – частота генератора;

Δl – относительное удлинение образцов;

$P_н$ – разрывная нагрузка тканей;

$P_{потр}$ – мощность, потребляемая установкой;

$P_к$ – давление в вакуумной камере;

$P_с$ – давление струи;

$P_{уст.}$ – давление в вакуумной установке;

τ – время обработки;

$W_Г$ – гигроскопичность;

$W_р$ – мощность разряда.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

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 [1].

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 [2, 3].

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 [4]. 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 [5].

Государством предусмотрены многочисленные меры поддержки, включающие льготное кредитование проектов по глубокой переработке конопли и возмещение части затрат на покупку основных средств [6, 7].

Приоритеты экономической политики России состоят не только в ускоренном импортозамещении, но и в необходимости стимулирования выпуска экспортной продукции [9]. 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 [8].

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 [10].

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 [11].

В этой связи особую актуальность приобретают электрофизические методы модификации, в частности обработка неравновесной

низкотемпературной плазмой пониженного давления. Как показали исследования [12], 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.

Проблематика модификации текстильных материалов физическими методами имеет обширную историю исследований в отечественной и зарубежной науке. Степень разработанности темы рассматривается в нескольких взаимосвязанных направлениях.

Ивановская научная школа. 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. А.И. Максимовым разработаны научные основы плазменной обработки волокнистых материалов, включая установление взаимосвязей между параметрами разряда и характеристиками модифицированной поверхности. Б.Н. Мельниковым исследованы технологические аспекты применения плазменных методов в отделочных процессах текстильного производства. Данное направление получило развитие в работах А.П. Нестерова, Т.В. Кочетковой, О.В. Архиповой, посвящённых повышению качества текстильных материалов путём предварительной плазменной активации поверхности перед нанесением покрытий и отделочных составов.

Казанская научная школа. Другим ключевым центром компетенций в России является казанская научная школа на базе ФГБОУ ВО «КНИТУ». Основателями направления плазменной модификации текстильных материалов и натуральных полимеров по праву считаются И.Ш. Абдуллин и Л.Н. Абуталипова. И.Ш. Абдуллиным разработаны теоретические основы высокочастотной плазменной обработки капиллярно-пористых материалов, обоснованы механизмы модификации поверхности текстильных материалов потоком неравновесной плазмы пониженного давления, установлены количественные зависимости между параметрами плазменного воздействия и функциональными свойствами материалов. Л.Н. Абуталиповой проведены систематические исследования по модификации натуральных и синтетических текстильных материалов, установлены закономерности изменения сорбционных, механических и антистатических свойств под воздействием плазмы. Впоследствии эти исследования были продолжены и развиты в работах В.В. Хамматовой, Э.А. Хамматовой, А.А. Азановой, И.В. Красиной, в которых обоснованы режимы плазменной обработки для придания текстильным материалам заданных гидрофильных и гидрофобных свойств, установлены закономерности изменения прочности, растяжимости и износостойкости тканей после плазменного структурирования, разработаны технологические решения по применению плазменной модификации в

процессах крашения, печати и специальной отделки.

Московская научная школа. В МГТУ им. А.Н. Косыгина исследования по модификации текстильных материалов физическими методами ведутся под руководством А.П. Нестерова, А.В. Костылевой, Т.В. Кочетковой. Данным научным коллективом исследованы возможности применения низкотемпературной плазмы для улучшения смачиваемости, окрашивания и адгезионных свойств целлюлозных и смесовых тканей. В Институте физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН и Институте проблем химической физики РАН (Черноголовка) исследованы физико-химические механизмы взаимодействия плазмы с поверхностью полимерных волокон на микро- и наноуровне.

Зарубежные исследования. В международной научной литературе проблематика плазменной модификации текстильных материалов активно разрабатывается группой исследователей под руководством R. Shishoo, Индия/Швеция, R. Paul, Германия, Hohenstein Institute, J. Wang, Китай, Donghua University, R. Kumar, Индия, IIT Delhi. R. Shishoo обобщены принципы плазменной обработки природных и синтетических волокон с позиций управления поверхностными свойствами. R. Paul исследованы возможности применения плазменной технологии для функционализации текстильных материалов специального назначения. J. Wang изучены механизмы модификации целлюлозосодержащих волокон потоком низкотемпературной плазмы с использованием различных плазмообразующих газов. Значительный вклад в понимание физико-химических процессов на границе «плазма – полимерное волокно» внесли исследования D. Hegemann, Швейцария, Empa, M. Kamal, Египет, F. R. S. Batista Бразилия.

Соответствие паспорту заявленной специальности.

Тема и содержание диссертационной работы соответствуют научным специальностям: 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;

– 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.

Цель и задачи исследования.

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.

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 плазмой 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».

Объекты и методы 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.

Обработка полученных экспериментальных результатов проводилась на ПЭВМ с использованием Statistics, позволяющая проводить экспресс-анализ натурных экспериментов.

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.

Достоверность результатов 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. 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 охватывает полный цикл исследования: обоснованный выбор методической базы, проведение экспериментальных работ, аналитическую обработку и обобщение данных, а также формирование предложений по использованию плазменной технологии при изготовлении ткани из волокон технической конопли. Вклад является основным и решающим на каждом из перечисленных этапов.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении аргументирована актуальность исследования: рост мирового спроса на натуральный текстиль, стратегическая роль технической конопли как импортозамещающей культуры для России и альтернативы хлопку. Приведены преимущества плазменной инженерии перед традиционными химическими методами модификации. Поставлена цель и рассмотрены задачи диссертации, описана научная новизна работы.

В первой главе дана характеристика лубяных волокон как объекта плазменной модификации, описаны структура волокон, химический состав. Приведены сравнительные таблицы физико-механических, эксплуатационных и экологических свойств конопли, льна и хлопка. Рассмотрены понятия сорбционных и механических свойств текстильных материалов. Проведен обзор методов традиционных методов обработки и метода плазменной модификации. Описан мировой и российский рынок текстиля из технической конопли, этапы производства текстиля из волокон технической конопли. Сформулированы задачи, обоснована цель исследования.

Во второй главе Обоснован выбор 6 образцов для исследований свойств материалов из волокон технической конопли: ткани полотняного переплетения (100% конопли; 55% конопли + 45% хлопок; 80% конопли + 20% хлопок) и трикотажные полотна (100% конопли; 55% конопли + 45% хлопок; 53% конопли + 44% хлопок + 3% спандекс). Описаны плазменные установки, методики проведения экспериментов и применяемое оборудование. Проведен расчет статических погрешностей измерений экспериментальных образцов.

В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования механических и сорбционных характеристик структурированных плазменным воздействием материалов и сравнение их с контрольными образцами. Описана микроструктура поверхности модифицированных тканей, проведен анализ результатов РФА и ИК-спектроскопии.

В четвертой главе разработаны рекомендации по внедрению процесса плазменной обработки в технологический цикл производства материалов из волокон технической конопли, определено перспективное назначение полученных тканей с улучшенными свойствами, приведено обоснование экономической эффективности их производства.

ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ СОРБЦИОННЫМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ЛУБЯНЫХ ВОЛОКОН

В данной главе приведен краткий обзор современного состояния исследований в области модификации лубяных волокон, выявлены основные проблемы и ограничения существующих технологий.

Рассмотрены классификация, химический состав и структурные особенности лубяных волокон, определяющие их поведение при сорбции и под нагрузкой. Проанализированы традиционные химические и механические, биотехнологические и электрофизические плазменные методы модификации, их достоинства и недостатки. Особое внимание уделено низкотемпературной плазменной обработке как перспективному инструменту целенаправленного изменения свойств текстильных материалов.

На основе анализа литературных данных сформулированы научно-технические задачи, что позволило обосновать цель и разработать задачи диссертационного исследования.

1.1. Лубяные волокна как объект комплексной модификации

Лубяные волокна технической конопли являются ценным целлюлозосодержащим сырьем, востребованным в различных промышленных сферах. Ткани из волокон технической конопли прочны, долговечны, обладают высокой стойкостью к истиранию, обладают рядом привлекательных потребительских характеристик, включающих защиту от ультрафиолетового излучения.

В таблице 1.1 приведены физико-механические и эксплуатационные свойства лубяных волокон и хлопка [13,14,15].

Таблица 1.1 – Сравнительные характеристики лубяных волокон и хлопка

Наименование характеристики	Конопля	Лен	Рами	Джут	Хлопок
Прочность на разрыв, МПа	550–900	340–800	400–900	300–500	287–597
Удлинение при разрыве, %	1,6–6,0	1,5–3,5	2,0–3,8	1,0–2,5	3,0–10,0
Модуль упругости, ГПа	20–70	30–80	40–130	10–30	5–12
Гигроскопичность, %	10–12	12–15	12–14	12–14	8–10
Плотность волокна, г/см³	1,47–1,50	1,50	1,50–1,55	1,30–1,48	1,54
Длина технического волокна, мм	500–1500	300–900	50–150	1000-4000	20–50
УФ-стойкость	Высокая	Высокая	Высокая	Низкая	Умеренная
Антибактериальные свойства	Высокие	Умеренные	Высокие	Умеренные	Слабые

Возделывание технической конопли обладает рядом преимуществ по сравнению с традиционными культурами. Результаты сравнительной оценки экологических показателей культивирования технической конопли, льна и хлопка текстильных материалов представлены в таблице 1.2 [16].

Таблица 1.2 – Экологические показатели культивирования технической конопли, хлопка и льна

Показатель	Конопля	Лён	Хлопок
1	2	3	4
Потребление воды, л/кг волокна	300–500	200–400	7000–29000
Использование пестицидов	минимальное/нет	минимальное	высокое

Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4
Период вегетации, дней	90–120	100–120	150–180
Урожайность волокна, т/га	1,0–2,5	0,6–1,2	0,3–0,8
Биоразлагаемость	100%	100%	100%
Фиторемедиация	да	нет	нет

Среди указанных культур, исключительно конопля обладает способностью к фиторемедиации — процессу детоксикации почвенного покрова посредством абсорбции или иммобилизации загрязняющих веществ.

Применение технической конопли возможно также в сфере строительства, для производства теплоизоляционных материалов, в пищевой промышленности, а также в производстве композитов [17].

Изготовление текстиля из технической конопли перспективно ввиду наличия последних данных о влиянии микропластика на здоровье человека. Синтетическая одежда выделяет микроскопические волокна при стирке и носке, которые могут поступать в кровь, лимфу и органы человека, вызывая воспалительные, иммунные реакции и эндокринные нарушения [18].

Мировой рынок текстиля из конопли стремительно растет. Китай является абсолютным лидером, ему принадлежит 70% мирового производства. Площадь посевов - 38 500 га, 75% сырья перерабатывается внутри региона, причем 60% волокна идет на производство текстиля [19].

В 2005 году китайское военное ведомство инициировало научные проекты по использованию лубяных волокон, включая коноплю, для нужд армии. Конопляный текстиль в китайской армии применяется для изготовления униформы, помогающей бороться со стафилококком, и для производства носков, обладающих антибактериальными и антимикробными свойствами [20,21]. Использование конопляного волокна в китайской армии не ограничивается только пошивом формы, одной из ключевых отраслей

применения является также производство специального защитного обмундирования: композитные ткани на основе конопли обладают высокими бронестойкими характеристиками и применяются для создания защитного снаряжения, включая бронежилеты, благодаря своей высокой прочности и жесткости.

Площадь посевов в Европе составляет 36 000 га. Ключевыми производителями являются Франция, лидер по производству длинного волокну для текстиля, Германия, специализирующаяся продукции рекреационного назначения и центр инновационных технологий - Нидерланды [19].

В рамках проекта Hemp4Circularity формируется европейская транснациональная сеть производства текстильной конопли. Ее ключевыми участниками являются:

- Alliance for European Flax-Linen & Hemp (Франция), координирует развитие отрасли, объединяя производителей, переработчиков и бренды [22];
- Lin et Chanvre Bio (Франция), ассоциация производителей органического льна и конопли, организующая исследования по переработке конопляного волокна [23];
- Safilin (Франция, Бельгия), один из ведущих европейских производителей пряжи из льна и конопли, применяющий технологии мокрого и сухого прядения, а также разработку новых видов пряжи с заданными механическими характеристиками [24];
- Libeco (Бельгия), семейное предприятие, специализирующееся на льняных и конопляных тканях, применяет традиционные методы вымачивания росой и механической обработки с адаптацией льноперерабатывающего оборудования [25];
- Van de Bilt (Нидерланды), предприятие первичной обработки, специализирующееся на длинноволокнистой технической конопле,

осуществляющее чесание конопляной соломы на модернизированных льночесальных линиях [26];

− Natuvalis, Германия, участник проекта по выращиванию и первичной переработке текстильной конопли [27].

Рынок Северной Америки переживает бурный рост после легализации в США в 2018 году. Площадь посевов США - 18 330 га, Канады - 14 770 га. Южноамериканский рынок находится в стадии формирования с высоким темпом роста 28% в год и прогнозом увеличения посевных площадей до 50 000 га к 2030 г [19].

В США компания Natural Fiber Welding, Пеория, штат Иллинойс, использует запатентованную замкнутую «зеленую» химическую технологию для создания точных сетей водородных связей в нитях, состоящих из натуральных волокон для производства натуральных и биоразлагаемых тканей, которые по своим свойствам не уступают синтетическим. Технология основана на использовании ионных жидкостей, расплавленных солей, которые остаются жидкими при комнатной температуре. Они выступают в качестве растворителей для частичного расщепления натуральных волокон целлюлозы, а затем «сваривают» их части, объединяя в более длинные и прочные структуры. В результате получается пряжа, которая по своим характеристикам прочности, плотности, поведения в материале имитирует синтетические волокна [28]. Компания Hemp Traders, Калифорния, один из крупнейших поставщиков конопляных тканей в Северной Америке, применяющий полный цикл от вымачивания росой и механической декортикации до мокрого и сухого прядения, ткачества и энзимной финишной обработки [29].

Российский рынок технической конопли в настоящее время находится на этапе постепенного восстановления. Исторически Советский Союз занимал позицию ведущего мирового производителя и экспортёра данной культуры, удерживая данное лидерство вплоть до 1961 года, после чего отрасль пережила практически полное свёртывание производственной

деятельности. За период с 2010 по 2024 год посевные площади увеличились более чем в 17 раз, что свидетельствует об устойчивой тенденции к расширению отраслевого присутствия.

Основные этапы переработки волокна и производства текстиля из технической конопли приведены в таблице 1.3 [30, 31].

Таблица 1.3 – Основные этапы переработки лубяных волокон для получения текстильных материалов

Этап	Технологический процесс	Назначение и описание	Методы и оборудование	Особенности, режимы для длинного и короткого волокна
1	2	3	4	5
Уборка урожая	Скашивание и нарезка стеблей	Подготовка сырья к мацерации	Уборочные комбайны	Для длинного волокна стебли нарезаются, сохраняя параллельную ориентацию
Мацерация	Вымачивание для деградации цементирующих соединений	Разрушение пектинового комплекса	Вымачивание росой, водное, химическое вымачивание, ферментативное вымачивание, паровой взрыв	Малая выдержка–неполное разделение, чрезмерная выдержка–снижение прочности
Декортикация	Отделение волокна от стебля	Разделение на длинное и короткое волокно	Декортикаторы с различными	Для длинного волокна стебли подаются с параллельной ориентацией
Первичная обработка	Мятье, трепание, чесание	Расщепление волокон, параллелизация	Модернизация оборудования для обработки льна	Гребенное чесание для сохранения длины волокна 700-1500 мм

Окончание таблицы 1.3

1	2	3	4	5
Котонизация	Разделение и укорачивание волокон	Снижение линейной плотности, повышение мягкости	Поточная линия по котонизации	Применяется для короткого волокна
Сортировка	Разделение по длине и качеству	Подготовка к прядению	Сортировальные машины	Сортируется длинное волокно 150 мм для кольцевого прядения, короткое волокно для пневмомеханического прядения
Кольцевое прядение длинного волокна	Формирование пряжи из волокон	Получение пряжи	Машины для кольцевого прядения	Применяется для высококачественных тканей
Пневмомеханическое прядения	Прядение открытым концом	Получение пряжи заданной линейной плотности	Пневмомеханические прядильные машины	Необходимо смешивание с хлопком или синтетикой
Снование и ткачество	Формирование основы и утка	Создание тканого полотна	Ткацкие станки (струйные, рапирные, бесчелночные)	-
Отделка	Химическая и физическая модификация	Придание потребительских свойств	Мерсеризация, ферментативная обработка, аппретирование	-

Совокупный объём рынка продукции из технической конопли в Российской Федерации по итогам 2024 года оценивается в 3,2 млрд рублей. Мировой рынок данной продукции на текущий момент приблизительно в 7

млрд долларов США; согласно прогнозам аналитической компании Reports and Data, к 2026 году его объём может достигнуть 13 млрд долларов США, что соответствует среднегодовым темпам роста порядка 14 % [32].

Объем посевных площадей технической конопли в РФ вырос с 0,95 тыс.га в 2010 году до 16,5 тыс.га в 2024 году [33].

На сегодняшний день возделывание технической конопли осуществляется более чем в 30 субъектах Российской Федерации. По объёму посевных площадей лидирующее положение занимает Приволжский федеральный округ, где в 2024 году под данной культурой было занято 9,8 тыс. га, на втором месте находится Центральный федеральный округ, где коноплей засеивали 4,2 тыс. га. В 2024 году география культивирования расширилась за счёт вовлечения в сельскохозяйственный оборот новых регионов, Калужской, Тамбовской, Костромской и Иркутской областей, Чувашской Республики и Республики Марий Эл. К числу наиболее востребованных сортов относятся «Родник», «Надежда» и «Сейм». В настоящее время в Государственном реестре селекционных достижений зарегистрировано свыше 30 сортов ненаркотической технической конопли с массовым содержанием тетрагидроканнабинола (ТГК) не более 0,1 % [34]. В таблице 1.4 представлены данные о российских лидерах рынка в отрасли конопляного производства [35-39].

Таблица 1.4 – Российские производители продукции из конопли

Компания	Регион	Производимая продукция
ООО «Коноплекс»	ЦФО	Пищевая продукция, волокно, костра
ООО «Макошь»	Тульская обл.	Пищевая продукция
Агрокомплекс «Авилат»	Башкортостан	Семена, волокно, костра
ООО «Мордовские пенькозаводы»	Мордовия	Семена, волокно, костра
ООО «Нижегородские волокна конопли»	Нижегородская обл.	Волокно, котонин, костра

Анализ производства текстильных материалов из конопляного волокна показывает, что основные типы производимых тканей дифференцируются по структуре переплетения, плотности и назначению. Наиболее грубой и плотной разновидностью является канвас, ткань из толстых нитей, она находит применение при изготовлении рюкзаков, обуви, палаток, парусов и защитных чехлов. Разновидностью тканей саржевого переплетения выступает твил, характеризующийся диагональным плетением и большей мягкостью по сравнению с канвасом, из него производят джинсы, куртки, брюки и юбки. Выпускаемые трикотажные материалы используются для изготовления футболок, платьев, белья и спортивной одежды. Значительную долю ассортимента составляют смешанные ткани из конопли в комбинации со льном или хлопком, отличающиеся мягкостью и лёгкостью и предназначенные для рубашек, блузок, летней и детской одежды. Отдельную группу формирует конопляное полотно, гладкая ткань, напоминающая льняную, но превосходящая её по прочности; она применяется для пошива рубашек, а также изготовления скатертей, штор и салфеток. Кроме того, конопляная мешковина из грубых текстурированных волокон используется преимущественно в упаковочных целях, а также при производстве ковров и декоративных изделий.

На российском рынке конопляного текстиля действуют несколько предприятий, формирующих основную инфраструктуру. Одним из наиболее крупных игроков является компания «Hemp for Life», единственная в России розничная сеть, специализирующаяся на товарах из технической конопли. Ее ассортимент включает одежду, рюкзаки, постельные принадлежности, косметику и продукты питания, ее рюкзак «Патан» был отмечен премией Green Awards 2022 за лучший эко-аксессуар. Бренд «Uzor Wear», основанный семьёй Луговых, позиционирует себя в сегменте премиальной одежды, нижнего белья и косметики из технической конопли, органического хлопка и льна; применяемые ткани сертифицированы по международным стандартам GOTS, OCS и OEKO-TEX Standard 100, ассортимент охватывает мужскую,

женскую и детскую линии, включая размеры PlusSize. Локальный бренд «Country Textile» из г.Кострома специализируется на одежде и домашнем текстиле из льна, крапивы, муслина и конопляной ткани с применением экологичной фурнитуры из переработанной кокосовой скорлупы. Интернет-магазин Конопъ.ru предлагает широкий ассортимент одежды и аксессуаров из конопляного волокна. Таким образом, несмотря на относительно небольшой масштаб, сегмент рынка российского текстиля из технической конопли демонстрирует диверсификацию продуктового портфеля и ориентацию на международные стандарты экологической сертификации [40-43].

Рассмотрим ключевые факторы, определяющие процесс переработки конопляного сырья в текстильные материалы в рамках российской индустрии.

В России серийно выпускается специализированная сельхозтехника для уборки конопли. Посевной комбайн F 2450 HEMP учитывает особенности уборки урожая высоких стеблей конопли, которые могут достигать 7 метров [44]. F 2450 HEMP скашивает растение и нарезает его на отрезки заданной длины.

В климатически подходящих зонах мацерацию целесообразно осуществлять методом полевой выдержки. Использование иных способов технологически нерационально, поскольку они сопряжены с повышенным энергопотреблением, необходимостью задействования сложного оборудования и увеличением себестоимости процесса [45, 46].

Декортикация, проводится путем механического воздействия для отделения целлюлозных волокон от других частей стебля. Параметры и оборудование для проведения декортикации выбирают в зависимости от того, требуется произвести длинное или короткое волокно. При производстве длинного волокна стебли должны быть параллельно направлены при подаче на обрабатывающий механизм, для котонизации или производства вискозных тканей ориентация не важна. В производстве длинного волокна используют

не все растение, поэтому такие технологии являются более затратными и выпускают продукцию высокобюджетного сегмента. Котонизация и вискозные технологии используют все части растения, количество отходов минимально, такой тип производства предпочтителен для выпуска продукции массового назначения.

Текстильные материалы высокого качества производят из длинного лубяное волокно. Переработка длинного конопляного волокна и его последующее прядение могут осуществляться на оборудовании, предназначенном для льнопрядения, при условии его модернизации и адаптации технологических режимов работы [47]. Однако реализация данного подхода сопряжена с рядом существенных ограничений. Материально-техническая база большинства предприятий льняной отрасли физически и морально устарела, а производство специализированного оборудования для первичной обработки лубяных волокон на территории Российской Федерации в настоящее время отсутствует. Поэтому вероятнее направление переработки конопляного сырья путем котонизации, механической обработки коротких волокон конопли, в результате которой грубое и жёсткое лубяное волокно приобретает мягкость, эластичность и внешний вид, приближенные к хлопковому волокну. Данный метод позволяет вовлекать в текстильную переработку короткое волокно, составляющее значительную долю в общей массе конопляной тресты, и использовать для его переработки существующее хлопкопрядильное оборудование без необходимости его существенной модернизации [48].

Технологические линии по переработке короткого конопляного волокна выпускают отечественные предприятия ООО ИПФ «ТексИнж», ФГБНУ ФНЦ ЛК, ОАО «Завод им. Г.К. Королева» [49, 50].

Помимо механического способа, в современной практике применяются технологии котонизации с использованием ультразвуковых и ударно-волновых воздействий, позволяющие достичь более высокой степени разделения лубяных пучков и, как следствие, получить котонин

повышенного качества. Промышленное оборудование, реализующее принцип ударно-волновой обработки лубяного сырья, выпускается АО «Научно-производственное объединение «Ударно-волновые технологии», что свидетельствует о технологической зрелости данного направления и его применимости в условиях промышленного производства [51].

Для дальнейшего кольцевого или пневмомеханического прядения котонизированное конопляное волокно смешивается с волокнами хлопка или синтетическими волокнами. Существенная проблема при этом наличие в России в основном при этом пневмомеханического прядения и оборудования, которое не допускает высокого содержания котонина в пряже. Развитие отрасли производства текстиля из конопли тесно связано с необходимостью роста и модернизации машин и оборудования [48].

Кроме переработки натурального лубяного волокна, перспективным направлением является получение искусственных целлюлозных волокон из конопляного сырья. Наиболее предпочтительной в данном случае представляется технология лиоцелла, отличающаяся существенно меньшим потреблением водных ресурсов по сравнению с традиционным вискозным производством. Важным преимуществом данного метода является возможность использования в качестве целлюлозосодержащего сырья всех частей растения конопли, включая отходы, образующиеся при переработке лубяного волокна для иных технологических целей. Ключевой особенностью технологии лиоцелла является применение в качестве растворителя N-метилморфолин-N-оксида NMMO, который подлежит регенерации и многократному возврату в производственный цикл, что обеспечивает замкнутость технологического процесса и снижает нагрузку на окружающую среду. Технологические процессы производства вискозных и лиоцелловых волокон включают в себя приготовление прядильного раствора, для которого костру помещают в растворитель, при этом могут быть использованы конопляные отходы других производств, что делает процесс экономически более выгодным и предпочтительным. Структурирование нити проводят

вытяжкой через фильеры с возможным вложением синтетических или других компонентов [52].

Развитие текстильной промышленности из технической конопли в России сдерживается недостатком перерабатывающего оборудования. Несмотря на экологические преимущества культуры и высокие потребительские свойства конопляных тканей, формирование полноценной отрасли требует капитальных вложений в оборудование для мацерации, декортикации и котонизации волокна, а также государственной поддержки в виде субсидий, льготного финансирования и программ обучения специалистов [53].

Ограничивающим фактором текстильной промышленности является малый объем выпуска и отсутствие отечественного парка серийно выпускаемого оборудования для различных типов производства**.** Доля импортного оборудования в текстильной промышленности достигает 90%, причём современным техническим требованиям отвечает около 37% совокупного технологического парка. Ситуация усугубляется низким уровнем инвестиционной активности: объём вложений в обновление основных фондов не превышает 5–7% выручки предприятий, что существенно ограничивает возможности их технической модернизации [54].

Недостаток оборудования и специалистов для переработки волокна вынуждает российских производителей экспортировать конопляную костру или котонин в страны, где сырье перерабатывают в конечный продукт, тем самым не получая возможной прибыли от глубокой переработки [55].

Учитывая высокую стоимость основных средств в текстильном производстве, предприятиям легкой промышленности в России предоставляется господдержка, включающая субсидии на модернизацию, льготное кредитование, снижение страховых взносов до 7,6%, лизинговые программы и промышленную ипотеку на оборудование. Основным регулятором выступает Минпромторг, а финансирование осуществляется через Фонд развития промышленности и специальные программы [56].

1.1.1 Структурные и морфологические свойства лубяных волокон

Структурные и морфологические свойства лубяных волокон определяются совокупностью параметров, характеризующих химическое строение целлюлозы, её надмолекулярную организацию, систему водородных связей, наличие сопутствующих компонентов и особенности микроструктуры.

Лубяные волокна – это волокна, локализованные в корковом слое стеблей растений. Прочность и упругость стебля обеспечиваются склеренхимой – тканью, клеточные стенки которой богаты целлюлозой. В технологических процессах переработки растительного сырья первостепенное значение имеет очистка целлюлозы от цементирующих компонентов (лигнина и пектина). Веретенообразная структура клеток склеренхимы и их химический состав являются определяющими факторами, формирующими механические и сорбционные показатели натурального волокна [57].

Макромолекулы целлюлозы из элементарных звеньев β-D-глюкопиранозы, соединённых гликозидными связями. Наличие трёх гидроксильных групп в каждом звене обусловливает развитую систему внутри- и межмолекулярных водородных связей, которые определяют пространственное расположение цепей. Внутримолекулярные водородные связи формируют остов макромолекулы, тогда как межмолекулярные связи образуют ассоциации цепей в надмолекулярные образования. Соотношение внутримолекулярных и межмолекулярных водородных связей, а также их энергетические характеристики определяют такие свойства волокна, как гидрофильность, набухание, способность к сорбции и химическую активность гидроксильных групп [58].

Водородные связи, присутствие лигнина и пектинов идентифицируются по характеристическим полосам пропускания в колебательных спектрах инфракрасного излучения. Каждая функциональная

группа вносит вклад в поглощение в определённой спектральной области, что позволяет не только подтвердить химический состав волокна, но и оценить соотношение фаз, характер водородных связей и доступность гидроксильных групп.

В таблице 1.5 представлен перечень характеристических полос пропускания в инфракрасной области, с соответствующим валентным и деформационным колебаниям химических связей основных полимеров растительного волокна [59].

Таблица 1.5 – Перечень характеристических полос пропускания технической конопли

Полоса пропускания, $см^{-1}$	Соответствие характеристическим группам, колебаниям
3330–3340	Валентные колебания гидроксильных групп O–H, вовлеченных в межмолекулярные водородные связи целлюлозы
2895–2920	Валентные колебания связей C–H в алифатических CH- и CH_2-группах углеводного скелета целлюлозы
1735–1740	Валентные колебания карбонильных групп C=O в группах пектина и ацетильных группах гемицеллюлозы.
1640–1650	Поглощение адсорбированной волокном влаги, деформационные колебания O–H воды
1595	Скелетные колебания ароматического кольца лигнина
1505	Скелетные колебания ароматического кольца лигнина
1420-1430	Деформационные колебания группы CH_2 в структуре кристаллической целлюлозы
1365–1370	Внутриплоскостные деформационные колебания C–H связей углеводного кольца
1155–1160	Асимметричные валентные колебания связи C–O–C, глюкозидный мостик целлюлозы

Техническая конопля отечественной селекции содержит 59–63% целлюлозы [60]. Целлюлоза в волокне присутствует преимущественно в форме целлюлозы I, при этом степень упорядоченности целлюлозы в необработанном волокне составляет 35–38% [61]. Ячейки упорядоченных структур направлены вдоль стебля и образуют концентрические структуры в коре растения. Окончания зон упорядоченных структур сшиты с собой, что обеспечивает высокую прочность конопляного волокна. В конопляном волокне наблюдается неоднородность пространственного расположения и объемной доли целлюлозы в упорядоченной и аморфной фазах.

Характеристики упорядоченности структуры целлюлозы определяются расположением дифракционных рефлексов, величиной показателя полуширины на половине высоты (или ширина на полувысоте полумаксимума (ШППВ)), размерами зон упорядоченности.

Нативная целлюлоза I идентифицируется 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) [62, 63].

Показатель полуширины на половине высоты – это полная ширина дифракционного пика, соответствующего плоскости (200), на половине его максимальной высоты.

Размер зоны упорядоченной структуры целлюлозы в технической конопле, определяемый методом рентгеновской дифракции по формуле Шеррера, обычно составляет от 40 до 60 ангстрем, что соответствует 4.0–6.0 нм [64].

Формула Шеррера используется в рентгеновской дифрактометрии для определения размера зоны упорядоченной структуры (1.1):

$$D = (K \cdot \lambda)/(\beta \cdot \cos\theta), \quad (1.1)$$

где D – средний размер кристаллита;

K – безразмерный коэффициент формы зоны упорядочения;

λ – длина волны рентгеновского излучения;

β – ширина на полувысоте полумаксимума, в радианах;

θ — угол Брэгга [65].

Морфологические свойства волокна технической конопли определяют совокупностью элементарных волокон, ориентированных вдоль стебля, и аморфным полимерным связующим, состоящим из лигнина и других не целлюлозных примесей.

Техническое волокно, образованное сеткой пучков конопли, имеет длину до 1500 мм, что значительно превышает длину льняного волокна. Техническое волокно конопли состоит и множества пучков элементарных волокон. Элементарное волокно технической конопли имеет среднее поперечное сечение 15–25 мкм [66].

1.1.2 Сорбционные свойства лубяных волокон

При рассмотрении сорбционных свойств тканей из лубяных волокон, необходимо учитывать их капиллярно-пористую структуру, определяющую закономерности сорбционных процессов. Под пористостью в данной системе понимается совокупность макропор, сформированных морфологией текстильного полотна, и микропор, присущих внутренней структуре лубяных волокон. Высокая гигроскопичность технической конопли обусловлена системой наполненных воздухом каналов, люменов.

Сорбционные процессы текстильных материалов определяют характер паро – и водообмена с отгружающей средой и другими материалами. Качественными показателями, определяющими сорбционные свойства являются гигроскопичность и капиллярность материалов. Сорбционный процесс поглощения и десорбционный процесс влагоотдачи являются взаимообратимыми [67].

Сорбционный процесс состоит из последовательно сменяющих адсорбционного процесса, когда жидкость накапливается на поверхности текстильного материала, и следующего за ним процесса абсорбции, когда проникновение влаги происходит в структуру волокна. Объем прохождения

этих процессов зависят от состава и структуры материала и от количественных параметров водной среды.

Время остановки процесса сорбции называют равновесной влажностью. При достижении определенной степени влажности, материал перестает поглощать воду, кроме структуры материала, параметр также зависит от атмосферных условий.

Данные процессы различны по времени прохождение, если адсорбция занимает малое количество времени, то абсорбция может происходить несколько часов. Механизм, определяющий прохождение абсорбции, диффузия, характеризует проникновение влаги в межмолекулярную структуру волокна.

Равновесная влажность для процесса сорбции и десорбции в одинаковых параметрах температуры и влажности окружающей среды, неодинакова. Материал поглощает больше влаги, чем отдает. Гистерезис сорбции возникает ввиду ряда процессов, среди которых более медленное капиллярное освобождение жидкости, чем ее заполнение капиллярных пространств, разное давление в капиллярах, и в процессе сорбции оно меньше, чем при десорбции. Влага их межмолекулярных пространств выводится медленно, так как ее удерживает молекулярная гидрофильная пленка на поверхности.

Текстильные материалы обладают разными сорбционными качествами в зависимости от вида волокон, натуральных или синтетических. Лубяные волокна, в частности льняные и конопляные, обладают высокой гигроскопичностью и гигиеничностью, благодаря наличию в составе целлюлозы большого количества гидроксильных групп, способных образовывать водородные связи с молекулами воды.

Важным показателем сорбционных свойств является капиллярность – способность материала впитывать влагу по капиллярам. Даже для материалов с низкой гигроскопичностью наличие большого количества капилляров приводит к большому объему поглощаемой жидкости. Для

лубяных волокон, характеризующихся высокой пористостью до 30% и более, капиллярные явления играют значительную роль в процессах влагопереноса.

Сорбционные процессы сопровождаются изменением физико-механических свойств, размеров и массы материалов. В частности, при увеличении влажности волокна его прочность и жёсткость снижаются, а эластичность и удлинение при разрыве возрастают, что имеет важное технологическое значение при переработке лубяных волокон в пряжу и тканые материалы [68].

1.1.3 Механические свойства лубяных волокон

Механические свойства лубяных волокон во многом определяются их химическим составом и надмолекулярной структурой. Высокое содержание целлюлозы обеспечивает волокнам значительную механическую прочность и жёсткость. При этом микрофибриллярное строение клеточной стенки, характеризующееся высокой степенью кристалличности целлюлозы от 50 до 90% и малыми углами ориентации микрофибрилл от 2 до 10°, придаёт лубяным волокнам структурную целостность, необходимую для поддержки стебля растения.

Важнейшим механическим свойством текстильных материалов является жесткость. Качественно параметр определяется измерением гибкости ткани, определяющем степень способности ткани сопротивляться разрушающему воздействию без нарушения прочностных характеристик.

Прочность лубяных волокон является одним из ключевых показателей их качества. Для волокон конопли и льна значения прочности в композиционных материалах достигают от 100 до 127 Мпа при модуле упругости 4,7–5,6 Гпа, что сопоставимо с композитами на основе полиакрилонитрильных волокон. Для отдельных образцов волокон толщиной 60 мкм значения прочности могут достигать 306,7 Мпа при модуле Юнга 12,67 Гпа.

Эластичность лубяных волокон определяется способностью восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. Лубяные волокна обладают эластичностью и большой прочностью. Отмечено, что чем выше прочность и модуль упругости волокон, тем больше их критическая длина. Это может объясняться большой анизотропией свойств связующего и армирующего наполнителя. Анизотропия свойств лубяных волокон обусловлена их фибриллярным строением, механические характеристики вдоль волокна значительно превосходят таковые в поперечном направлении, что необходимо учитывать при разработке технологий их переработки и применении в композиционных материалах.

Особого внимания заслуживает зависимость механических свойств лубяных волокон от влажности. Как уже отмечалось, с ростом влажности волокна его прочность и жёсткость снижаются, а эластичность возрастает. Эта особенность имеет важное значение при проектировании технологических процессов переработки лубяных волокон и эксплуатации готовых текстильных изделий, поскольку требует поддержания определённых режимов влажности для обеспечения стабильности качества продукции [69].

Таким образом, лубяные волокна, обладая комплексом ценных сорбционных и механических свойств, представляют собой перспективный объект для комплексной модификации. Их дальнейшее исследование и совершенствование технологий переработки открывает широкие возможности для создания экологичных текстильных материалов, обладающих повышенными потребительскими свойствами.

1.2 Анализ существующих методов модификации и управления свойствами текстильных материалов

Стремительное расширение ассортимента изделий из конопляного текстиля различного назначения требует системного подхода к управлению

его потребительскими свойствами. Природная высокая прочность, гигроскопичность и экологичность конопляных волокон сочетаются с рядом недостатков, ограничивающих их применение: повышенная жёсткость, сминаемость, склонность к пиллингу и недостаточная драпируемость. Преодоление этих ограничений возможно за счёт структурирования материала на различных масштабных уровнях – от поверхностной модификации элементарных волокон до изменения архитектуры полотна. В данном разделе рассмотрены традиционные подходы к улучшению качества конопляного текстиля, а также перспективные электрофизические методы плазменного структурирования, позволяющие формировать новые функциональные свойства без ущерба для базовых характеристик материала.

1.2.1 Традиционные методы структурирования текстильных материалов

Под классическими методами структурирования конопляного текстиля понимают совокупность механических, химических и биохимических воздействий, направленных на разделение комплексных волокон, изменение их химического состава, геометрии поверхности и структурных параметров пряжи и полотна. Исторически первой стадией такого структурирования является механическая обработка в процессах мятья, трепания и чесания, которая частично расщепляет техническое волокно, освобождает его от не целлюлозных примесей и параллелизирует элементарные волокна, повышая равномерность пряжи. Однако для достижения качества, сравнимого с хлопчатобумажным текстилем, механических операций недостаточно.

Ключевым традиционным процессом облагораживания конопляного текстиля является химическая котонизация – обработка растворами щелочей, окислителей и других реагентов, разрушающая межклеточный пектиновый комплекс и лигнин, что приводит к расщеплению комплексного волокна на

элементарные, снижению линейной плотности и повышению мягкости. Варка конопляной ровницы в гидроксиде натрия с последующей отбелкой пероксидом водорода позволяет уменьшить жёсткость ткани на 40–60 % и повысить капиллярность. Дальнейшее смягчение и улучшение драпируемости достигается мерсеризацией – обработкой концентрированным раствором NaOH при натяжении или без него, вызывающей набухание и перестройку кристаллической решётки целлюлозы [71].

Параллельно с чисто химическими методами активно развиваются биотехнологические подходы. Ферментативная обработка пектиназами, целлюлазами и лигниназами позволяет селективно удалять нецеллюлозные примеси и частично модифицировать поверхность волокон, добиваясь эффекта «мягкого штриха» и снижения пиллингуемости без существенной потери прочности. Последовательная обработка конопляной ткани амилазой и пектиназой снижает жёсткость на 48-54 % при сохранении прочности [72].

К традиционным методам структурирования относится и заключительная отделка: нанесение аппретов, мягчителей, противосминаемых и водоотталкивающих составов. Например, обработка кремнийорганическими смягчителями на основе аминосиликонов создаёт на поверхности волокна эластичную плёнку, уменьшающую коэффициент трения и улучшающую органолептические показатели ткани. Введение в аппретирующие ванны наночастиц диоксида кремния или оксида цинка на стадии традиционной отделки позволяет придать ткани дополнительные антимикробные и УФ-протекторные свойства, однако равномерность закрепления частиц и их устойчивость к стиркам остаются проблемными.

Перспективны методы создания материалов, пригодных для медицинских изделий и обладающих антибактериальными свойствами. Авторами [73] изучен синтез наночастиц серебра экстрактами из лубяных волокон (льна и конопли) – как новый «зеленый» метод придания целлюлозным материалам, антимикробных свойств. Был приготовлен

водный экстракт из льняного и конопляного волокна и использован в качестве восстанавливающих агентов для получения наночастиц серебра. Сделан вывод о том, что процесс и его эффективность напрямую зависят от содержания примесей в исходном экстракте. Полученные наночастицы серебра обладают доказанной антимикробной активностью в отношении тест-культур микроорганизмов. Экспериментально доказано, что лубяные волокна являются перспективным и эффективным сырьем для получения «зеленых» наноматериалов с заданными антибактериальными свойствами, пригодных для обработки целлюлозных тканей.

В настоящее время широко исследуется и разрабатывается электронный текстиль, виды тканей, в которых электронные элементы интегрированы с текстильными материалами, что позволяет им воспринимать изменения окружающей среды и реагировать на них, а также генерирующих электроэнергию для электронных элементов- датчиков, накопителей и др.

Для создания электронного текстиля целесообразно использовать конопляный текстиль, ввиду возможности получения инновационного материала, с одной стороны позволяющего соединиться с Интернетом вещей, а с другой, сохраняющего все уникальные свойства данной ткани. Учеными [74] получен электронный материал из конопляной ткани путем обработки биосовместимым восстановленным оксидом графена. Подчеркивается экологичность метода обработки и возможность переработки и повторного использования получившегося материала.

Таким образом, традиционные методы модификации базируются на химическом или механическом способах структурирования волокна. Недостатками методов являются высокая стоимость, нанесение вреда окружающей среде, ограничения в степени регулирования эффекта обработки и повреждения структуры исходного волокна.

1.2.2 Электрофизические методы структурирования текстильных материалов

Электрофизические методы направленной модификации направлены на структурирование поверхностного слоя текстильного материала, без разрушения или изменения его объемной структуры. Это позволяет придавать материалу комплекс специальных свойств – от контролируемой гидрофильности и гидрофобности до биоактивности и улучшенной адгезии к полимерным матрицам, сохраняя его механическую прочность и воздухопроницаемость.

С помощью методов электрофизической обработки решаются следующие технологические задачи: придание текстильным материалов адгезионных свойств, улучшение эксплуатационных и потребительских свойств тканей, удаление органических соединений с текстиля при расшлихтовке и подготовке к окрашиванию [75].

Лазерное наноструктурирование с помощью сверхкоротких импульсов открывает широкие возможности для высокоточной модификации материалов без повреждения их внутренней структуры. Метод позволяет изменять оптические и гидрофильные свойства поверхности за счет создания упорядоченных рельефов.

Имеется патент на обработку лубяных материалов высокочастотными импульсами в сочетании с традиционными методами обработки для повышения качества котонизированного волокна и повышения его физико-механических и прядильных свойств, что в целом способствует оптимизации и эффективности производственного процесса [76].

Одним из наиболее изученных методов является обработка в неравновесной низкотемпературной плазме пониженного давления (ВЧ, СВЧ, коронный разряд, тлеющий разряд). Коронный разряд, реализуемый при атмосферном давлении, технологичен и легко встраивается в непрерывные линии отделки. Плазменное воздействие в среде инертных или

реакционных газов (Ar, O_2, N_2, CF_4) приводит к травлению поверхности, образованию полярных функциональных групп (гидроксильных, карбоксильных, аминных) и увеличению поверхностной энергии. Имеется большое количеств экспериментальных данных на льняных и хлопковых тканях, которые показали, что обработка в плазме высокочастотного разряда при пониженном давлении оказывает влияние на сорбционные свойства текстиля, а также улучшает окрашиваемость и адгезию к полимерным покрытиям [77, 78]. Благодаря эффекту «наношероховатости», формируемой ионной бомбардировкой, удаётся повысить прочность сцепления при последующем нанесении аппретов или ламинировании. Особое место среди электрофизических методов занимает электроформование (электроспиннинг), с помощью которого на поверхность ткани наносятся слои нановолокон из растворов или расплавов полимеров, которые меняют барьерные свойства материала: повышают фильтрующую способность, придают мембранные свойства, могут служить носителем лекарственных или противомикробных препаратов. Диэлектрический барьерный разряд предполагает, что хотя бы один из электродов покрыт диэлектриком. Это предотвращает переход разряда в дугу и позволяет безопасно получать холодную неравновесную плазму даже при атмосферном давлении.

Проведены исследования влияния низкотемпературной плазменной обработки на волокна конопли. Модификация в среде аргона придала волокну дополнительную эластичность, в среде воздуха – блеск, в среде пропан-бутана – более наполненную структуру и гладкую поверхность. Показатели прочности на разрыв улучшились по сравнению с контрольными образцами, волокно, обработанное в среде аргона, превосходит исходный образец в 2,2 раза. Волокна после обработки в газовых средах приобрели гидрофобные свойства [79].

Низкотемпературная плазменная обработка конопляной ткани привела к увеличению скорости окрашивания, степени закрепления красителя и выхода окрашенного образца. Положительный эффект плазменной обработки

объясняется протравливанием и окислением поверхности конопляного волокна [80].

Другие исследования также показали целесообразность применения плазменной обработки для улучшения степени окраски конопляного волокна. Конопляное волокно обрабатывалось в аргоновой среде при частоте 40 и 80 ГЦ с временем экспозиции до 600 с, с увеличением времени выдержки цветовая прочность окрашенной ткани увеличивалась, кроме того, более высокие мощности плазменного воздействия привели к увеличению яркости ткани [81].

Интересны исследования влияния плазменной обработки с продолжительностью воздействия на материал до 240 минут в среде аргона и воздушной среде. Конопляные волокна демонстрировали полное смачивание, угол θ контакта с водой = 0°, против θ = 62° для необработанных волокон, Флуоресцентная микроскопия показала, что обработка аргоном привела к удалению лигнина в волокнах, при этом Прочность волокна на растяжение оставалась неизменной. Результаты исследования определяют плазменную обработку как альтернативу влажным химическим методам для модификации волокна конопли, проводящихся для удаления лигнина [82].

Проведено исследование воздействие дуговой скользящей плазмы на поверхность лубяных волокон конопли. Методами рентгенофазового анализа показано перераспределение моноклинной и триклинной фаз целлюлозы на поверхности после плазменного воздействия. ИК-спектроскопия выявила появление новых окисленных функциональных групп –OH, –COOH, –C=O. Установлено увеличение смачиваемости волокон за счёт появления гидрофильных групп и повышения пористости поверхности [83].

Авторы [84] провели обзор применения плазмы для придания антимикробных свойств текстилю. Показано, что плазменная активация поверхности позволяет наносить наночастицы Ag, ZnO, TiO_2 с прочностью закрепления в 3–5 раз выше, чем при традиционной пропитке Установлено, что плазменная предварительная обработка повышает эффективность

антимикробной отделки на 40–60%. Установлено, что плазма в среде азота вводит аминогруппы –NH_2 с повышением сродства к реактивным красителям на 30–50% без использования протрав [85].

Также проведены исследования по плазменной модификации лубяных волокон с целью их дальнейшего использования в композиционных материалах. Образцы обработаны плазмой скользящей дуги и получены данные об усилении межфазной границы «волокно-матрица» и соответственно улучшению сцепления с адгезивами для создания композитных материалов [86, 87].

Механизм взаимодействия низкотемпературной плазмы пониженного давления с текстильными материалами заключается в поверхностной модификации поверхности потоком высокоактивных частиц плазмообразующего газа, состоящего из ионов, электронов, радикалов и ультрафиолетового излучения.

Ключевой особенностью данного метода заключается в локальной модификации физико-химических параметров поверхностного слоя материала без изменения его структурных характеристик, что позволяет сохранять эксплуатационные свойства текстильного изделия в целом.

Процесс плазменной модификации включает следующие основные этапы и эффекты:

− прохождение реакций плазменного травления, где частицы плазмы разрывают химические связи в поверхностном слое волокон. Травление приводит к формированию шероховатости, удалению воскообразных продуктов и загрязнений;

− химическая активация в среде азота и воздуха, где образуются новые функциональных полярные группы – карбонильные –C=O, карбоксильные –COOH, гидроксильные –OH, аминные –NH_2. Активация поверхности изменяет поверхностную энергию и механизм смачивания;

− изменение морфологии пор, где плазменное воздействие инициирует, проникновение частиц газа внутрь капилляров и пор. Ионы

плазмы, проникая в поры, рекомбинируют на их внутренних стенках. Происходит целенаправленное перераспределение аморфных и кристаллических фаз материала [88].

Механизмы направленного изменения свойств в зависимости от плазмообразующего газа. Выбор плазмообразующего газа является определяющим фактором, позволяющим целенаправленно формировать заданный комплекс свойств текстильного материала. Рассмотрим подробно механизмы воздействия каждого типа плазмы:

1. Воздушная плазма. Воздушная низкотемпературная плазма содержит преимущественно активные формы кислорода — атомарный O, озон O_3, молекулярные ионы O_2^+, а также радикалы OH^-, NO_x и ультрафиолетовое излучение в диапазоне 200–400 нм.

Механизм воздействия:

– окислительное травление поверхности. Атомарный кислород и озон, обладающие высоким окислительным потенциалом ($E° = 2{,}42$ В для O_3), атакуют аморфные участки целлюлозных макромолекул преимущественно по позициям C^{-2} и C^{-3} глюкозных колец. Происходит разрыв β-1,4-гликозидных связей в неупорядоченных областях волокна с образованием карбоксильных (–COOH) и карбонильных (–C=O) групп [89];

– удаление сопутствующих компонентов на поверхности волокон конопли, где присутствуют пектины (до 2–4%), лигнин (2–5%), воски и жиры (0,5–1,5%). Активные формы кислорода селективно окисляют эти вещества, переводя их в летучие продукты (CO_2, H_2O), которые удаляются из зоны обработки. Это приводит к «обнажению» целлюлозного каркаса волокна и увеличению площади активной поверхности [90];

– формирование рельефа за счет неравномерности травления (аморфные участки разрушаются быстрее кристаллических), что приводит к формированию микро- и наношероховатостей на поверхности волокна. По данным атомно-силовой микроскопии, глубина бороздок составляет 50–200 нм, что увеличивает удельную поверхность волокна на 15–30%;

– образование гидрофильных/гидрофобных зон.

2. Азотная плазма. Азотная плазма (N_2) содержит атомарный азот N, возбуждённые молекулы N_2*, ионы N_2^+ и N^+, радикалы CN (при взаимодействии с углеродом целлюлозы), а также УФ-излучение диапазоне 300–400 нм [91-94].

Механизм воздействия:

– аминирование поверхности, ключевое отличие азотной плазмы от воздушной заключается в способности к аминированию. Атомарный азот и возбуждённые молекулы N_2* внедряются в целлюлозную матрицу, реагируя с гидроксильными группами (–OH) глюкозных колец с образованием аминогрупп ($–NH_2$) и иминов (=NH). Реакция протекает преимущественно по позиции C^{-6} глюкозного кольца:

Целлюлоза–OH + N* → Целлюлоза–NH_2 + OH*.

Дополнительно возможно образование амидных групп (–CONH–) при взаимодействии с карбонильными группами окисленной целлюлозы;

- сшивание макромолекул, где азотсодержащие радикалы сшивают соседние целлюлозными цепи, образуя ковалентные связи C–N–C. Это приводит к формированию новой трёхмерной сетчатой структуры в поверхностном слое волокна, что существенно повышает механическую прочность;

– физическое травление происходит менее интенсивно, чем в среде инертного аргоны, ионы N_2^+ и N^+ обладают меньшей массой по сравнению с аргонными, и вызывают менее интенсивное распыление поверхности. Травление носит селективный характер, преимущественно удаляются аморфные участки и низкомолекулярные фракции целлюлозы;

– отношение к гидрофильности, где образованные аминогруппы $–NH_2$ являются высокополярными и способны образовывать водородные связи с водой, поэтому азотная модификация сохраняет гидрофильный характер поверхности;

– плазменная полимеризация, где в результате обработки на поверхностном слое формируется тонкая азотсодержащая, обеспечивающая дополнительную механическую прочность.

3. Аргоновая плазма. Аргоновая плазма содержит ионы Ar^+, возбуждённые атомы Ar*, метастабильные состояния Ar^m и электроны. Аргон является химически инертным газом [95, 96].

Механизм воздействия:

– каскадное распыление, где ионы Ar^+ бомбардируют поверхность волокна, при столкновении иона с поверхностью передаётся кинетическая энергия, что вызывает каскад атомных столкновений. Если переданная энергия превышает энергию связи атома в решётке, атом выбивается из поверхности;

- формирование микрорельефа и переход в гидрофобное состояние, регитрируется увеличение интенсивности пиков –OH;

– упрочнение за счёт уплотнения за счет удаления аморфных фракций и переориентации оставшихся целлюлозных микрофибрилл, что приводит к формированию более плотного и упорядоченного поверхностного слоя.

Принципы управления процессами плазменного структурирования. Анализ механизмов воздействия различных типов плазмы позволяет сформировать технологические принципы целенаправленного управления свойствами текстильных материалов:

Принцип 1. Выбор плазмообразующего газа определяет доминирующий механизм модификации.

Принцип 2. Продолжительность обработки определяет баланс между химической активацией и структурной деструкцией.

Принцип 3. Комбинирование различных типов плазмы может позволять достигать синергетических эффектов. Последовательная обработка разными газами, например, аргон для очистки и азот для аминирования может обеспечить более глубокие модификации, чем обработка одним газом.

Таким образом, электрофизические методы структурирования материалов обладают рядом преимуществ: высокой точностью и селективностью воздействия на поверхность, экологической чистотой, отсутствием растворов агрессивных химикатов.

1.3 Задачи диссертации

Развитие сектора коноплеводства неразрывно связано с необходимостью совершенствования технологических процессов переработки лубяного сырья, а также внедрения инновационных экологически безопасных методов отделки.

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

Для реализации поставленной цели проанализировано современное состояние исследований в области управления свойствами текстильных материалов, а также оценена эффективность плазменной модификации при варьировании параметров низкотемпературного разряда. Провели обоснование для выбора объектов, методов и методик исследования, а также оценки сорбционных и механических характеристик текстильных материалов.

Необходимо провести комплекс теоретических и экспериментальных исследований, направленных на изучение влияния плазменной обработки пониженного давления на сорбционные свойства и механическую прочность материалов из технической конопли, а также сформулировать практические рекомендации по внедрению технологии плазменного модифицирования в производственные процессы изготовления конопляного текстиля.

ГЛАВА 2. ВЫБОР ОБЪЕКТОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ СОРБЦИОННЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ВОЛОКОН ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНОПЛИ

В данной главе проведен выбор объектов исследования, описано оборудование, используемое для плазменной модификации текстильных материалов из волокон технической конопли, представлены режимы плазменной обработки, приведено исследовательское оборудование и выбор методик, по которым происходило экспериментально определение сорбционных и механических показателей материалов, а также структуры и морфологии текстильных материалов из волокон технической конопли.

2.1 Выбор и описание объектов исследования

В качестве объектов исследования послужили образцы тканей из волокон технической конопли, различающиеся по составу (чистые и смесовые) и структурным характеристикам.

В качестве объекта исследования для проверки гипотезы о возможности направленного изменения свойств текстиля из технической конопли была выбрана ткань полотняного переплетения индийского производства. Для проведения последующих исследований использованы текстильные материалы китайского производства, приобретенные у поставщика «Конопляная ткань.рф» [97], имеющие сертификат соответствия Ecocert, независимой международной организации, учреждённой во Франции, специализирующейся на сертификации экологичных продуктов и технологии их производства. Сертификат Ecocert гарантирует натуральное происхождение и экологически чистое изготовление продукции.

Общие характеристики объектов исследования, текстильных материалов их технической конопли китайского производства, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Общие характеристики объектов исследования

№ образца	Состав материалов, %			Переплетение	Поверхностная плотность, г/м^2
	Конопля	Хлопок	Эластан		
1	100	-	-	Полотняное	121
2	55	45	-	Полотняное	172
3	80	20	-	Саржевое	246
4	100	-	-	Кулирная гладь	195
5	55	45	-	Кулирная гладь	175
6	53	44	3	Кулирная гладь	235

2.2 Описание оборудования для проведения плазменной обработки

Низкотемпературная плазменная обработка представляет собой универсальный инструмент модификации свойств материалов, нашедший широкое применение в различных отраслях промышленности. Варьирование параметров плазменного воздействия — состава плазмообразующей среды, мощности разряда, давления и продолжительности обработки, позволяет целенаправленно изменять характеристики материалов в соответствии с их функциональным назначением. Экологическая безопасность плазменных технологий, не требующих применения химических реагентов, определяет их высокий научно-практический потенциал.

Среди различных видов газовых разрядов плазма высокочастотного емкостного разряда пониженного давления занимает особое положение. Её отличительной особенностью является способность проникать не только на открытую поверхность обрабатываемого образца, но и в поры и капилляры

волокнистых материалов, непосредственно не контактирующие с потоком плазмообразующего газа. В результате плазменного воздействия устраняются микродефекты поверхности размером 0,1–1,0 мкм, удаляется трещиноватый и рельефный слои, обеспечивается высокоэффективная очистка поверхностного слоя от примесных дефектов. Применение плазмы струйного ВЧ-разряда пониженного давления для обработки текстильных материалов из волокон технической конопли позволяет повысить механические и сорбционные характеристики материалов.

Плазменная обработка образцов проводилось на установке «ВАТТ 4000 ПТ ПЛАЗМА» [98], общий вид которой представлен на рисунке 2.1

Установка «ВАТТ 4000 ПТ ПЛАЗМА» относится к установкам периодического действия однокамерного типа, предназначена для рулонных материалов, пленок текстиля и т.п.

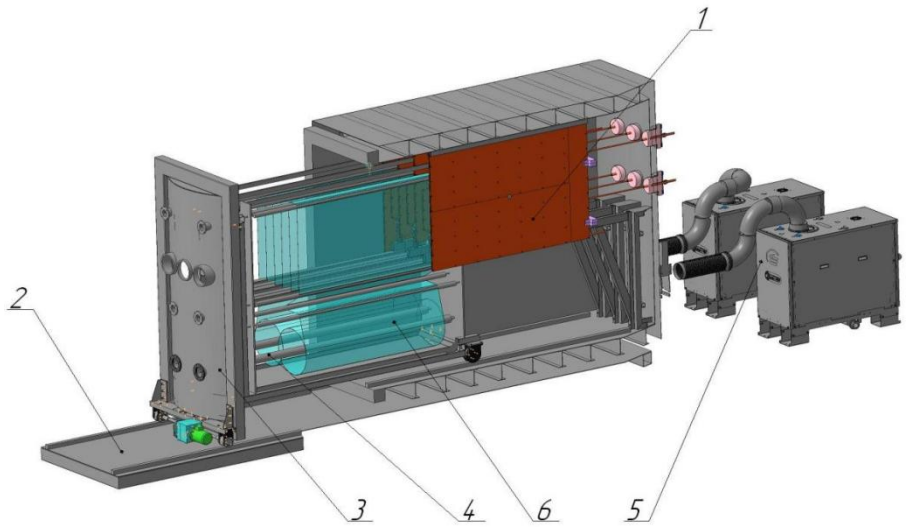


Рисунок 2.1 – Общий вид установки « ВАТТ 4000 ПТ ПЛАЗМА»
1 – вакуумная камера с рулонной подаче, 2 – рама,
3 – дверь, 4 – намотчик тканей, 5 – откачная система, 6 – заправка рулона

Плазменная установка обеспечивает предельное остаточное давление не более $1 \cdot 10^{-2}$ Па ($1{,}33 \cdot 10^{-4}$ мм рт. Ст.), внутренний объем установки 6,5 м³, ширина обрабатываемого рулона до 1500 мм, скорость подачи рулона до 10 метров в минуту. Установка работает от сети питания напряженностью 380

потребляемая мощность — 60 кВт. Внешние габаритные размеры 3000 × 4500 × 8500 мм, масса — не более 5500 кг. Обслуживание оборудования осуществляется персоналом в составе двух человек.

Фотография плазменной установки приведена на рисунке 2.2.



Рисунок 2.2 – Установка «ВАТТ 4000 ПТ ПЛАЗМА»

Расположение ткани вдоль электродов обеспечивала направление плазменного потока вдоль поверхности ткани. Управление параметрами плазменной обработки осуществлялось посредством варьирования следующих технологических факторов: расхода рабочего газа G, мощности высокочастотного разряда Wp, давления в разрядной камере Рк и продолжительности воздействия τ. Экспериментальные исследования проводились в ранее установленных оптимальных режимах плазменного наноструктурирования, обеспечивающих достижение наилучших характеристик модифицированных текстильных материалов из волокон технической конопли.

Данная установка использована для проведения проверки осуществления гипотезы возможности управления характеристиками тканей из волокон технической конопли при плазменной обработке.

Для проведения плазменной обработки образцов из волокон технической конопли китайского производства использована плазменная установка ВЧЕ-разряда пониженного давления [99]. Внешний вид

плазменной установки с пультом управления представлен на рисунке 2.3. Обработка образцов проходила в вакуумной камере бочкообразной формы из нержавеющей стали с толщиной стенки 8 мм. В камеру установлены крепления для навески образцов. Принцип работы установки аналогичен описанной ранее. Внутри камеры происходила вакуумизация с последующей подачей газа и переводом его в состояние низкотемпературной плазмы. Вакуумная камера предназначена для создания разреженной газовой среды в плазмотроне и размещения конструктивных элементов, обеспечивающих технологический процесс обработки текстильных материалов. Внутри камеры установлены высокочастотные электроды, камера соединена с вакуумирующей установкой и вакуумным насосом.

На рисунке 2.4 представлена схема ВЧ плазменной установки пониженного давления. Рабочая частота генератора установки составляет 13,56 МГц; предусмотрена возможность регулировки выходной мощности, подаваемой на электроды.



Рисунок 2.3 – Внешний вид ВЧЕ плазменной установки пониженного давления

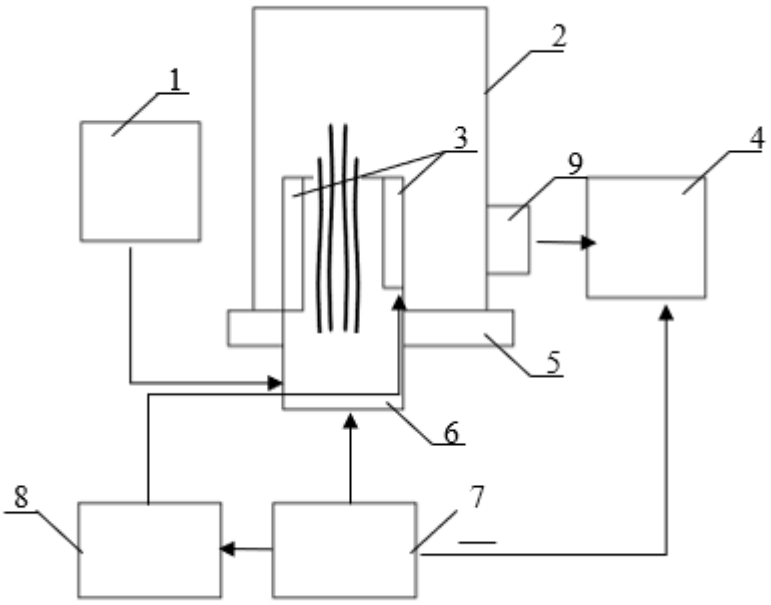


Рисунок 2.4 – Функциональная схема экспериментальной ВЧЕ плазменной установки пониженного давления

1 – подача газа, 2- вакуумная камера, 3 – электроды, 4 – система откачки, 5 – вакуумный блок, 6 – разрядная камера, 7 – чиллер, 8 – ВЧ генератор, 9 – вакуумный трубопровод

Система вакуумирования обеспечивает комплексную работу вакуумных насосов для откачки влаги и воздуха, исключающих попадание жидкости в среду плазменной обработки. Рабочее давление в вакуумной камере составляет 1,33 Па.

Исследование плазменного воздействия на волокнистые материалы из технической конопли проводилось в условиях ВЧЕ- разряда пониженного давления. Образцы текстильных материалов из технической конопли размещались между электродами, плазмообразующий газ направлялся вдоль образцов.

Высокочастотная плазменная обработка представляла собой совокупность последовательно-параллельных физико-химических процессов, приводящих к модификации не только физико-химические характеристики материалов, но и к изменению морфологии поверхности, элементного состава поверхностных слоёв, а также к образованию новых химических соединений на поверхности и в приповерхностной зоне.

Процесс плазменного структурирования осуществлялся в вакуумной среде при подаче на электроды напряжения мощностью 1,2 кВт. Установлено, что ключевыми факторами, определяющими морфологию поверхности текстильных материалов из технической конопли, являются состав плазмообразующей газовой смеси и длительность экспозиции образцов. При проведении модификации данных текстильных материалов, время воздействие составило от 3 до 12 минут, плазмообразующими газами являлись азот, аргон и воздух, остаточное давление в камере составило 20 Па.

К основным выходным параметрам ВЧЕ- разряда и плазменного потока, определяющим результат модификации, относятся напряжённость магнитного поля, плотность тока в разряде, энергия ионов, скорость плазменных потоков и температура обрабатываемых образцов.

2.3 Методики исследования сорбционных и механических свойств текстильных материалов из волокон технической конопли

Анализ механических свойств позволяет оценить эксплуатационную надежность ткани: её устойчивость к повреждениям и прогнозируемый срок службы. Для установления эксплуатационных характеристик ткани проводился комплексный анализ механических свойств, включающий оценку разрывной нагрузки и деформационных показателей (удлинения), определение жёсткости на изгиб, сопротивления раздирающим нагрузкам и стойкости текстильных полотен к истиранию. Исследования текстильных материалов выполняются согласно утвержденным стандартам и методическим указаниям.

Отбор штучных проб текстильных материалов проводился согласно требованиям ГОСТ 20566-75. Ткани и штучные изделия текстильные. Правила приемки и метод отбора проб [100].

Определение разрывной нагрузки и удлинения при разрыве осуществлялось на разрывной машине Metrotest STM 200 в соответствии с требованиями ГОСТ 3813-72 «Материалы текстильные. Ткани и штучные

изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении». Из точёной пробы текстильного материала вырезали прямоугольники размером 200х50 мм, отступая от кромки материала. Элементарные пробы выбирали по направлению нитей основы и утка. Разметку элементарных проб проводили таким образом, чтобы нити основы и утка не являлись продолжением [101].

Кроме количественного измерения показателя разрывной нагрузки, определено значение показателя относительной разрывной нагрузки, определяемого соотношением разрывной нагрузки экспериментального образца и контрольного образца.

Аналогично проведено определение показателя разрывного удлинения, фиксируемого на разрывной машине и определение показателя относительного разрывного удлинения. Относительная разрывная нагрузка $\Delta P_н$ и относительное разрывное удлинения $\Delta\varepsilon_р$ экспериментальных образцов определяли по формулам (2.1), (2.2):

$$\Delta P_н = \frac{P_{н.К} - P_{н.ХП}}{P_{н.К}} \times 100\%, \quad (2.1)$$

$$\Delta l_о = \frac{l_{о.К} - l_{о.ХП}}{l_{оК}} \times 100\%, \quad (2.2)$$

где $P_{н.К}$ и $l_{о.К}$ – разрывная нагрузка и относительное удлинение контрольных образцов до плазменной обработки;

$P_{н.ХП}$ и $l_{о.ХП}$ – разрывная нагрузка и относительное удлинение образцов после обработки в потоке плазмы пониженного давления.

Определение показателя стойкости текстильных полотен к истиранию осуществлялось по методу Мартиндейла в соответствии с требованиями ГОСТ Р ИСО 12947-1–2011 и ГОСТ ISO 12947-2–2021. Сущность метода заключалась в моделировании абразивного воздействия на материал путём многократного трения образца о стандартную абразивную поверхность.

Элементарные пробы, вырубленные в виде круглых диафрагм, фиксировались в подвижном держателе, к которому прикладывалась

нормированная нагрузка. Держатель с образцом совершал возвратно-поступательные перемещения по траектории фигуры Лиссажу, относительно абразивного материала. При этом держатель свободно вращался вокруг собственной оси, перпендикулярной плоскости пробы, что обеспечивало равномерность износа по всей площади контакта.

В качестве критериев оценки истирания фиксировались визуальные изменения внешнего вида образца, включая: частичное стирание ворсового слоя; утрату пучков волокон; разрушение отдельных нитей (с указанием типа повреждённых и неповреждённых компонентов, например, нитей эластана); разрушение петельной структуры; потерю ворса; появление глянца (заглаженности) поверхности, а также существенное изменение цвета материала. При выявлении указанных изменений фиксировались их характер и интервал числа циклов истирания, в котором они проявились [102, 103].

Следующим этапом оценки экспериментальных образцов стало изучение их сорбционных характеристик. В ходе работы определены такие параметры, как капиллярность, гигроскопичность и краевой угол смачивания материалов.

Определение краевого угла смачивания поверхности текстильных материалов осуществлялось на автоматизированном оптическом анализаторе OCA 15 Pro, производитель – DataPhysics Instruments, Германия. Анализатор имеет увеличение 6X и регулируемую систему фокусировки, показания анализатора фиксируется автоматически на ПЭВМ с соответствующим программным оборудованием. Прибор имеет возможность фото – и видео - фиксации.

На образец текстильного материала, находящегося на предметной панели, направлена камера. Капля подается из шприца, при этом используется дистиллированная вода [104].

Для определения краевого угла смачивания применяли фото- и киноаппаратуру со скоростью съемки 16-1500 кадров в секунду. Измерение краевого угла смачивания производилось в следующем порядке: на снимке

капли проводилась касательная в точке пересечения контура капли с поверхностью образца, измеряли угол наклона касательной.

Вычисление краевого угла смачивания для капли следует проводить по формуле (2.3):

$$\theta_1 = \frac{\theta_{лев} + \theta_{прав}}{2}, \quad (2.3)$$

где $\theta_{лев}\theta_{прав}$ - измеренные значения краевого угла смачивания с левой и правой сторон соответственно.

$$\theta_{ср} = \frac{\theta_1 + \theta_2 . + ...\theta +_n}{n}, \quad (2.4)$$

Для точного результата испытания принимали среднее арифметическое значения 3-5 образцов, рассчитывали по формуле (2.4).

Измерение капиллярности конопляных тканей проводили по ГОСТ 3816-81. Оценка капиллярности по направлениям основы и утка осуществлялась в соответствии с установленной методикой. Из каждого образца вырезалось по три пробы (300×50 мм), которые фиксировались в вертикальном положении. Нижние края проб погружались в емкость с окрашенным раствором. Для фиксации высоты подъема жидкости на вертикальной стойке были закреплены измерительные линейки, нулевая отметка которых совмещалась с уровнем поверхности раствора. Уровень капиллярного подъема жидкости определялся через час [105].

Гигроскопичность образцов определяли путём их выдержки в эксикаторе при относительной влажности 98% до установления равновесного состояния с последующим высушиванием в сушильном шкафу до постоянной массы. Расчет показателя проводили как отношение массы высушенного образца к его исходной массе, выраженное в процентах [106].

Напряженность электрического поля экспериментальных и контрольных образцов определялась с помощью прибора СТ-1 в

соответствии с требованиями ГОСТ 32995-2014. Технические характеристики устройства: диапазон измерений – до 180 кВ/м, предельно допустимая относительная погрешность – ±15%. При этом уровень напряженности электростатического поля для текстиля не должен превышать15 кВ/м согласно ГОСТ [107].

Исследование влияния процесса стирки на текстильные материалы выполнялось в соответствии с регламентом стандарта ГОСТ ISO 6330-2014. Экспериментальные образцы материалов подвергались процессу стирки в проточной водопроводной воде с добавлением порошкообразного моющего средства на нефосфатной основе, не содержащего ферменты, при температурном режиме 60^0С. По завершении цикла стирки испытуемые образцы подвергались сушке на горизонтальной поверхности [108].

2.4 Методы и оборудование для исследования структуры текстильных материалов из волокон технической конопли

Структуру поверхности исходных и модифицированных плазмой образцов текстильных материалов из конопли изучали методом конфокальной лазерной сканирующей микроскопии на приборе Olympus LEXT-4000 (Япония) и методом сканирующей микроскопии на рабочей станции AURIGA CrossBeam с ЭДС Inca X-Max 80мм^2 (Германия).

Фазовый состав и степень кристалличности текстильных материалов из технической конопли определяли методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре Rigaku SmartLab (Аналитический исследовательский центр КНИТУ).

Химическую структуру образцов текстильных материалов из технической конопли исследовали методом ИК-Фурье-спектроскопии на спектрометре ФСМ 1202 (Россия), оснащенном приставкой МНПВО.

2.5. Методы статистической обработки результатов экспериментальных исследований

Расчет погрешностей прямых измерений произведен в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [108]. Достоверность результатов анализа свойств исходных и модифицированных плазмой образцов конопляных материалов гарантировалось использованием поверенных средств измерений и откалиброванной аппаратуры.

Обоснование достоверности экспериментальных данных продемонстрировано на примере определения напряжения электрического поля. Испытания выполнялись с использованием прибора СТ-01, который имеет допустимую относительную погрешность не более ±15%. Расчет погрешностей измерения согласно требованиям ГОСТ Р 8.763-2011, позволяет оценить точность полученных значений и подтвердить их воспроизводимость.

Таблица 2.2 содержит итоговые показатели напряженности электрического поля и сопутствующие им отклонения, что создает базу для последующей интерпретации и сравнительной оценки функциональных свойств материалов.

Среднее значение измеряемой величины (2.6):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i , \qquad (2.6)$$

где $\bar{x}$– среднеарифметическое значение результатов;

n – число результатов измерений.

$\bar{X}$=1,89/20=0,09 кВ/м

Таблица 2.2 – Результаты измерения напряжения электрического поля

№ п/п	Результаты наблюдений показания, x_i,	Отклонения и их квадраты	
		$[x_i-\bar{x}]$	$[(x_i-\bar{x})^2]$
1	0,05	-0,04	0,0016
2	0, 08	-0,01	0,0001
3	0, 08	-0,01	0,0001
4	0,10	0,01	0,0001
5	0,07	-0,02	0,004
6	0,01	-0,08	0,0064
7	0,02	-0,07	0,0049
8	0,11	0,02	0,004
9	0,18	0,09	0,0081
10	0,20	0,11	0,0121
11	0,03	-0,06	0,0036
12	0,14	0,05	0,0025
13	0,18	0,09	0,0081
14	0,27	0,18	0,0324
15	0,01	-0,08	0,0064
16	0,18	0,09	0,0081
17	0,05	-0,04	0,0016
18	0,03	-0,06	0,0036
19	0,01	-0,08	0,0064
20	0,09	0	0

Абсолютное отклонение Δx определяется по формуле (2.7):

$$\Delta x=\pm(x_i-\bar{x})=0{,}06, \qquad (2.7)$$

Относительное отклонение δ, % определяется по формуле (2.8):

$$\delta=\Delta x/\bar{x}\cdot 100=(0{,}06/1{,}19)\cdot 100=66{,}7\%, \qquad (2.8)$$

Среднеквадратическое отклонение результата серии измерений определяется по формуле (2.9):

$$S_n=\pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{\Delta x^2}{(n-1)}}, \qquad (2.9)$$

$$S_n=\pm\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\frac{0{,}06^2}{(20-1)}}=\sqrt{\frac{0{,}0036}{19}}=0{,}014,$$

Среднеквадратическое отклонение среднего арифметического (оценки измеряемой величины) (2.10):

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_n}{\sqrt{n}} = \frac{0,0014}{4,47} = 0,031, \quad (2.10)$$

Доверительные границы случайной погрешности определяют, по формуле (2.11):

$$\varepsilon = t \cdot S_{\bar{x}}, \quad (2.11)$$

В соответствии с таблицей Д.1 приложения к ГОСТ Р 8.736-2011 $t = f((n-1)\ P)$ и при доверительной вероятности P = 0,95 и $(n-1)$ =19, t = 2,086

$$\varepsilon = t \cdot S_{\bar{x}} = 2,086 \cdot 0,031 = 0,065$$

Доверительные границы неисключенной систематической погрешности результата измерения определяется по формуле (2.12):

$$\Theta = k \cdot \sqrt{\sum \Theta_i^2}, \quad (2.12)$$

где Θ – граница i-ой не исключенной систематической погрешности;

k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом слагаемых.

При P =0,95, k =1,1.

Прибор СТ-01 имеет электронный экран и представляет быстрые и точные результаты. Благодаря точности измерений образцов данная величина равняется нулю.

Граница погрешности результатов измерений оценивается так:

если $\frac{\Theta}{S(\bar{x})} < 0,8$, неисключенные систематические погрешности в сравнении со случайными пренебрегаются и принимается граница погрешности результата $\Delta = \varepsilon = 0,065$.

Числовое значение результата измерения d может оканчиваться цифрой того же разряда, что и значение погрешности Δ.

Величина относительной погрешности δd результата измерения d определяется по формуле (2.13):

$$\delta_d = \frac{\Delta}{\tilde{x}} \cdot 100\%, \tag{2.13}$$

$$\delta_d = \frac{0{,}065}{0{,}09} \cdot 100\% = 72\%$$

Погрешности других измерений образцов текстильных материалов определены аналогично измерению напряженности электрического поля.

Относительное удлинение при разрыве $\Delta\varepsilon_p = \pm 1{,}2\%$

Разрывная нагрузка $\Delta\delta_p = \pm 1{,}2\%$

Стойкость к истиранию текстильных материалов $\Delta m = \pm 1{,}0\%$

Гигроскопичность $\Delta H = \pm 1{,}1\%$

Капиллярность $K = \pm 1{,}4\%$

Установлено, что значение измерений средних квадратичных погрешностей оборудования больше погрешностей методов исследования, что позволяет в дальнейшем их не учитывать и не отображать на графиках пределы отклонений измеряемых величин.

Таким образом, в данном разделе определены объекты исследования и перечень оборудования, применяемого для плазменной обработки текстиля из технической конопли. Кроме того, систематизированы методики, используемые для оценки сорбционных характеристик, механических показателей и структурных изменений текстильных материалов из волокон технической конопли.

ГЛАВА 3. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И СОРБЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В данной главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния плазменной модификации на механические и сорбционные характеристики текстиля из технического конопляного волокна различного смесового состава и структуры, приведено сравнение полученных данных с характеристиками контрольных образцов. Описанные результаты исследований опубликованы в работах [109-119].

3.1 Экспериментальное исследование механических и сорбционных показателей текстильных материалов из волокон технической конопли, подвергнутых плазменной модификации

В ходе изучения воздействия ВЧ низкотемпературной плазмы на характеристики текстиля из технической конопли была апробирована методика плазменной модификации. Целью эксперимента стала верификация возможности направленного изменения механических и сорбционных характеристик текстильного материала из технической конопли.

Исследование посвящено анализу влияния плазменной обработки при низких температурах на свойства текстильных материалов из технической конопли, а также оценке потенциала данной технологии в модификации механических и сорбционных показателей материалов.

Для проведения экспериментальных исследований использована ткань полотняного переплетения индийского производства, изготовленная из 100% конопли с поверхностной плотность 118 г/м^2.

Обработка текстильных образцов плазмой проводилась на плазменной установке ВЧЕ, где создавался поток неравновесной низкотемпературной плазмы пониженного давления.

3.1.1 Исследование механических свойств текстильных материалов из волокон технической конопли

Определение разрывной нагрузки. Разрывная нагрузка образцов текстильных материалов с содержанием волокон из конопли определялась согласно ГОСТ 3813-72.

В результате проведённых исследований установлено, что плазменная обработка оказывает различное влияние на ткани различного состава и структуры.

На рисунке 3.1 представлен график зависимости показателя разрывной нагрузки от времени обработки и выбора плазмообразующего газа для текстильного материала полотняного переплетения, состоящего из 100% волокон технической конопли.

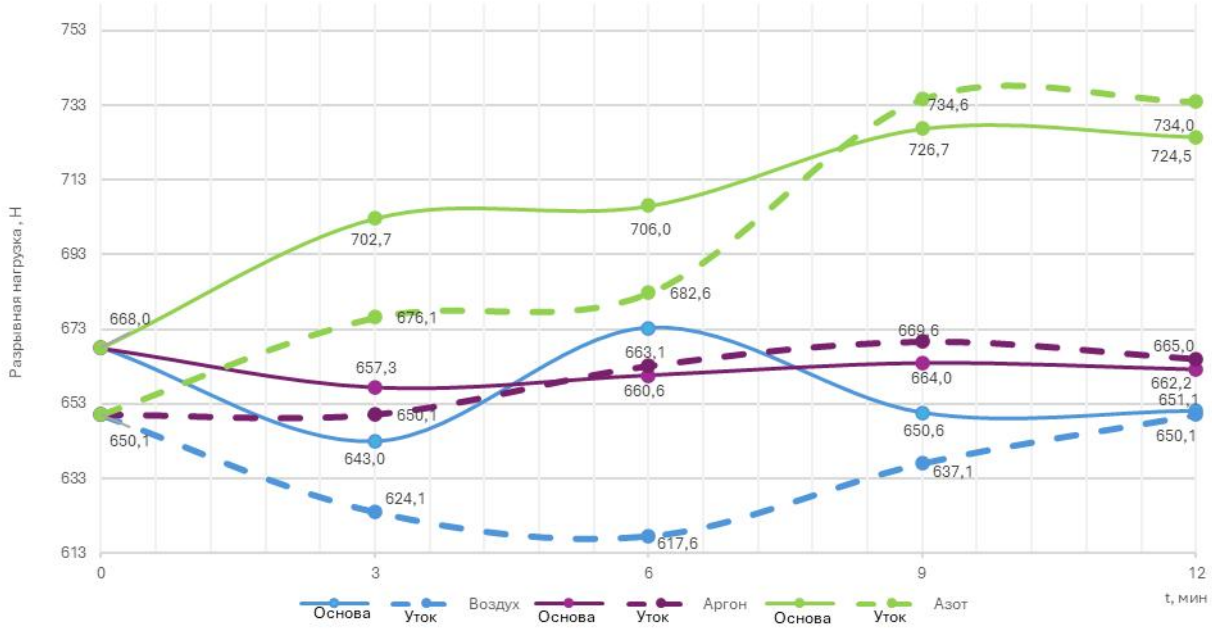


Рисунок 3.1 – Зависимость разрывной нагрузки по основе и утку текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли от времени плазменной обработки и плазмообразующего газа в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Плазменная обработка в воздушной среде демонстрирует деструктивный эффект. Максимальное падение относительной разрывной нагрузки составляет -5,0% по утку. Применение аргона в качестве плазмообразующего газа обусловило нелинейный характер динамики исследуемого показателя по основе и утку.

Плазменная обработка в среде азота привела к следующему изменению прочностных характеристик. При увеличении времени экспозиции относительная разрывная нагрузка возросла, при времени обработки 9 минут относительная разрывная нагрузка составила 8,8 % по основе и 13% по утку.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что плазменная модификация в воздушной плазме при данных режимах воздействия является наиболее агрессивной по отношению к текстилю из технической конопли волокну, вызывая снижение разрывной нагрузки.

Рассмотрим динамику изменения показателя относительной разрывной нагрузки ткани смесового волокнистого состава (55% конопли и 45% хлопка) под воздействием низкотемпературной плазменной обработки (рисунок 3.2).

Воздействие воздушной плазмы пониженного давления характеризуется преимущественно деструктивным влиянием на прочностные характеристики исследуемого материала. Уже при минимальной экспозиции 3 минуты фиксируется снижение относительной разрывной нагрузки до отметки -23% по утку. Увеличение времени обработки до 6 и 9 минут не приводит к восстановлению показателя.

Обработка в среде инертного газа аргона имеет нелинейную зависимость. Кратковременная экспозиция 3 минуты вызывает максимальное падение прочности до -30%. При увеличении времени обработки до 6 и 9 минут наблюдается частичное восстановление прочностных свойств.

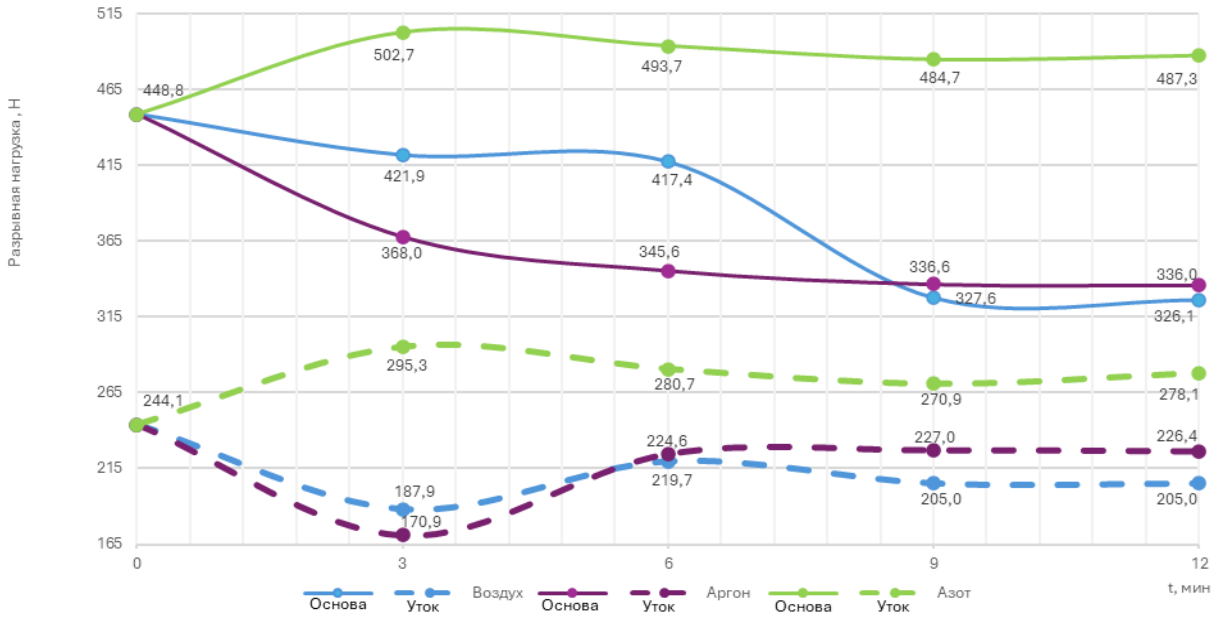


Рисунок 3.2 – Зависимость разрывной нагрузки по основе и утку текстильного материала полотняного переплетения из 55% технической конопли и 45% хлопка от времени плазменной обработки и плазмообразующего газа в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Плазменная модификация в атмосфере азота демонстрирует повышение прочности материала на начальных этапах обработки. При экспозиции 3 минуты зафиксирован прирост относительной разрывной нагрузки, достигший + 12% по основе и +21% по утку. Увеличение времени обработки до 6 минут сопровождается повышение положительного эффекта + 10% по основе и до +15% по утку, а при 9 минутах наблюдается повышение прочности + 8% по основе и по утку +11%.

Среди исследованных газовых сред азотная плазма при малых экспозициях может быть использована для повышения разрывной нагрузки смесовой конопле-хлопковой ткани. Воздушная и аргоновая плазмы в данных режимах оказывают преимущественно деградирующее воздействие, вызывая потерю механической прочности текстильного материала.

Рассмотрим результаты исследования влияния низкотемпературной плазменной модификации на показатель относительной разрывной нагрузки ткани саржевого переплетения из 80% конопли и 20% хлопка (рисунок 3.3).

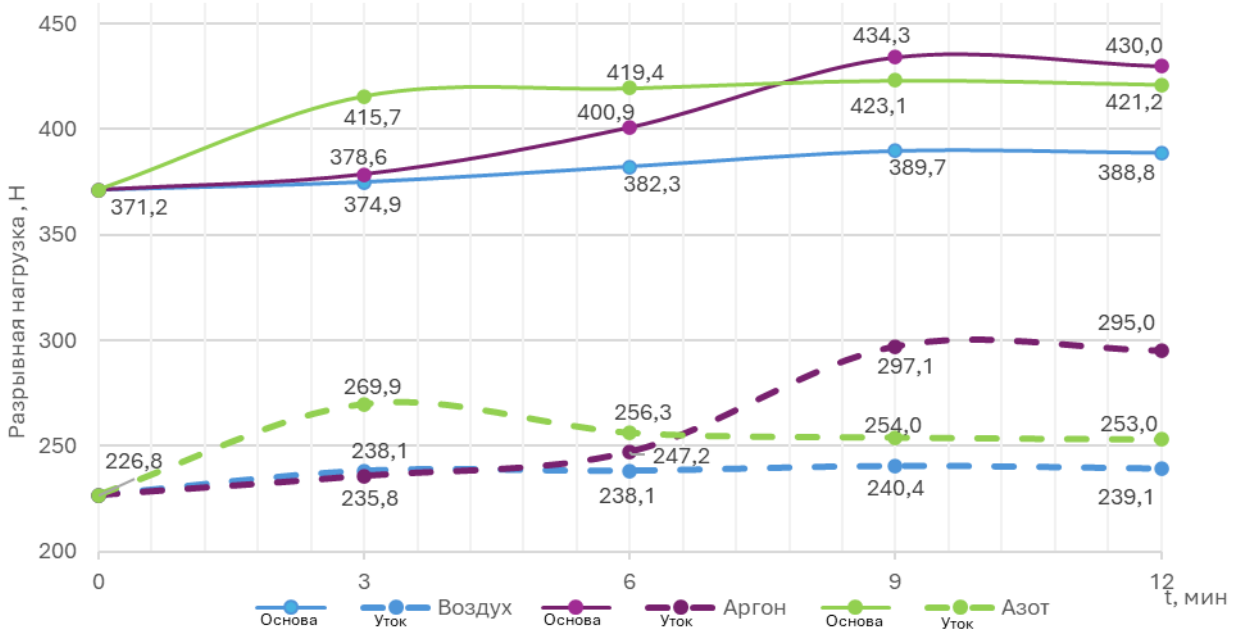


Рисунок 3.3 – Зависимость разрывной нагрузки по основе и утку текстильного материала саржевого переплетения из 80% технической конопли и 20% хлопка от времени плазменной обработки и плазмообразующего газа в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Обработка в среде воздуха демонстрирует стабильный, но умеренный положительный эффект, усиливающийся с течением времени. При минимальной экспозиции 3 минуты прирост разрывной нагрузки по основе и утку составляет соответственного от 1% до 5%. Увеличение времени обработки до 6 минут незначительно повышает показатель для нитей основы до 3%, сохраняя значение для утка на уровне 5%.

Плазменная обработка в аргоновой среде при кратковременной экспозиции 3 и 6 минут демонстрирует минимальное влияние на прочность, прирост составляет 2–9%. Однако при увеличении времени воздействия до 9 минут относительная разрывная нагрузка возрастает на 17% по основе и на 31% для нитей утка.

Плазменная обработка в среде азота при 3 минутах экспозиции фиксируется значительный прирост прочности: 12% для нитей основы и 19% для утка. Дальнейшее увеличение времени обработки не приводит к увеличению показателя относительной разрывной нагрузки по утку, но для основы относительная разрывная прочность после 9 минут обработки достигает 14%.

Среди исследованных газовых сред аргоновая плазма демонстрирует высокую эффективность при длительной обработке в течение 9 минут, азотная плазма является также перспективным инструментом для повышения разрывной нагрузки саржевой конопле-хлопковой ткани, обеспечивая стабильный прирост прочности на всех исследуемых экспозициях, тогда как воздушная плазма оказывает умеренное положительное воздействие, не приводящее к резким изменениям механических свойств материала.

Показатели относительной разрывной нагрузки контрольных образов текстильных материалов полотняного и саржевого переплетения из конопли и образцов, подвергнутых плазменной модификации, представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. – Изменение показателя относительной разрывной нагрузки текстильных материалов из технической конопли

Наименование плазмообразующего газа, время экспозиции в режиме f=13,56 МГц; Рк =18-20 Па; G= 2000 см³/с	Разрывная нагрузка, относительно контрольных образцов, %					
	Конопля 100%		Конопля 55% хлопок 45%		Конопля 80% , хлопок 20%	
	Полотняное переплетение				Саржевое переплетение	
	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток
1	2	3	4	5	6	7
Воздух, 3 мин	-1,1	-4,0	-6,0	-23,0	1,0	5,0
Воздух, 6 мин	0,8	-5,0	-7,0	-10,0	3,0	5,0
Воздух, 9 мин	-2,6	-2,0	-27,0	-16,0	5,0	6,0

Окончание таблицы 3.1

1	2	3	4	5	6	7
Аргон, 3 мин	-1,6	0,0	-18,00	-30,0	2,0	4,0
Аргон, 6 мин	-1,1	2,0	-23,0	-8,0	2,0	7,0
Аргон, 9 мин	-0,6	3,0	-25,0	-7,0	17,0	31,0
Азот, 3 мин	5,2	4,0	12,00	21,0	12,0	19,0
Азот, 6 мин	5,7	5,0	10,00	15,0	13,0	13,0
Азот, 9 мин	8,8	13,0	8,00	11,0	14,0	12,0

Показатели разрывной нагрузки трикотажных полотен определялись вдоль петельных столбиков и поперек петельных столбиков, направление вдоль петельных столбиков соотносится с направлением нитей основы в полотняном переплетении, поперек петельных столбиков – с направлением утка.

На рисунке 3.4 представлена диаграмма зависимости показателя разрывной нагрузки от времени обработки и выбора плазмообразующего газа для трикотажного текстильного материала из 100% технической конопли.

Обработка в воздушной среде демонстрирует стабильный положительный эффект, выраженность которого зависит от времени экспозиции. При минимальной продолжительности 3 минуты прирост разрывной нагрузки составляет 19% для нитей вдоль петельных столбиков и 16% для нитей поперек петельного ряда. Увеличение времени обработки до 6 минут приводит к снижению положительной динамики (14% для направления вдоль петельных рядов и 12% для направления поперек). Однако при экспозиции 9 минут наблюдается максимальный прирост прочности, составляющий 20% вдоль петельных рядов и 12% поперек.

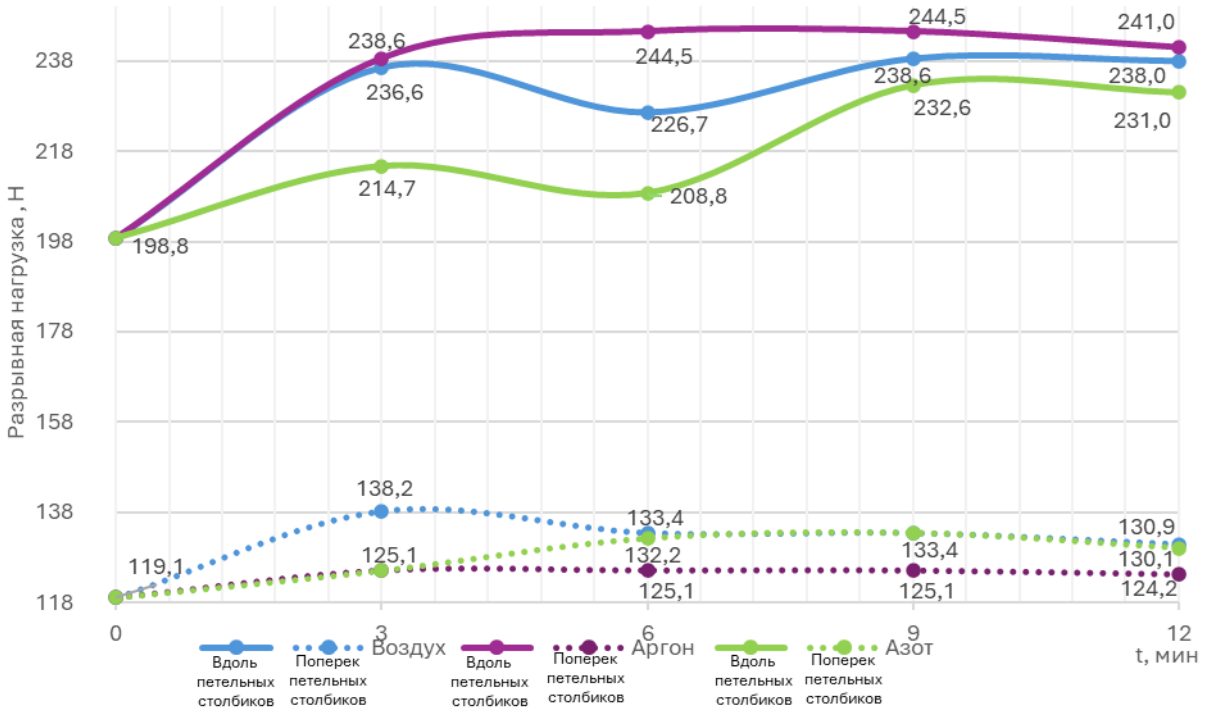


Рисунок 3.4 – Зависимость разрывной нагрузки вдоль и поперек петельных столбиков текстильного трикотажного материала из 100% технической конопли от времени плазменной обработки и плазмообразующего газа в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Как видно из рисунка 3.4, плазменная обработка трикотажного конопляного полотна в аргоновой среде характеризуется равномерным, до 23%, приростом относительной разрывной нагрузки по нитям вдоль петельных столбиков. При этом показатель поперек петельных столбиков растет незначительно, максимально до 5% при 9 минутах плазменной обработки.

Плазменная обработка в среде азота демонстрирует наиболее сложный и неоднозначный характер воздействия. При 3 минутах экспозиции фиксируется умеренный прирост прочности, составляющий 8% вдоль петельных столбиков и 5% поперек. Увеличение времени обработки до 6 минут незначительно снижает показатель относительной разрывной нагрузки вдоль петельных столбиков. При экспозиции 9 минут наблюдается прирост

разрывной нагрузки достигает 17% вдоль петельных столбиков и 12% поперек петельных столбиков.

Все исследованные газовые среды способствуют повышению разрывной нагрузки трикотажного полотна из 100% конопли, однако характер воздействия существенно различается. Наиболее стабильный и выраженный упрочняющий эффект демонстрирует аргоновая плазма, обеспечивая прирост до 23% для нитей вдоль петельных столбиков. При этом обработка в воздушной плазме характеризуется более сбалансированным увеличением показателя относительной разрывной нагрузки.

Рассмотрим динамику изменения показателя разрывной нагрузки от времени обработки и выбора плазмообразующего газа для трикотажного текстильного материала смесового состава, 55% технической конопли и 45% хлопка (рисунок 3.5).

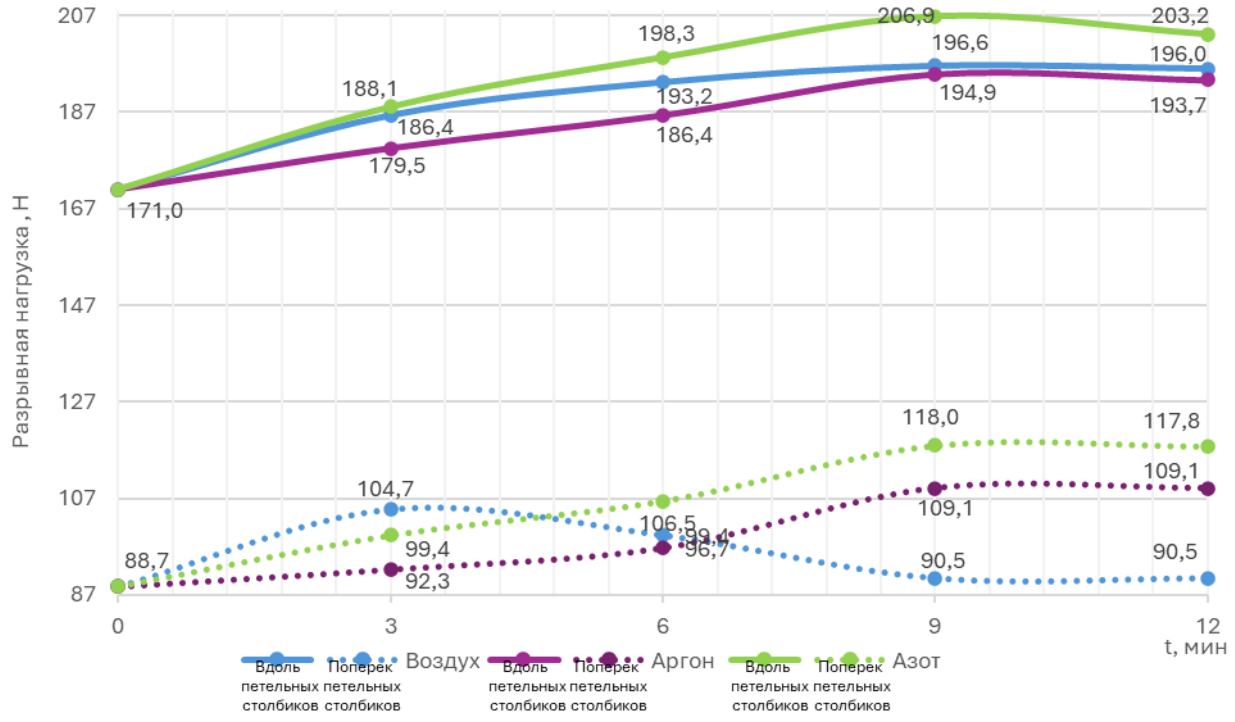


Рисунок 3.5 – Зависимость разрывной нагрузки вдоль и поперек петельных столбиков текстильного трикотажного материала из 55% технической конопли и 45% хлопка от времени плазменной обработки и плазмообразующего газа в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Плазменная обработка в среде воздуха демонстрирует положительный эффект, выраженность которого зависит от времени экспозиции. При минимальной продолжительности 3 минуты прирост разрывной нагрузки составляет 9% вдоль петельных столбиков и 18% поперек. Увеличение времени обработки до 6 минут приводит к незначительному снижению, 12% поперек петельных столбиков). При выборе технологического режима обработки целесообразно использовать минимальное время плазменной обработки в воздушной среде для достижения оптимального прироста показателя разрывной нагрузки.

Применение аргона в качестве плазмообразующего газа наиболее эффективно при продолжительности обработки 9 минут, данный режим обеспечивает максимальный упрочняющий эффект, при этом относительная разрывная нагрузка возрастает на 14% вдоль петельных столбиков и 23% поперек петельных столбиков.

Плазменная обработка в среде азота также демонстрирует прогрессивное увеличение показателей по мере возрастания времени воздействия. Максимальный прирост зафиксирован при экспозиции 9 минут, прочность возрастает на 21% вдоль петельных столбиков и 33% поперек петельных столбиков.

Все исследованные газовые среды способны повышать разрывную нагрузку трикотажного полотна из смеси конопли и хлопка, однако характер и интенсивность этого воздействия существенно различаются. Наиболее выраженный упрочняющий эффект на длительных этапах демонстрирует азотная плазма, обеспечивая максимальный прирост прочности до 33% для поперек петельных столбиков.

На рисунке 3.6 представлена диаграмма зависимости показателя разрывной нагрузки от времени экспозиции плазмы и выбора плазмообразующего газа для смесового текстильного материала (53% технической конопли, 44% хлопка, 3% спандекса).

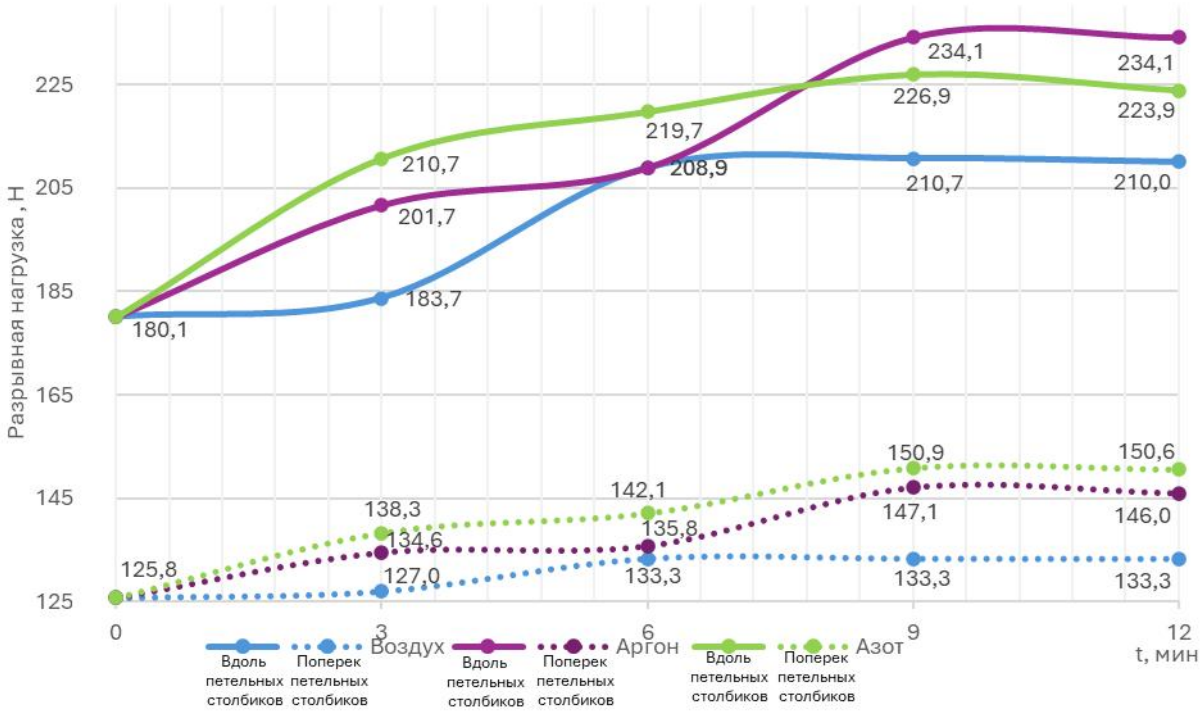


Рисунок 3.6 – Зависимость разрывной нагрузки вдоль и поперек петельных столбиков текстильного трикотажного материала из 53% технической конопли, 44% хлопка и 3% спандекса от времени плазменной обработки и плазмообразующего газа в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Как видно из рисунка 3.6, воздействие воздушной плазмой в течение 6 минут приводит к возрастанию показателя вдоль петельных столбиков до 16%, при этом для нитей поперек петельных столбиков значение составляет 6%. Увеличение времени обработки до 9 минут вызывает увеличение относительной разрывной нагрузки вдоль петельных столбиков до 17% и не изменяет показатель по направлению поперек петельных столбиков.

Обработка плазмой в среде аргона обеспечивает наибольший рост показателя при времени экспозиции 9 минут, при этом относительная разрывная нагрузка достигает значений в 30% вдоль петельных столбиков и 17% поперек петельных столбиков.

Воздействие плазменной обработки в азотной среде в течение 3 минут приводит к росту показателя относительной разрывной нагрузки до 17% вдоль петельных столбиков и до 10% поперёк петельных столбиков.

При увеличении времени обработки до 6 и 9 минут наблюдается устойчивая положительная динамика. Показатели вдоль петельных столбиков растут с 22% до 26%, поперек – с 13% до 20% соответственно.

Наибольший прирост относительной разрывной нагрузки до 30% наблюдается вдоль петельных столбиков, при плазменной обработке аргоном в течение 9 минут. Обработка азотом демонстрирует стабильный рост показателей разрывной нагрузки с увеличением времени экспозиции, тогда как использование воздуха не дает значительных результатов по росту показателя разрывной нагрузки.

Показатели относительной разрывной нагрузки контрольных образов трикотажных текстильных материалов из конопли и образцов, подвергнутых плазменной модификации, представлены рисунках 3.7-3.9.

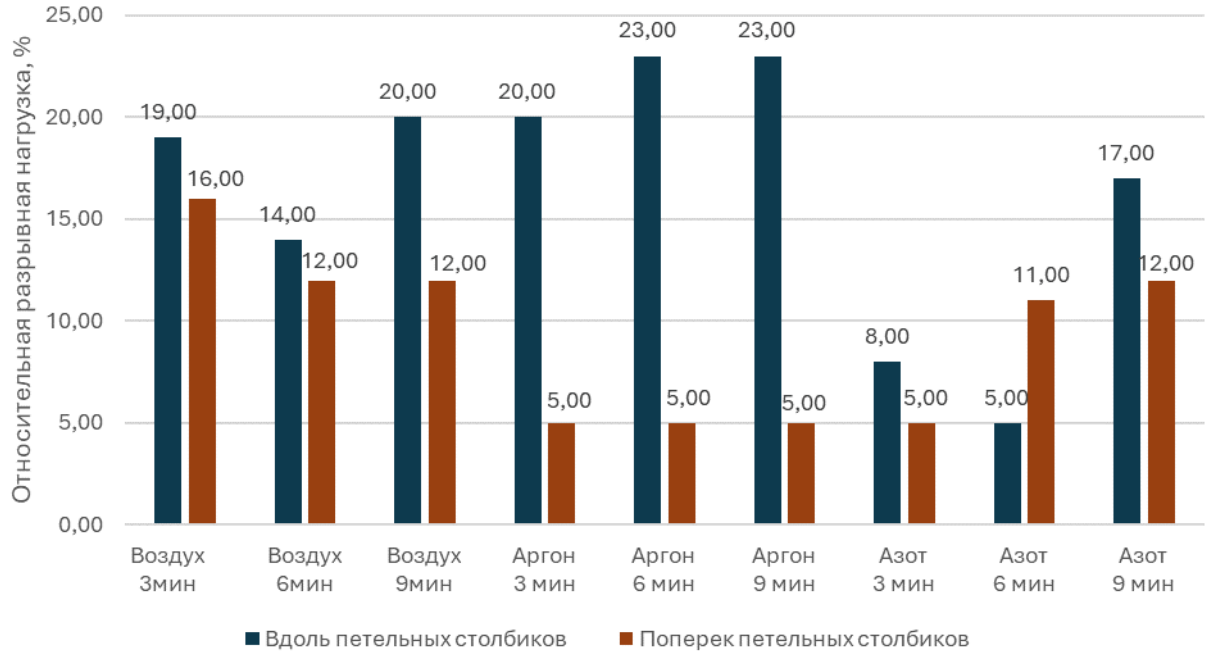


Рисунок 3.7 – Изменение показателя относительной разрывной нагрузки трикотажа из 100% конопли в зависимости от времени плазменной обработки и плазмообразующего газа, в режиме: f=13,56 МГц; $P_к$ =18-20 Па; G= 2000 см³/с

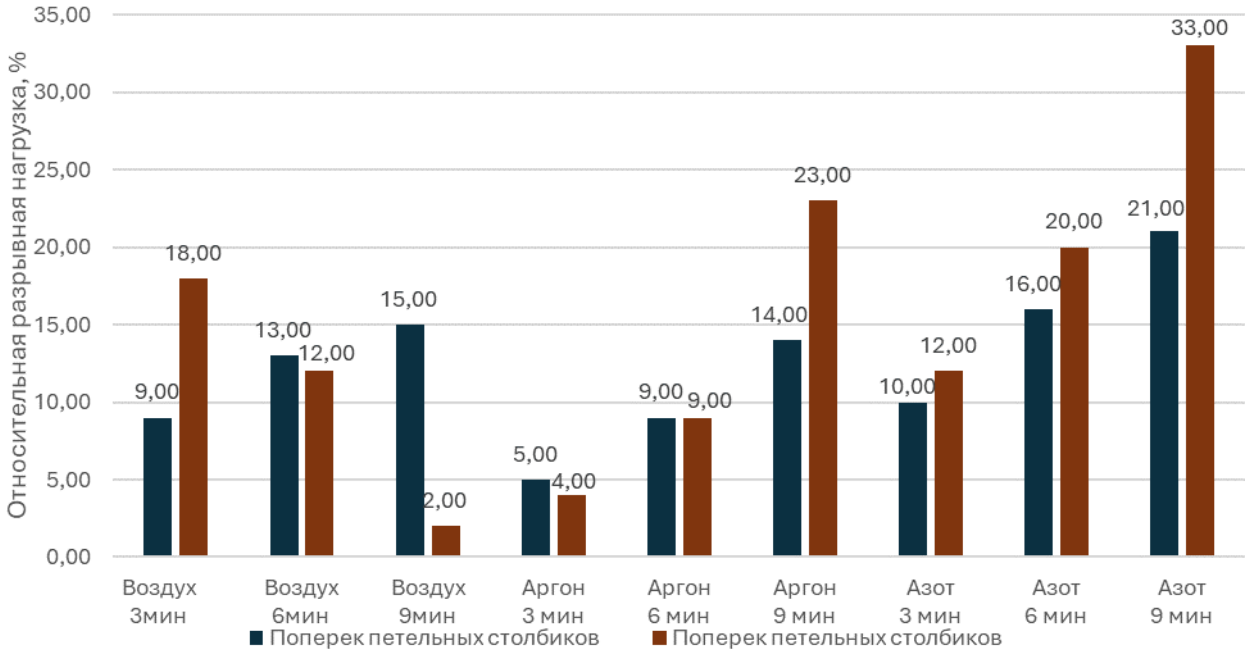


Рисунок 3.8 – Изменение показателя относительной разрывной нагрузки трикотажа из 55% конопли и 45% хлопка в зависимости от времени плазменной обработки и плазмообразующего газа, в режиме: f=13,56 МГц; $P_к$ =18-20 Па; G= 2000 см³/с

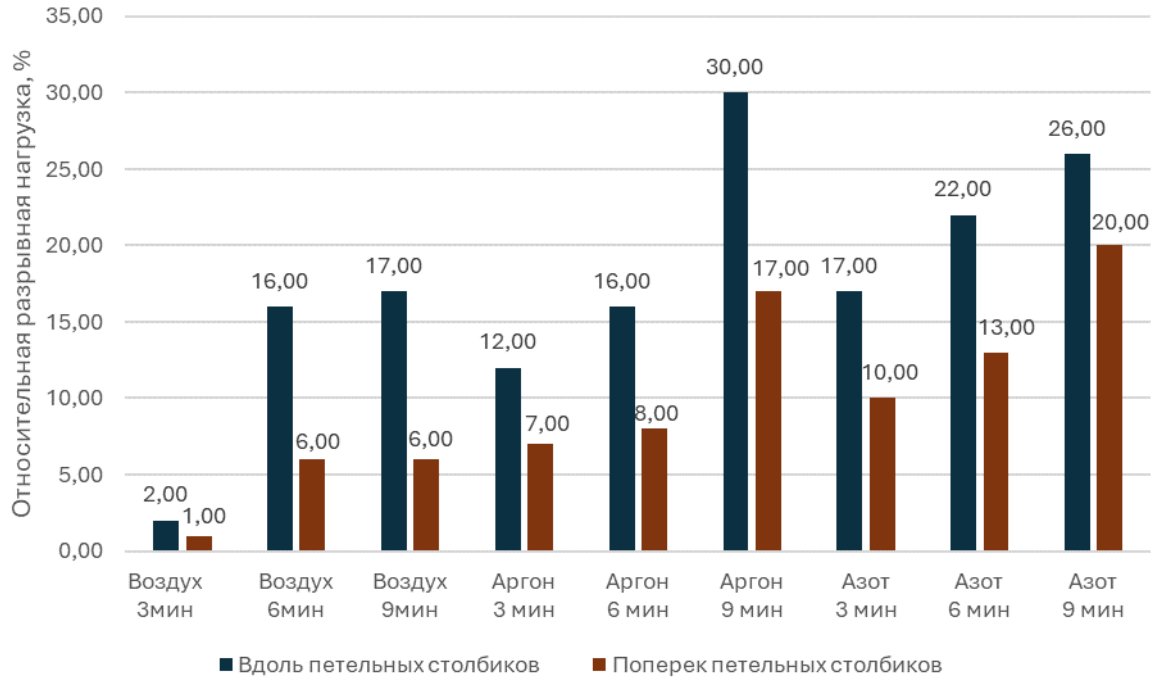


Рисунок 3.9 – Изменение показателя относительной разрывной нагрузки трикотажа из 53% конопли, 44% хлопка, 3% спандекса в зависимости от времени плазменной обработки и плазмообразующего газа, в режиме: f=13,56 МГц; $P_к$ =20 Па; G= 2000 см³/с

Таким образом, ткани полотняного и саржевого переплетения показывают умеренный рост показателя разрывной нагрузки. Исключение составил режим обработки саржевого образца в азотной и аргоновой среде, где максимальное увеличение показателя составило 31%. Трикотажная ткань из конопли 100% демонстрирует наиболее выраженное увеличение разрывной нагрузки в плазмообразующих газах аргон и воздух.

Рекомендованные режимы плазменной обработки для достижения максимальной прочности трикотажных образцов приведены в таблице 3.2.

Исследования показали, что плазменную обработку для увеличения разрывной прочности предпочтительно использовать для трикотажных образцов, для которых достигнутый максимальный эффект составляет 33%. При этом увеличение разрывной нагрузки происходит при применении всех видов газов, необходим выбор режима в соответствии с составом материала и продолжительность обработки.

Таблица 3.2 – Режимы плазменной обработки, рекомендуемые для упрочнения трикотажных образцов

Наименование состава трикотажного образца	Плазмообразующий газ, время экспозиции в режиме f=13,56 МГц; Рк =18-20 Па; G= 2000 см³/с	Разрывная нагрузка, относительно контрольных образцов, %	
		По основе	По утку
Конопля 100%	Воздух, 3 мин	19	16
	Воздух, 9 мин	20	12
	Азот, 9 мин	17	12
Конопля 55%, хлопок 45%	Аргон, 9 мин	14	23
	Азот, 6 мин	16	20
	Азот, 9 мин	21	33
Конопля 53%, хлопок 44%, спандекс 3%	Аргон, 9 мин	30	17
	Азот, 6 мин	22	13
	Азот, 9 мин	26	20

Согласно полученным результатам исследований, плазменная обработка наиболее эффективна для повышения разрывной нагрузки трикотажных материалов, где прирост показателя достигает 33%. Данный эффект наблюдается при использовании любых плазмообразующих газов. Тем не менее, для достижения оптимального результата необходимо подбирать режим обработки с учетом химического состава волокон и времени воздействия.

Определение разрывного удлинения.

В таблице 3.3 приведены значения показателей разрывного удлинения текстильных материалов из технической конопли до проведения плазменной обработки.

Таблица 3.3 – Значения показателя разрывного удлинения текстильных материалов из технической конопли до проведения плазменной обработки

Разрывное удлинение, мм											
Конопля 100%		Конопля 55%, хлопок 45%		Конопля 80%, хлопок 20%		Конопля 100%		Конопля 55%, хлопок 45%		Конопля 53%, хлопок 44%, спандекс 3%	
Полотняное переплетение				Саржевое переплете-ние		Кулирная гладь					
Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток	Вдоль петельных столбиков	Поперек петельных столбиков	Вдоль петельных столбиков	Поперек петельных столбиков	Вдоль петельных столбиков	Поперек петельных столбиков
15,3	48,6	17,2	55,0	16,3	50,3	130,4	258,8	128,8	240,3	170,6	270,8

В таблице 3.4 представлены значения показателя удлинения образцов при разрыве, относительно контрольных, выраженное в процентах.

Таблица 3.4 – Показатели относительного разрывного удлинения

Наименование плазмо-образующего газа, время экспозиции в режиме f=13,56 МГц; Рк =18-20 Па; G= 2000 см³/с	Удлинение, относительно контрольных образцов, %											
	Конопля 100%		Конопля 55%, хлопок 45%		Конопля 80%, хлопок 20%		Конопля 100%		Конопля 55%, хлопок 45%		Конопля 53%, хлопок 44%, спандекс 3%	
	Полотняное переплетение				Саржевое переплетение		Кулирная гладь					
	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток	Вдоль петельных столбиков	Поперек петельных столбиков	Вдоль петельных столбиков	Поперек петельных столбиков	Вдоль петельных столбиков	Поперек петельных столбиков
Воздух, 3мин	11,0	8,2	-2,3	1,6	2,0	1,4	0,5	-9,9	-11,6	13,1	-9,6	-12,8
Воздух, 6мин	3,2	2,1	6,8	-1,3	2,9	3,8	-2,9	-15,2	-11,0	3,5	-9,3	-13,3
Воздух, 9мин	5,4	2,1	-1,7	0,3	10,9	6,6	-0,2	-11,4	-11,4	6,1	-8,5	-12,2
Аргон, 3 мин	12,0	3,1	-1,3	4,7	11,2	2,8	-1,4	-1,4	-8,1	14,6	-4,1	-11,8
Аргон, 6 мин	14,5	5,4	-2,8	-4,6	17,4	8,0	1,6	0	-8,4	8,6	-4,8	-12,1
Аргон, 9 мин	12,7	7,3	-6,3	-1,8	4,3	9,2	4,4	2,2	-9,3	9,0	-9,2	-12,8
Азот, 3 мин	16,4	6,3	-3,7	1,9	11,5	17,0	5,9	-4,4	-9,7	16,4	-8,9	-12,4
Азот, 6 мин	18,1	5,2	-1,9	1,4	10,1	16,6	5,3	-3,6	-9,3	10,8	-10,0	-14,1
Азот, 9 мин	14,3	2,1	-4,8	-1,0	6,2	13,3	6,3	-0,8	-10,4	10,4	-9,6	-15,7

Как видно из таблицы 3.4, после плазменной обработки происходит изменение относительного разрывного удлинения исследуемых образцов.

При плазменной обработке текстильного материала полотняного переплетения из 100% волокон технической конопли наблюдается умеренное увеличение его растяжимости вдоль основы, в пределах от 3% до 18%.

Относительное разрывное удлинение по направлению утка практически не меняется при различных режимах обработки.

Все исследованные режимы плазменной обработки ткани полотняного переплетения из 55% волокон технической конопли не приводят к увеличению показателя относительно разрывного удлинения.

Ткань саржевого переплетения, состоящая на 80% из конопли, также демонстрирует умеренное увеличение относительной растяжимости по основе, достигающее 17,4% после 6-минутной обработки аргоном. Обработка азотом приводит к увеличению этого показателя до 17%, однако с течением времени воздействия он постепенно снижается.

Трикотаж из 100% волокон технической конопли демонстрирует стабильное уменьшение растяжимости до 15,2%.

Для трикотажа из 55% технической конопли и 45% хлопка наблюдается увеличение показателя относительно разрывного удлинения поперёк петельных столбиков, максимально до 16,4% при обработке в среде азота в течение 3 минут. Показатели по направлению вдоль петельных столбиков не демонстрируют роста.

Трикотажный текстильный материал с содержанием спандекса показал снижение растяжимости по направлению поперек петельных столбиков максимум на 15,7%. Улучшения этого показателя не было зафиксировано ни при одном из применённых режимов обработки.

Стойкость тканей к истиранию.

В рамках настоящего исследования выборочно проверено 12 образцов контрольных и модифицированных плазмой образцов тканей, все образцы показали результаты более 13 000 циклов истирания без визуально или инструментально фиксируемых признаков разрушения нитяной структуры.

Обращаясь к литературным данным, представленным в источнике [120], о проведенных испытаниях по тесту Мартиндейла говорят о количестве циклов на истирание до момента порыва нитей до от 18 000 до 24 000 циклов для тканей из конопли. Учитывая специфику исследуемых

материалов, допустимо скорректировать стандартную методику, заменив абразивный элемент на альтернативный, что позволяет усилить дифференцирующую способность теста и повысить информативность получаемых данных. За абразив предложено взять наждачную бумагу на латексной основе с нанесением карбида кремния зернистостью по FEPA P2000, представляющую собой ультратонкую наждачную бумагу, размер зерна которой составляет 8 - 10 микрометров.

На рисунке 3.10 приведен график зависимости стойкости к истиранию текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли от времени плазменной обработки. Показатель стойкости к истиранию контрольного образца до проведения плазменной обработки составил 201 цикл. Наибольшие значения показателя стойкости к истиранию наблюдаются при проведении плазменной обработки в воздушной среде, максимальное значение, составляющее 238 циклов, наблюдается при времени обработки 9 минут. Все выбранные режимы плазменной обработки способствуют увеличению стойкости к истиранию.

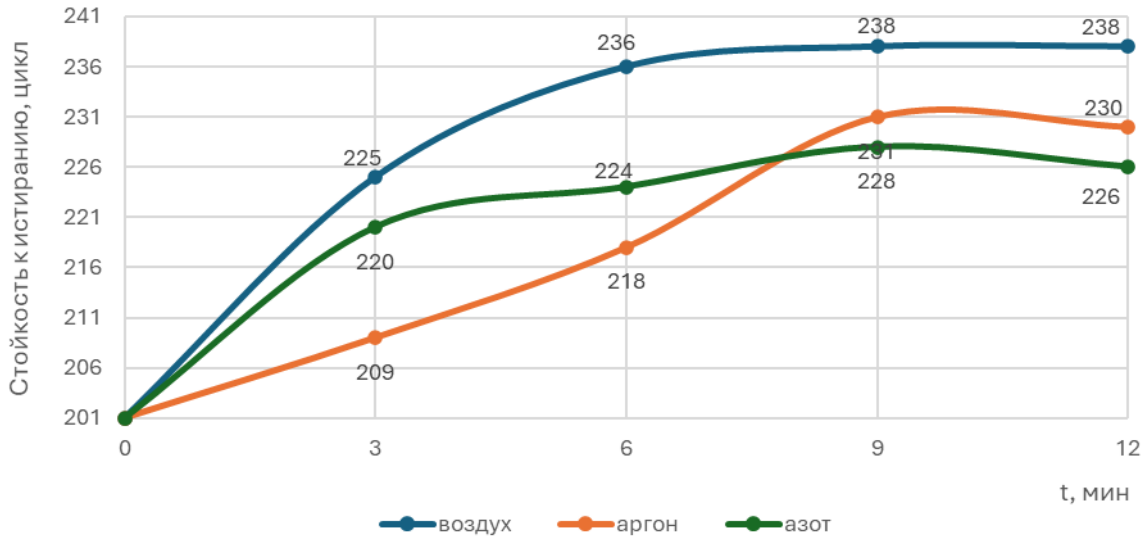


Рисунок 3.10 – Зависимость стойкости к истиранию текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; $P_к$ =20 Па; $W_р$=1,2 кВт; G=2000 см³/с

На рисунке 3.11 приведен график зависимости стойкости к истиранию текстильного материала полотняного переплетения из 55% технической конопли и 45% хлопка от времени плазменной обработки и выбора плазмообразующего газа.

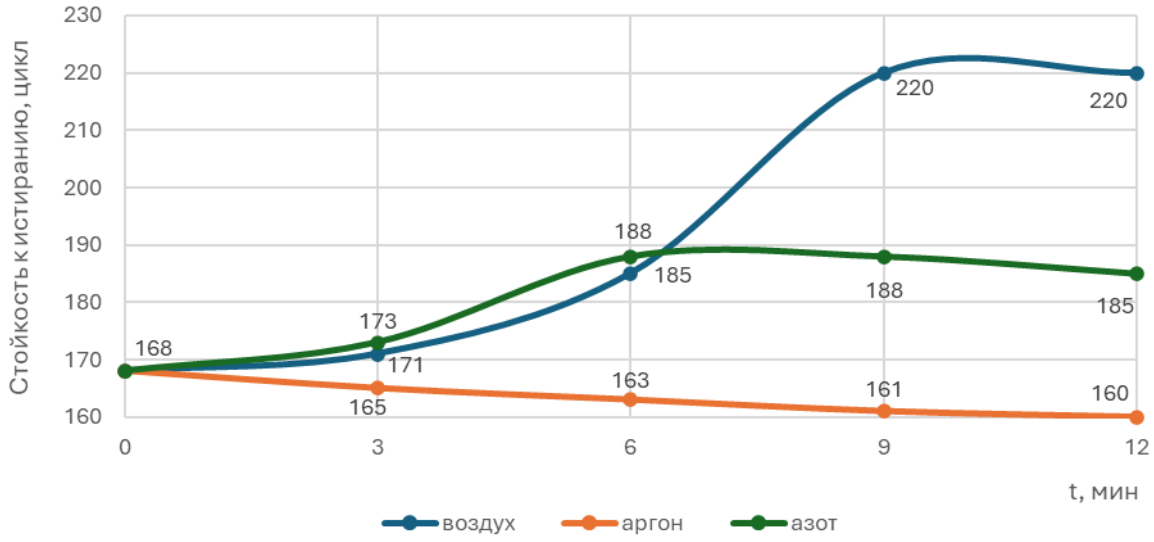


Рисунок 3.11 – Зависимость стойкости к истиранию текстильного материала полотняного переплетения из 55% технической конопли и 45% хлопка от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Как видно из рисунка 3.11, показатель стойкости к истиранию контрольного образца до проведения плазменной обработки составил 168 циклов. Наибольшие значения показателя стойкости к истиранию наблюдаются при проведении плазменной обработки в воздушной среде, максимальное значение, составляющее 220 циклов, наблюдается при времени обработки 9 минут. Обработка в среде аргона приводит к падению показателя стойкости к истиранию, начинаю со времени обработки 3 минуты.

На рисунке 3.12 приведен график зависимости стойкости к истиранию текстильного материала саржевого переплетения из 80% технической конопли и 20% хлопка от времени плазменной обработки и выбора плазмообразующего газа.

Показатель стойкости к истиранию контрольного образца до проведения плазменной обработки составил 190 циклов. Наибольшие значения показателя стойкости к истиранию наблюдаются при проведении плазменной обработки в среде азота, максимальное значение, составляющее 228 циклов, наблюдается при времени обработки 9 минут. Обработка в воздушной среде приводит к падению показателя стойкости к истиранию, начинаю со времени обработки 6 минут.

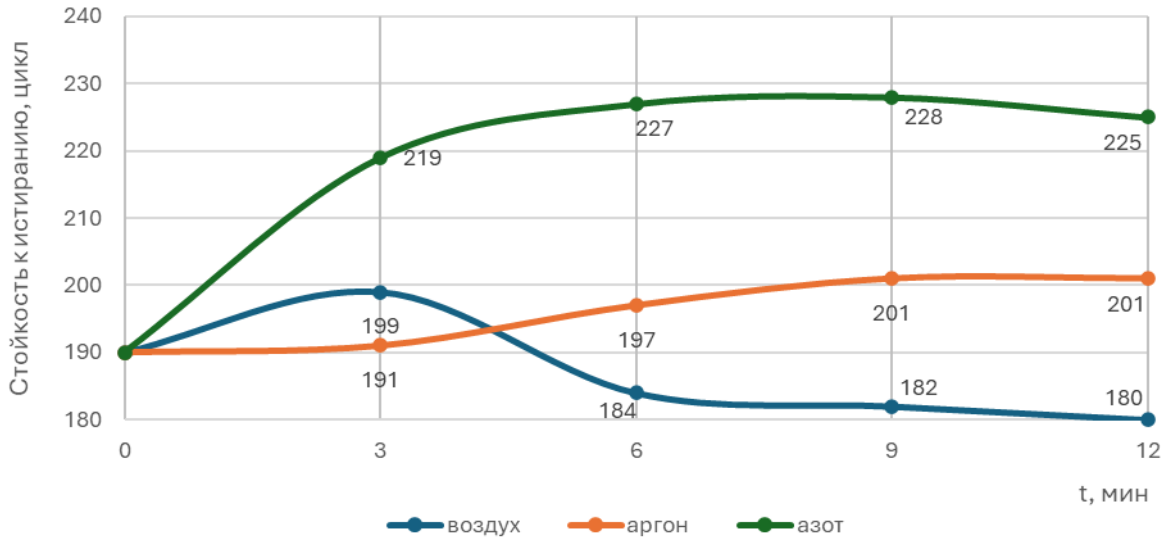


Рисунок 3.12 – Зависимость стойкости к истиранию текстильного материала саржевого переплетения из 80% технической конопли и 20% хлопка от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

На рисунке 3.13 приведен график зависимости стойкости к истиранию текстильного трикотажного материала из 100% технической конопли от времени плазменной обработки и выбора плазмообразующего газа. Показатель стойкости к истиранию контрольного образца до проведения плазменной обработки составил 216 циклов.

Все режимы плазменной обработки способствуют увеличению стойкости к истиранию при времени обработки 3, 6 и 9 минут, при увеличении времени обработки, увеличения стойкости к истиранию, не

происходит. Наибольшие значения показателя стойкости к истиранию наблюдаются при проведении плазменной обработки в среде аргона, максимальное значение, составляющее 242 цикла, наблюдается при времени обработки 9 минут. Менее эффективна обработка в азотной среде, где наибольшее значение показателя составляет 235 циклов при времени обработки 9 минут.

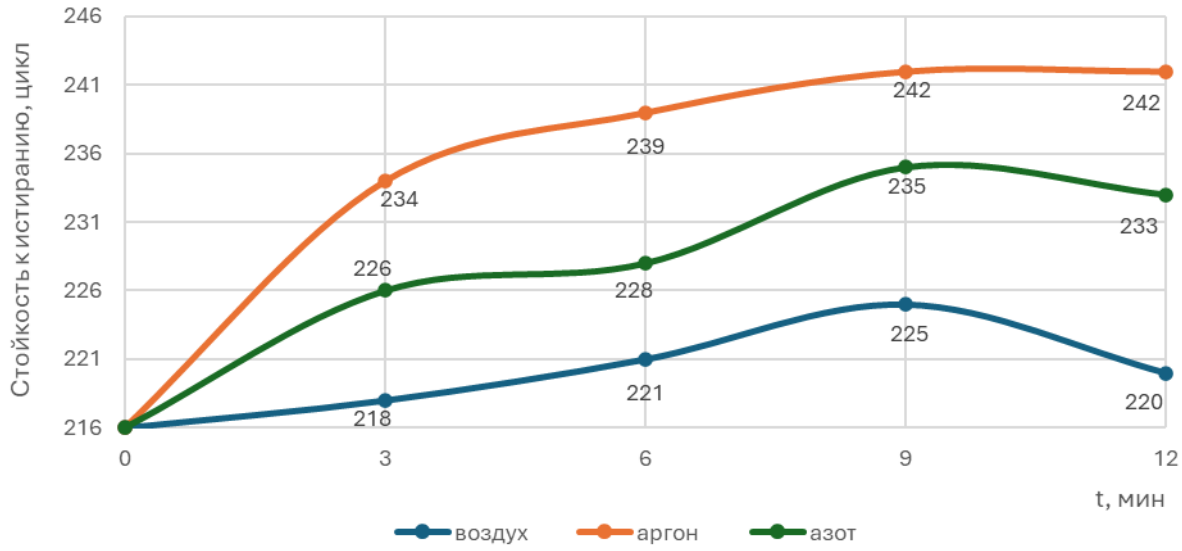


Рисунок 3.13 – Зависимость стойкости к истиранию текстильного трикотажного материала из 100% технической конопли от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

На рисунке 3.14 представлена зависимость стойкости к истиранию от времени экспозиции и выбора плазмообразующего газа для трикотажного материала 55% технической конопли и 45%хлопка.

Показатель стойкости к истиранию контрольного образца до проведения плазменной обработки составил 230 циклов. Все выбранные режимы плазменной обработки обеспечивают увеличение стойкости к истиранию до 247–248 циклов при 9 минутах обработки.

На рисунке 3.15 представлена зависимость стойкости к истиранию от времени экспозиции и выбора плазмообразующего газа для трикотажного материала 53% технической конопли, 44% хлопка и 3% спандекса.

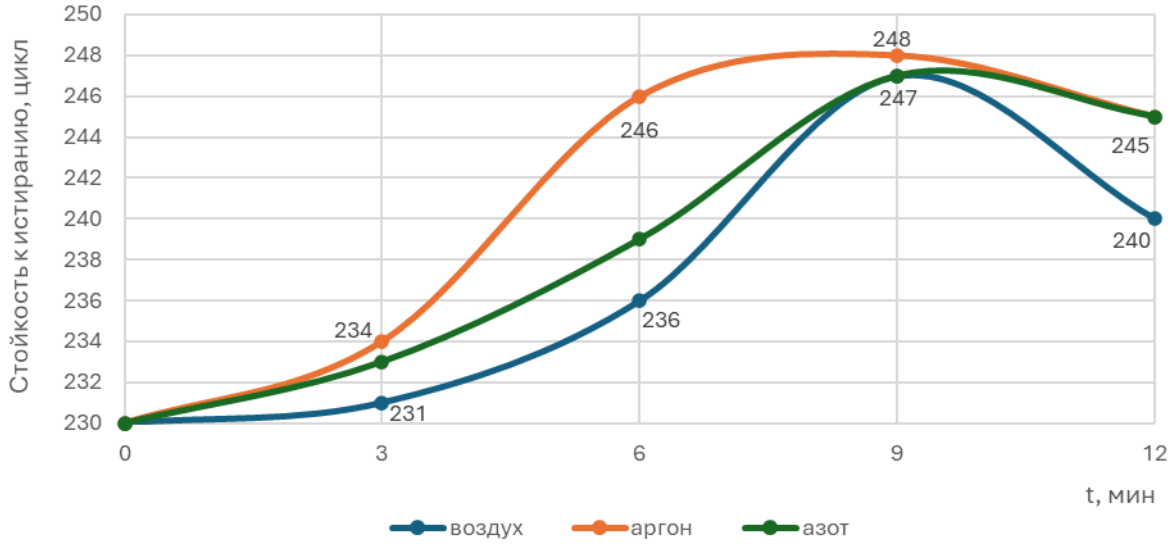


Рисунок 3.14 – Зависимость стойкости к истиранию текстильного трикотажного материала из 55% технической конопли и 45% хлопка от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

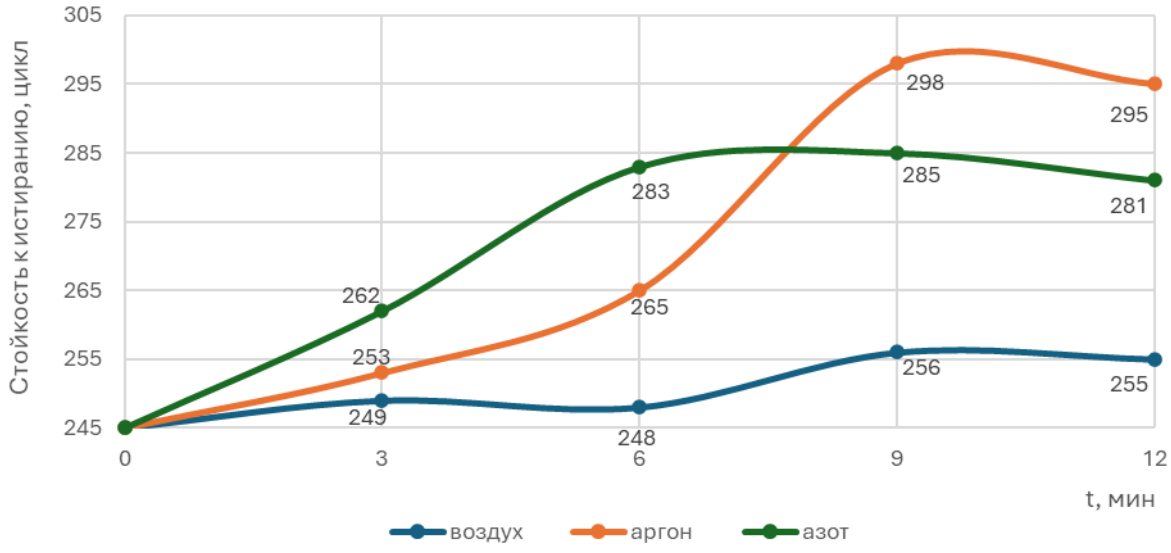


Рисунок 3.15 – Зависимость стойкости к истиранию текстильного трикотажного материала из 53% технической конопли, 44%хлопка и 3% спандекса от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Анализ результатов показал, что вид ткани, состав и условия плазменной обработки существенно влияют на показатель износостойкости. Наиболее выраженный результат, 31% увеличения числа циклов истирания зафиксирован для смесовой полотняной ткани, обработанной воздухом в течение 9 минут.

Полотняная ткань из 100% волокон технической конопли также продемонстрировала значительное улучшение (до 18%) при проведении плазменной обработки в воздушной среде. Для ткани саржевого переплетения с 55% конопли, оптимальным оказалась обработка в среде азота, обеспечившая увеличение стойкости к истиранию на 20% при 9-минутной обработке. Среди трикотажных материалов, трикотаж со спандексом показал максимальный прирост (22%) при обработке аргоном в течение 9 минут.

3.1.2 Исследование сорбционных свойств текстильных материалов из волокон технической конопли

Смачиваемость.

В таблице 3.5 представлены результаты исследования смачиваемости контрольных образцов текстильных материалов из волокон конопли и образцов, подвергнутых плазменной модификации.

Значение краевого угла смачивания $\theta = 0°$ говорит о мгновенном впитывании капли и полном смачивании материала. В случае значения угла смачивания $\theta<90°$ можно сделать вывод о гидрофильности поверхности материала. В случае $\theta>90°$ поверхность не смачивается и является гидрофобной.

Исследования показали, что контрольные образцы материалов полностью впитывали воду (угол смачивания 0°). Однако, после плазменной обработки в азотной среде, они оставались гидрофильными, по крайней мере,

в течение 3 минут. Это касается как текстильных материалов с содержанием 100% конопли, так и смесовых материалов с 55% конопли.

Таблица 3.5 – Результаты исследования смачиваемости текстильных материалов на основе конопляных волокон

Наименование плазмо-образующего газа, время экспозиции в режиме f=13,56 МГц; Рк =18-20 Па; G= 2000 см³/с	Краевой угол смачивания, ^{0}					
	Конопля 100%	Конопля 55%, хлопок 45%	Конопля 80%, хлопок 20%	Конопля 100%	Конопля 55%, хлопок 45%	Конопля 53%, хлопок 44%, спандекс 3%
	Полотняное переплетение		Саржевое переплетение	Кулирная гладь		
Контрольный образец	0	0	125,6	0	111,65	0
Воздух, 3мин	94,5	117,45	111,75	136,95	109,3	132,8
Воздух, 6мин	124,4	110,95	132,6	134,15	138,15	132,1
Воздух, 9мин	132,95	121,6	123,5	128,5	124,3	131,1
Аргон, 3 мин	223,5	120,85	120,45	107,5	123,05	137,35
Аргон, 6 мин	119,45	110,05	124,1	120,05	124,6	137,5
Аргон, 9 мин	117,55	103,95	93,7	118,75	109,25	133,45
Азот, 3 мин	0	0	130,25	114,7	0	121,45
Азот, 6 мин	111,15	115,15	0	124,1	129,1	126,25
Азот, 9 мин	93,9	115,65	126	119,45	100,35	125,4

В ходе исследования установлено, что образцы с изначально отталкивающей воду поверхностью, такие как ткань саржевого переплетения и трикотаж с преобладанием конопли (55%), становятся способными впитывать воду после плазменной обработки в среде азота. Наиболее

значительные изменения гидрофильности зафиксированы у трикотажного образца, где соотношение конопли и хлопка составляло 55% к 45%.

В ходе исследования измерялось время впитывания капли, результаты этих измерений представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Исследование времени впитывания капли воды поверхностью текстильных материалов на основе конопляных волокон

Наименование плазмо-образующего газа, время экспозиции в режиме f=13,56 МГц; Рк =18-20 Па; G= 2000 см³/с	Время впитывания, с					
	Конопля 100%	Конопля 55%, хлопок 45%	Конопля 80%, хлопок 20%	Конопля 100%	Конопля 55%, хлопок 45%	Конопля 53%, хлопок 44%, спандекс 3%
	Полотняное переплетение		Саржевое переплетение	Кулирная гладь		
Контрольный образец	0	0	25	0	6	0
Воздух 3мин	179	190	13	67	7920	183
Воздух 6мин	227	780	6	235	8280	301
Воздух 9мин	1609	23	5	417	8640	360
Аргон 3 мин	620	930	27	220	7980	375
Аргон 6 мин	757	25	8	238	8700	398
Аргон 9 мин	1346	4	172	359	10020	465
Азот 3 мин	0	0	1680	30	0	416
Азот 6 мин	540	22	0	48	535	492
Азот 9 мин	157	0	3	60	586	765

Следует отметить, что применение плазмообразующих газов воздушной и аргоновой сред для структурирования текстильных материалов из конопли привело к существенному замедлению процесса их впитывания, после обработки в среде аргона, время впитывания капли трикотажного

текстильного материала из 55% волокон технической конопли увеличилось до 10020 с.

Определение капиллярности.

Показатели капиллярности контрольных и обработанных плазмой образцов текстильных материалов из технической конопли приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Показатели капиллярности контрольных и обработанных плазмой образцов

Наименование плазмообразующего газа, время экспозиции в режиме f=13,56 МГц; Рк =18-20 Па; G= 2000 см³/с	Капиллярность, мм											
	Конопля 100%		Конопля 55%, хлопок 45%		Конопля 80%, хлопок 20%		Конопля 100%		Конопля 55%, хлопок 45%		Конопля 53%, хлопок 44%, спандекс 3%	
	Полотняное переплетение				Саржевое переплетение		Кулирная гладь					
	Основа	Уток	Основа	Уток	Основа	Уток	Вдоль петельных столбиков	Поперек петельных столбиков	Вдоль петельных столбиков	Поперек петельных столбиков	Вдоль петельных столбиков	Поперек петельных столбиков
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Контроль-ный образец	9,3	9,3	11,5	10,0	8,0	7,6	8,3	9,0	13,6	11,6	15,0	13,5
Воздух, 3мин	3,8	4,4	6,8	7,0	12,5	12,8	4,1	7,8	2,6	2,8	6,3	6,6
Воздух, 6мин	4,8	5,0	7,2	7,0	9,8	12,8	9,0	6,0	7,8	5,2	5,5	5,5
Воздух, 9мин	5,0	4,5	8,6	7,3	13,8	13,6	7,8	6,3	9	7,5	12,0	6,2
Аргон, 3 мин	5,3	5,2	5,8	4,6	12,0	13,3	6,4	8,1	3	3,5	8,5	6,3
Аргон, 6 мин	4,8	5,3	6,8	8,1	12,3	12,5	5,8	6,6	5,3	5,6	8,4	10,0

Окончание таблицы 3.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Аргон, 9 мин	5,0	4,8	6,8	5,3	8,0	10,0	6,2	4,2	2,0	3,5	8,9	10,1
Азот, 3 мин	10,3	11,0	8,5	6,8	8,0	8,3	5,8	4,3	13,0	12,6	3,6	7,9
Азот 6 мин	4,1	3,8	10,5	7,2	7,2	9,8	4,2	3,2	6,0	3,6	7,7	7,9
Азот 9 мин	4,3	3,6	10,87	7,50	7,7	10,1	8,6	8,0	7,2	4,1	8,2	8,0

Как видно из таблицы 3.7, наибольшей исходной капиллярностью обладают образцы с содержанием хлопка, высокая исходная капиллярность образца со спандексом может быть обусловлена структурой трикотажного полотна. Плазменная обработка в большинстве режимов не приводит к значительному увеличению капиллярности. При этом максимальное повышение капиллярности в размере 72% наблюдается у текстильных материалов из технической конопли саржевого переплетения после обработки воздухом в течение 9 минут.

Определение гигроскопичности.

Результаты исследований гигроскопичности контрольных образцов и образцов, подвергнутых плазменному структурированию, приведены на рисунках 3.16–3.21.

На рисунке 3.16 приведен график зависимости гигроскопичности текстильного материала полотняного переплетения из 55% технической конопли и 45% хлопка от времени плазменной обработки и выбора плазмообразующего газа.

Наибольший пророст гигроскопичности наблюдаются при проведении плазменной обработки в среде аргона, максимальное значение, составляющее 18,91%, наблюдается при времени обработки 9 минут. Обработка в среде азота приводит к менее выраженному увеличению показателя гигроскопичности.

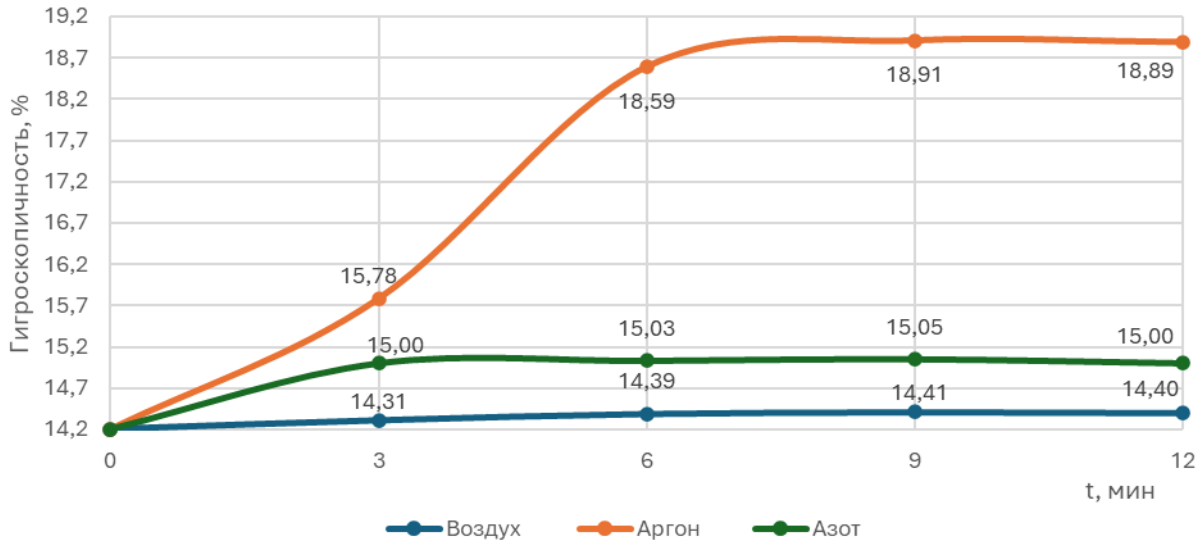


Рисунок 3.16 – Зависимость гигроскопичности текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; $Р_к$ =20 Па; $W_р$=1,2 кВт; G=2000 см³/с

На рисунке 3.17 приведен график зависимости гигроскопичности текстильного материала полотняного переплетения из 55% технической конопли и 45% хлопка от времени плазменной обработки и выбора плазмообразующего газа.

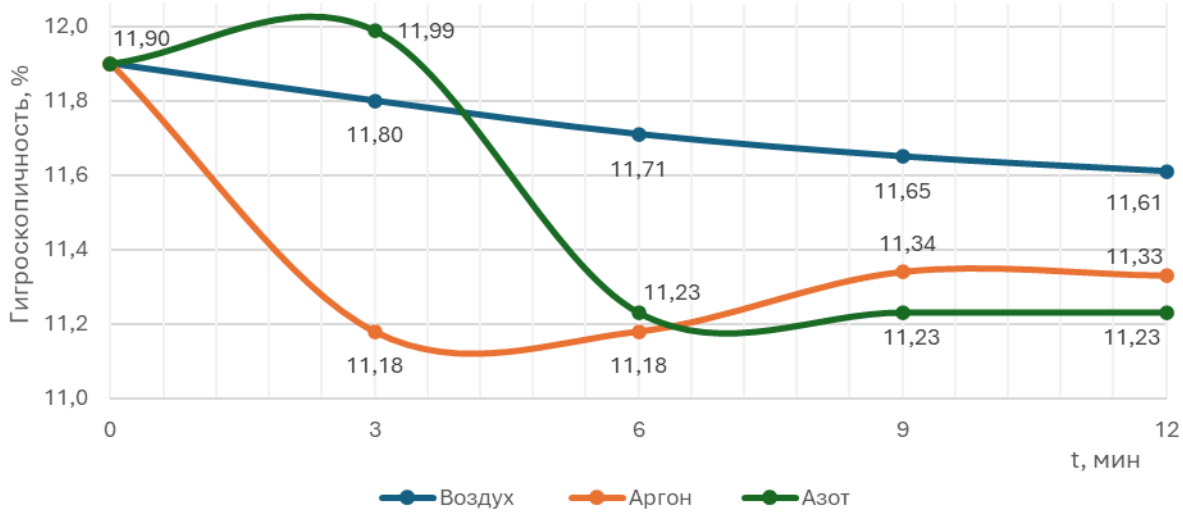


Рисунок 3.17 – Зависимость гигроскопичности текстильного материала полотняного переплетения из 55% технической конопли и 45% хлопка от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Как видно из рисунка 3.17, плазменная обработка в среде азота вызывает увеличение гигроскопичности при 3 минутах обработки, далее прогресс носит отрицательный характер. Обработка в среде воздуха и аргона не способствует увеличению показателя гигроскопичности.

На рисунке 3.18 приведен график зависимости гигроскопичности текстильного материала саржевого переплетения из 80% технической конопли и 20% хлопка от времени плазменной обработки и выбора плазмообразующего газа.

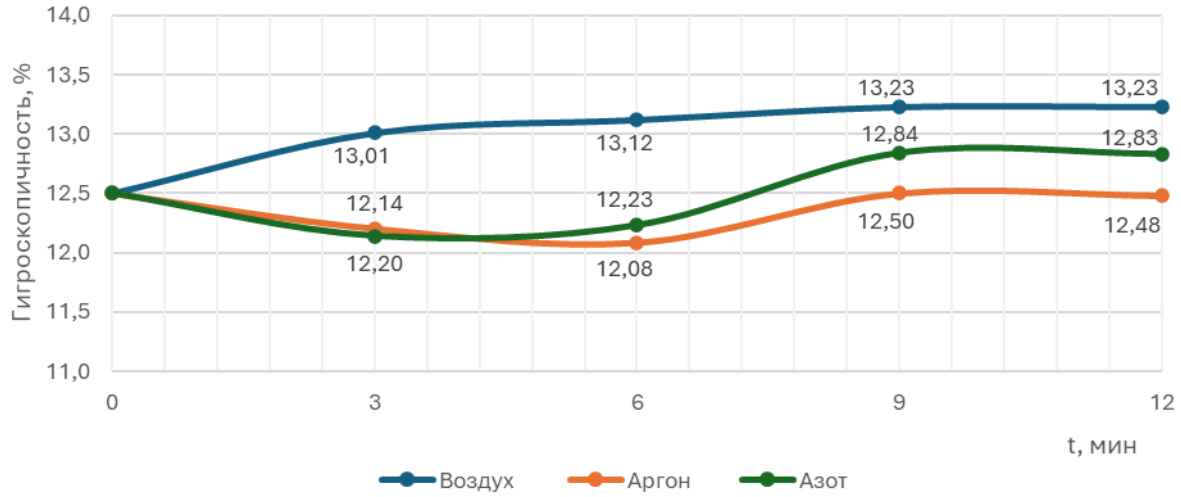


Рисунок 3.18 – Зависимость гигроскопичности текстильного материала саржевого переплетения из 80% технической конопли и 20% хлопка от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Как видно из рисунка 3.18, плазменная обработка в воздушной среде приводит к увеличению гигроскопичности при 9 минутах обработки до 13,23%. В средах аргона и азота при 3- и 6- минутная обработка не способствует увеличению показателя гигроскопичности, но при времени обработки 9 минут гигроскопичность возвращается к исходным значениям в случае аргона и достигает 12,84% при использовании азота.

На рисунке 3.19 приведен график зависимости гигроскопичности текстильного трикотажного материала из 100% технической конопли от времени плазменной обработки и выбора плазмообразующего газа. Увеличение гигроскопичности наблюдается при обработке в средах азота и воздуха, прирост равномерные при увеличении времени обработки от 3 до 6 минут. Обработка в среде аргона приводит к незначительному снижению показателя гигроскопичности.

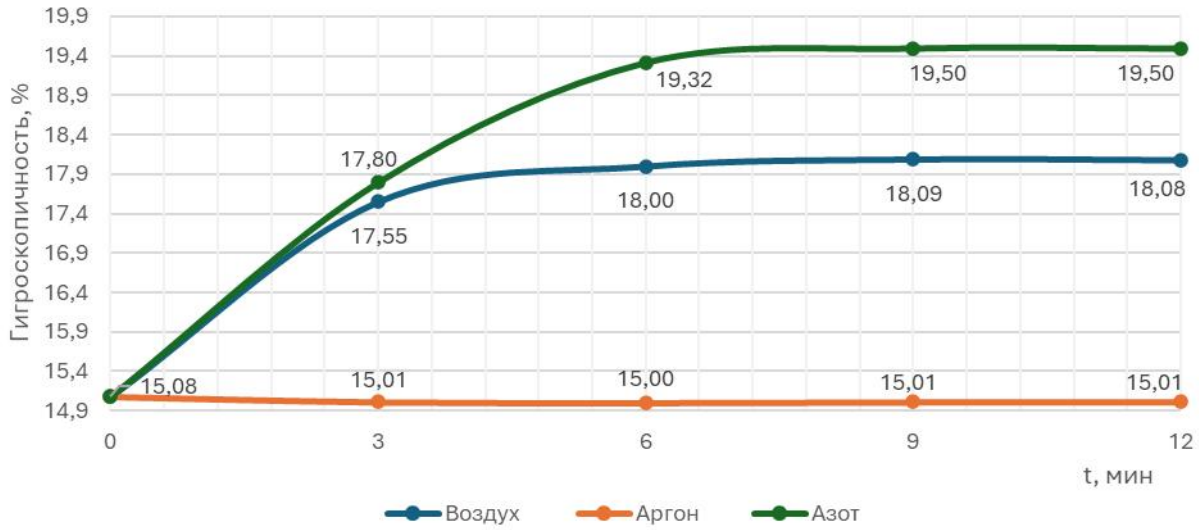


Рисунок 3.19 – Зависимость гигроскопичности текстильного трикотажного материала из 100% технической конопли от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

На рисунке 3.20 приведен график зависимости гигроскопичности текстильного трикотажного материала из 55% технической конопли и 45%хлопка от времени плазменной обработки и выбора плазмообразующего газа. Увеличение гигроскопичности наблюдается при обработке во всех плазмообразующих газах, но обработка среде аргона и азота носит умеренный характер. Обработка в воздушной среде демонстрирует явно выраженное увеличение гигроскопичности, до 18,35% при времени обработки 9 минут.

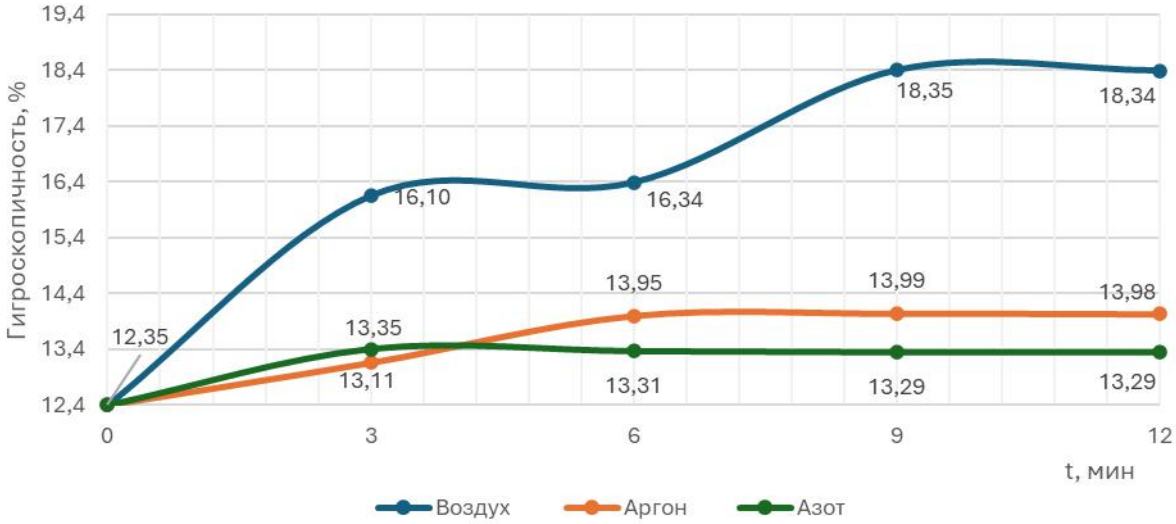


Рисунок 3.20 – Зависимость гигроскопичности текстильного трикотажного материала из 55% технической конопли и 45% хлопка от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

На рисунке 3.21 приведен график зависимости гигроскопичности трикотажного материала со спандексом от времени плазменной обработки и выбора плазмообразующего газа.



Рисунок 3.21 – Зависимость гигроскопичности текстильного трикотажного материала из 53% технической конопли, 44% хлопка и 3% спандекса от времени плазменной обработки, в режиме: f=13,56 МГц; Рк =20 Па; Wp=1,2 кВт; G=2000 см³/с

Как видно из рисунка 3.21, увеличение гигроскопичности наблюдается при обработке среде аргона и азота, максимальное значение составляет 19,36% при обработке в азотной среде в течение 9 минут. Обработка в воздушной среде демонстрирует не приводит к увеличению гигроскопичности текстильного материала.

Для тканей из 100% технической конопли оптимальные результаты даёт аргоновая плазма: ткань полотняного переплетения показывает прирост 33% при обработке аргоном в течение девяти минут, а трикотаж – прирост 29% при обработке азотом в течение девяти минут. Таким образом, для натуральных тканей без синтетических добавок наиболее эффективны длительные режимы обработки инертными газами.

Наименее устойчивым к плазменной обработке оказался образец саржевого переплетения из волокон технической конопли 80% и хлопка 20%, где лучший результат — обработка воздухом девять минут — даёт лишь 5,5% прироста. Ткани полотняного переплетения из смеси технической конопли 55% и хлопка 45% также показывает незначительное улучшение – всего 0,75% при обработке азотом 3 минуты. Это свидетельствует о том, что переплетение и состав ткани существенно влияют на эффективность плазменной модификации поверхности.

В целом можно заключить, что плазменная обработка является эффективным инструментом повышения гигроскопичности конопляных тканей, причём наибольший эффект достигается на трикотажных структурах с добавлением синтетических волокон при длительной обработке азотной плазмой.

Дополнительное исследование электростатического поля в изделиях из конопли направлено на решение двух ключевых задач: повышение комфорта потребителя и обеспечение безопасности в специфических условиях эксплуатации.

Значения показателей напряженности электростатического поля для контрольных и обработанных плазмой образцов приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Результаты исследований показателей напряженности электростатического поля для контрольных и обработанных плазмой образцов с содержанием волокон технической конопли

Плазмообразующий газ, время экспозиции в режиме f=13,56 МГц; Рк =18-20 Па; G= 2000 см³/с	Напряженность электростатического поля, кВ/м					
	Конопля 100%	Конопля 55%, хлопок 45%	Конопля 80%, хлопок 20%	Конопля 100%	Конопля 55%, хлопок 45%	Конопля 53%, хлопок 44%, спандекс 3%
	Полотняное переплетение		Саржевое переплетение	Кулирная гладь		
Контрольный образец	0,53	0,03	0,02	0,03	0,03	0,02
Воздух, 3мин	0,85	0,24	0,02	0,10	0,01	0,05
Воздух, 6мин	0,81	0,03	0,01	0,09	0,02	0,07
Воздух, 9мин	0,30	0,47	0,37	0,33	0,02	0,61
Аргон, 3 мин	0,07	0,01	0,24	0,03	0,03	0,03
Аргон, 6 мин	0,01	0,18	0,02	0,05	0,07	0,02
Аргон, 9 мин	0,02	0,05	0,07	0,08	0,04	0,04
Азот, 3 мин	0,06	0,03	0,03	0,02	0,03	0,02
Азот, 6 мин	0,28	0,01	0,15	0,04	0,01	0,01
Азот, 9 мин	0,25	0,09	0,13	0,02	0,02	0,04

Результаты экспериментального определения напряженности электростатического поля контрольных и образцов после плазменной обработки свидетельствуют о том, что существенных изменений не зафиксировано. Все показатели находятся в пределах допустимых для текстильных изделий значений, не превышая 15 кВ/м

3.1.3 Исследование устойчивости показателей сорбционных и механических текстильных материалов из волокон технической конопли после плазменной обработки

Для проверки устойчивости улучшенных показателей выбраны экспериментальные образцы с оптимальными режимами прироста механических и сорбционных свойств. Проверка устойчивости свойств проведена после 5 стирок по условиям ГОСТ ISO 6330–2014.

Результаты исследований устойчивости показателей после 5 стирок, представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты исследований устойчивости показателей после стирок образцов после плазменной обработки.

Наименование образца	Плазмообразующий газ, время обработки	Гигроскопичность, %		Снижение гигроскопичности, %	Разрывная нагрузка, Н (по основе/утку, вдоль петельных столбиков/ поперек петельных		Снижение разрывной нагрузки, %
		После плазменной обработки	После 5 стирок		После плазменной обработки	После 5 стирок	
Конопля 100%, полотняное переплетение	Азот, 3 мин	15,0	15,0	-	702,7/ 676,1	702,3/ 674,2	0,1/ 0,3
Конопля 55%, хлопок 45%, полотняное переплетение	Азот, 3мин	12,0	11,8	1,7	502,7/ 295,4	500,4/ 292,3	0,5/ 1,0
Конопля 80%, хлопок 20%, саржевое переплетение	Воздух, 9мин	13,2	13,2	1,7	389,7/ 240,4	382,9/ 240,0	1,7/ -
Конопля 100%, кулирная гладь	Аргон, 9мин	15,0	15,0	-	244,5/ 125,1	244,0/ 124,7	0,2/0,4
Конопля 55%, хлопок 45%, кулирная гладь	Воздух, 9мин	18,4	18,3	0,5	196,6/ 90,5	190,1/ 90,5	3,3/ -
Конопля 53%, хлопок 44%, спандекс 3%, кулирная гладь	Аргон, 9мин	17,1	17,0	0,5	243,1/ 147,1	241,1/ 144,0	0,8/2,1

Результаты проверки плазмомодифицированных тканей на устойчивость характеристик, улучшенных плазменной обработкой, говорят о максимальном снижении свойств в пределах 3%. Проведенные исследования показали, что текстильные материалы из технической конопли волокна конопли обладают достаточной устойчивостью показателей, приданных плазменной обработкой, к стиркам.

В рамках исследований влияния низкотемпературной обработки на свойства текстильных материалов из технической конопли проведено прототипирование процесса плазменной обработки ткани из технической конопли с целью оценки возможности управления механическими и сорбционными свойствами материалов.

Для проведения экспериментальных исследований использована полотняного ткань индийского производства, изготовленная из 100% конопли с поверхностной плотность 118 г/м^2.

В ходе исследований установлено, что обработка ткани из волокон технической конопли в воздушной среде в режиме f=13,56 МГц; Рк=20-22 Па; τ=2м/мин; G=0,04г/с, Wp-3,0 кВт приводит к повышению гигроскопичности на 15,1%.

Исследования показали значительное улучшение механических свойств материала: разрывная нагрузка по основе увеличилась на 36,9%, по утку – на 26,4%. Рост относительного разрывного удлинения также по основе на 24% и по утку - до 9,6% по сравнению с контрольными образцами. Жесткость при изгибе снизилась на 13,0% по основе и на 10,8% по утку, в среднем 11,9% относительно контрольных образцов. Плазменная обработка привела к повышению износостойкости текстильных материалов из технической конопли на 21,7%.

Экспериментальные данные подтверждают, что плазменная обработка является эффективным инструментом для направленного изменения жесткости ткани из технической конопли. Предложенный режим обработки в среде воздушной плазмы обеспечивает максимальное снижение жесткости

при изгибе ткани из волокон технической конопли – на 13,0% по основе и на 10,8% по утку. Превышение этой мощности более 4,5 кВт приводит к нежелательному увеличению жесткости.

Проведенные исследования подтверждают возможность целенаправленного изменения механических и сорбционных свойств текстильных материалов из волокон технической конопли путем регулирования параметров плазменной обработки.

3.2 Исследование структуры и морфологии текстильных материалов из технической конопли

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 эксплуатационных и функциональных свойств.

Анализ структуры и степени кристалличности целлюлозной составляющей волокон выполнялся методом рентгеноструктурного фазового анализа РФА. Трансформация функционального состава поверхности и динамика межмолекулярных взаимодействий фиксировались с помощью спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения в инфракрасной области с преобразованием Фурье (ИК-Фурье). Оценка морфологии поверхностного слоя модифицированных волокон осуществлялась посредством лазерной конфокальной сканирующей микроскопии и электронной сканирующей микроскопии. Рентгенофазовый анализ исследуемых образцов проведен на дифрактометре рентгеновском Rigaku SmartLab в Аналитическом исследовательском центре ФГБОУ ВО «КНИТУ».

Перечень исследуемых образцов, режимы их плазменной обработки, а также базовые идентификационные параметры упорядоченной структуры целлюлозы приведены в таблице 3.10

Таблица 3.10 – Сводная таблица исследуемых образцов с указанием параметров упорядоченной структуры целлюлозы

№ образца	Тип образца и состав	Вид плазмообразующего газа, время обработки	Упорядоченность, %	Полуширина на половине высоты, ^{0}	Размер зоны упорядоченности, Å	Изменение эксплуатационных показателей после плазменной обработки
1	2	3	4	5	6	7
1	Полотняное переплетение, 100% конопля	Без обработки	39,00	1,62	52,4	–
		Азот, 3 мин	60,00	1,58	53,6	Капиллярность, +18,3%
3	Саржевое переплетение, Конопля 80%, 20% хлопок	Без обработки	30,00	1,31	65,0	–
		Воздух, 9 мин	50,00	1,24	68,5	Капиллярность, +72,5%
4	Трикотаж, 100% конопля	Без обработки	41,00	1,59	53,3	–
		Аргон, 9 мин	75,00	1,52	55,8	Разрывная нагрузка, +23,1%

Продолжение таблицы 3.10

1	2	3	4	5	6	7
5	Трикотаж, 55% конопля, 45% хлопок	Без обработки	30,00	1,32	64,0	–
		Воздух, 9 мин	46,00	1,31	64,5	Гигроскопичность, +48,6%
6	Трикотаж, 53% конопля, 44% хлопок, 3% спандекс	Без обработки	35,00	1,35	62,6	–
		Аргон, 9 мин	69,00	1,30	65,3	Разрывная нагрузка, +30,0%

Дифрактограммы всех образцов (приложение А) характеризуются выраженными дифракционными рефлексами в угловых диапазонах $2\theta = 14{,}8^0 – 16{,}5^0$, соответствующих наложению плоскостей $(1\bar{1}0)$ и (110) и интенсивным пиком при $2\theta = 22{,}6^0 - 22{,}9^0$, советующим плоскости (200), что подтверждает сохранение структуры целлюлозы I. Плазменная модификация не вызывает фазовых переходов в полиморфные модификации целлюлозы II или аморфизацию исходной структуры.

При проведении рентгенографии исследована степень упорядоченности целлюлозы, динамика полуширины на половине высоты (ШППВ) и размеров зон упорядоченности целлюлозы.

По всем парам образцов «контроль – плазмообработанный» фиксируется снижение интегральной полуширины дифракционного максимума и повышение степени упорядоченности целлюлозы.

В таблице 3.11 представлены данные о степени изменения параметров упорядоченности структуры целлюлозы относительно необработанных образцов текстильных материалов из технической конопли.

Таблица 3.11 – Изменение параметров упорядоченности структуры целлюлозы относительно необработанных образцов текстильных материалов из технической конопли.

Тип образца и состав	Вид плазмообразующего газа, время обработки	Упорядоченность, %	Увеличение относительно необработанного текстильного образца, %	Полуширина на половине высоты, ^{0}	Увеличение относительно необработанного текстильного образца, %	Размер зоны упорядоченности, Å	Увеличение относительно необработанного текстильного образца, %
Полотняное переплетение, 100% конопля	Азот, 3 мин.	60,00	53,85	1,58	-2,47	53,6	2,29
Саржевое переплетение, Конопля 80%, 20% хлопок	Воздух, 9 мин	50,00	66,67	1,24	-5,34	68,5	5,38
Трикотаж, 100% конопля	Аргон, 9 мин	75,00	82,93	1,52	-4,40	55,8	4,69
Трикотаж, 55% конопля, 45% хлопок	Воздух, 9 мин	46,00	53,33	1,31	-0,76	64,5	0,78
Трикотаж, 53% конопля, 44% хлопок, 3% спандекс	Аргон, 9 мин	69,00	97,14	1,30	-2,47	65,3	4,31

Для идентификации изменений химического строения и оценки функционального состава поверхности модифицированных волокон был применен метод инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье (ИК-Фурье). По результатам проведения инфракрасной спектрометрии

(Приложение Б) составлена таблица 3.12 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 (3.1):

$$\Delta T = T_{нтп} - T_{ко}, \quad (3.1)$$

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

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

Таблица 3.12 – 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

ИК-спектры текстильного материала из технической конопли (образец 1, полотняное переплетение, 100% волокна технической конопли) после модификации в плазме в среде азота в течение 3 минут, представлены в приложении Б на рисунке 1.

В ИК-Фурье спектрах образца (100% техническая конопля), подвергнутого 3-минутной обработке в плазме азота, зарегистрировано выраженное увеличение коэффициента пропускания в волновой области 3670 $см^{-1}$ (уменьшение интенсивности полосы поглощения).

Полоса в диапазоне 3650–3680 $см^{-1}$ относится к характеристической зоне валентных колебаний изолированных, не участвующих в образовании меж- и внутримолекулярных водородных связей гидроксильных групп О–Н, а также к поверхностно-адсорбированной несвязанной влаге.

Отсутствие сопутствующего прироста полос поглощения карбонильных групп С=О в диапазоне 1700–1740 $см^{-1}$ (альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты) исключает окислительный путь деструкции полисахаридной основы. Снижение концентрации свободных ОН-групп в условиях азотной плазмы может быть обусловлено следующими факторами. Бомбардировка поверхности активными частицами плазмы приводит к локальному нагреву микрофибрилл. Это вызывает десорбцию капиллярной и слабосвязанной влаги. Наблюдаемое падение оптической плотности в полосе 3670 $см^{-1}$ у образца после плазменной обработки подтверждает модифицирующее действие азотной плазмы, выраженное в десорбции поверхностной влаги при сохранении стабильности основной макромолекулярной цепи.

В модифицированном плазмой образце нет признаков окислительной деструкции. Полоса 1735 $см^{-1}$, определяющая карбонильный индекс, снизилась по поглощению, рост карбонилов, который был бы главным маркером окисления и деструкции целлюлозы, отсутствует.

Кристаллическая фаза не разрушена**,** полоса 1425 $см^{-1}$ практически не изменилась, кристаллический каркас целлюлозы сохранён.

ИК-спектры текстильного материала из технического конопляного волокна (образец 3, саржевое переплетение, 80% технической конопли и 20% хлопка) после модификации в плазме в воздушной среде в течение 9 минут, представлены в приложении Б на рисунке 2.

Спектральный профиль плазмомодифицированного образца демонстрирует систематическое смещение кривой пропускания в диапазоне 1650–2500 $см^{-1}$ в область меньших значений на 6-8% относительно контроля. Данное равномерное падение пропускания отражает рост диффузного рассеяния света из-за развития физической шероховатости и микрофибрилляции поверхности волокна.

На фоне топографических изменений фиксируются признаки направленной поверхностной функционализации полимера. В области 1735 $см^{-1}$, $\Delta = -7{,}1$ % регистрируется прирост карбонильного поглощения. Это указывает на протекание окисления поверхностных звеньев макромолекул под действием активных частиц разряда с накоплением полярных карбонильных и карбоксильных групп. Возникающая поверхностная модификация носит умеренный характер и обеспечивает прирост гидрофильности текстильного полотна. При этом сохранение интенсивности и четкого контура характеристической полосы гликозидного мостика при 1160 $см^{-1}$, подтверждает отсутствие деполимеризации и расщепления основного полисахаридного скелета. Таким образом, окислительно-деструктивные процессы протекают поверхностном слое волокон, не нарушая целостность объемной надмолекулярной структуры.

ИК- спектры текстильного материала из технического конопляного волокна (образец 4, трикотаж, из 100% волокон технической конопли) после модификации в плазме в среде аргона в течение 9 минут, представлены в приложении Б на рисунке 3.

В ИК-спектрах образца после проведения плазменной обработки (трикотажного материала из 100% волокон технической конопли) не зарегистрировано изменение полосы гликозидного мостика 1160 $см^{-1}$,

глюкозидный скелет целлюлозы после проведения плазменной модификации остаётся неповреждённым.

Одновременно полосы, связанные с аморфной неупорядоченной зоной 895 и 950 $см^{-1}$, показывают рост пропускания, то есть сигнал от разупорядоченной фазы ослабевает.

ИК-спектры текстильного материала из волокон технической конопли (образец 5, трикотаж, 55% технической конопли и 45% хлопка) после плазменной модификации в воздушной среде в течение 9 минут, представлены в приложении Б на рисунке 4.

После обработки плазмой в воздушной среде в ИК-спектре образца наблюдается равномерное, широкое снижение пропускания практически по всему спектру. Пик 2330–2350 $см^{-1}$ не рассматривается как содержательный, это интерференция атмосферного CO_2 в ИК-тракте.

Синхронное, равномерное снижение пропускания сразу во всех зонах спектра свидетельствует об изменении оптических свойств поверхности волокна, росте общего рассеяния или поглощения света на неровной, текстурированной поверхности, а не появлении новых химических групп.

Рост гигроскопичности при одновременном появлении гидрофобности может объясняется следующим эффектом воздушной плазмы: внутри волокна происходит травление и раскрытие дополнительных пор, что увеличивает поглощение водяного пара, а на самой внешней поверхности одновременно образуется поверхность с выраженным микрорельефом, которая по механизму Касси–Бакстера отталкивает жидкую воду. Широкий, равномерный характер спектральных изменений является инструментальным подтверждением поверхностно, а не объёмно-химического происхождения эффекта.

ИК-спектры текстильного материала из волокон технической конопли (образец 6, трикотаж, 53% технической конопли, 44% хлопка, 3% спандекса) после плазменной модификации в среде аргона в течение 9 минут представлены в приложении Б на рисунке 5.

Сопоставление ИК-спектров образцов контрольного образца и образца, обработанного плазмой в среде аргона в течение 9 минут, свидетельствует об отсутствии значимых объемных химических трансформаций целлюлозной матрицы. Кривые пропускания демонстрируют высокую степень подобия: в области 1650–2500 $см^{-1}$ расхождение не превышает 1–2%, в области 1000–1050 $см^{-1}$ наблюдается сходимость к нулевому пропусканию, подтверждающая сохранность полисахаридного скелета. Отсутствует рост карбонильной полосы в области 1715–1740 $см^{-1}$, не регистрируется уменьшение интенсивности полосы 895 $см^{-1}$, характеризующей гликозидные связи, а ширина и положение O–H полосы валентных колебаний 3300–3400 $см^{-1}$ остаются без изменений. Локальный пик в области 1500–1550 $см^{-1}$, достигающий 94% пропускания на обработанном образце против 86,5% на контроле (Δ = –7,7%), является единственным заметным спектральным отличием, что указывает на избирательную модификацию поверхностного слоя, но не затрагивает объемную кристаллическую или молекулярную структуру полимера.

Среднее интегральное изменение пропускания по всему спектральному диапазону составляет $\Delta T\%$ = –1,75, что находится в пределах инструментального шума и дополнительно подтверждает отсутствие глубокой химической деструкции.

Проведен анализ микрофотографий, полученных методом лазерной конфокальной сканирующей микроскопии (приложение В). В приложении В на рисунке 1 представлены микрофотографии для контрольного образца полотняного текстильного материала из 100% технической конопли. Как видно из микрофотографий, поверхность образца представляет собой плотно уложенные, слабоволнистые волокна с гладкой, местами глянцевой кутикулой. Продольная исчерченность неглубокая.

В приложении В на рисунке 2 представлены микрофотографии поверхности образца полотняного текстильного материала из 100% технической конопли после 3 минут модификации в плазме в среде азота.

Как видно из микрофотографий, поверхность волокон образца ткани полотняного переплетения из 100% технической конопли после плазменной обработки более матовая и рельефная, продольные борозды выражены резче, появляется мелкая чешуйчатая шероховатость, особенно заметная на лазерном режиме съемки.

В приложении В на рисунке 3 представлены микрофотографии поверхности контрольного образца саржевого текстильного материала из 80% технической конопли и 20% хлопка. Поверхность образца глянцевая, волокна гладкие, кутикула сохранна.

В приложении В на рисунке 4 представлены микрофотографии поверхности образца саржевого текстильного материала из 80% технической конопли и 20% хлопка после проведения плазменной обработки. Наблюдается выраженное разрыхление поверхностного слоя, множественные мелкие сколы и микротрещины кутикулы, поперечная исчерченность волокон. Поверхность становится более матовой. Развитие микрорельефа на поверхности образца после плазменной обработки способствует повышению гигроскопичности текстильного материала, выявленному экспериментально.

В приложении В на рисунке 5 представлены микрофотографии поверхности контрольного образца трикотажа из 100% технической конопли. Как видно из микрофотографий, волокна на поверхности текстильного материала гладкие, глянцевые, без повреждений.

В приложении В на рисунке 6 представлена поверхности трикотажного материала из 100% технической конопли после проведения плазменной обработки. Поверхность матовая, имеется расщепление волокон, наблюдается как продольная, так и поперечная исчерченность.

В приложении В на рисунке 7 представлены микрофотографии поверхности контрольного образца трикотажа из 55% технической конопли и 45% хлопка. Поверхность образца гладкая, глянцевая.

В приложении В на рисунке 8 представлены микрофотографии поверхности трикотажа из 55% технической конопли и 45% хлопка после

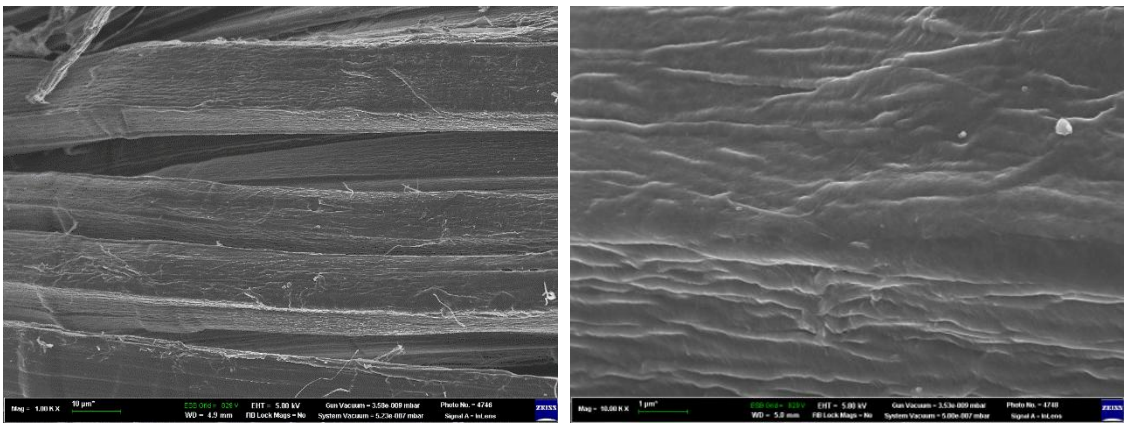
плазменной обработки в воздушной среде в течение 9 минут. На поверхности обработанного плазмой образца имеются микротрещины, наблюдается расщепление волокон, значительная поперечная исчерченность волокон, поверхность становится более матовой.

В приложении В на рисунке 9 представлены микрофотографии поверхности контрольного образца трикотажа из 53% технической конопли, 44% хлопка и 3 % спандекса. Поверхность гладкая, без выраженных трещин, глянцевая.

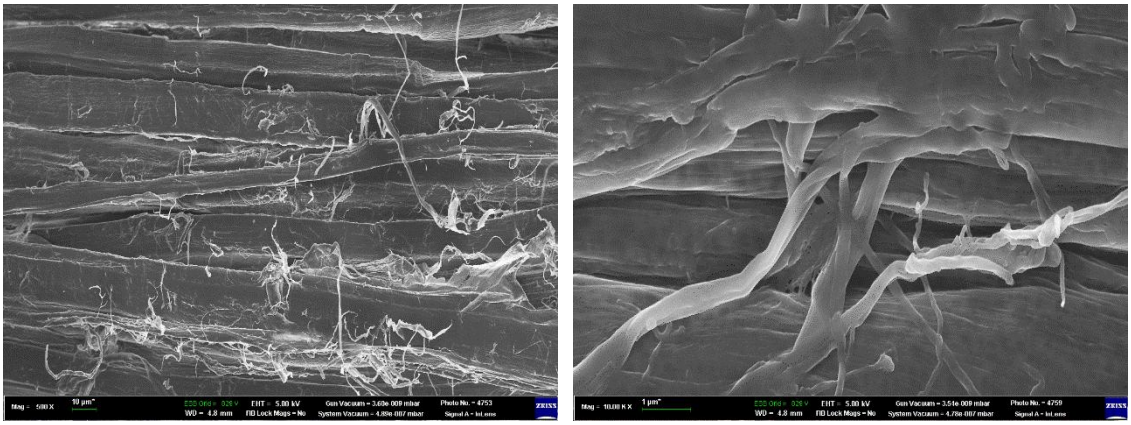
В приложении В на рисунке 10 представлены микрофотографии поверхности трикотажного образца после плазменной обработки в среде аргона в течение 9 минут. На поверхности образца имеются продольные микротрещины и расщепление поверхностного слоя.

Проведен анализ микрофотографий текстильных материалов полотняного переплетения и трикотажа, состоящих из 100% технической конопли, полученных методом сканирующей электронной микроскопии.

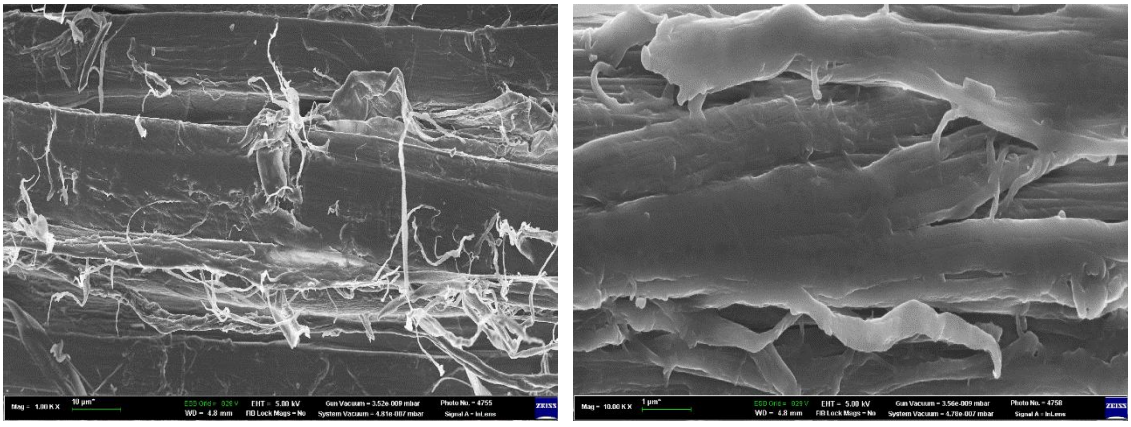
Проведен анализ микрофотографий текстильного материала из волокон технической конопли (образец 1, полотняное переплетение, 100% техническая конопля). На рисунке 3.22 представлены результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли до проведения плазменной обработки, после проведения плазменной обработки в среде азота в течение 3 минут и 9 минут. На микрофотографии с выбранным увеличением ×1000 идентифицированы элементарные волокна технической конопли, средний диаметр волокон составляет 21 мкм. На микрофотографиях с увеличением ×10000 наблюдаемая морфология поверхности элементарных волокон неоднородная, но впадины располагаются вдоль волокна. Элементарные волокна имеют продольную ориентацию, укладка волокон плотная. На микрофотографиях поверхности текстильного материала после проведения плазменной обработки в течение 3 и 9 минут наблюдается значительное разволокнение элементарных волокон.



а



б

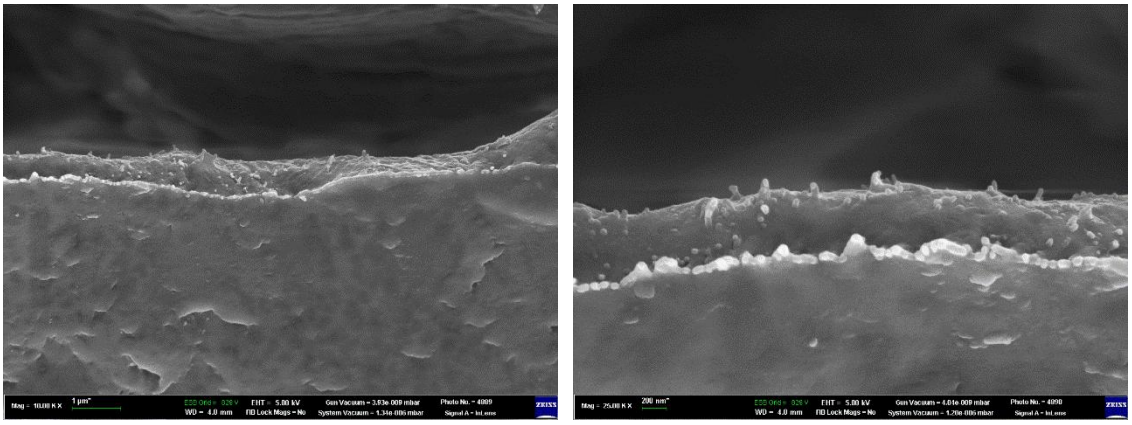


в

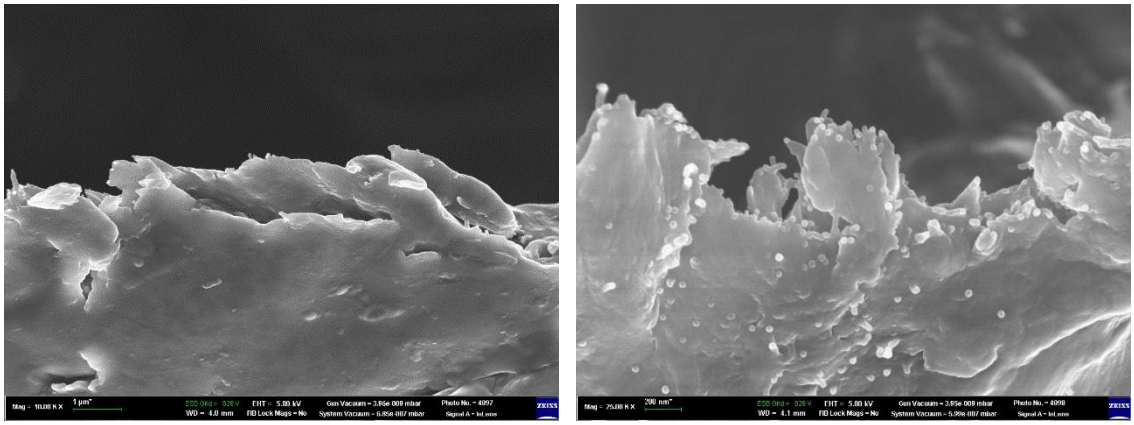
Рисунок 3.22 – Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли: а – до проведения плазменной обработки, слева ×1000, справа ×10000; б – после проведения плазменной обработки в среде азота в течение 3 минут, слева ×1000, справа ×10000; в – после проведения плазменной обработки в среде азота в течение 9 минут, слева ×1000, справа ×10000

На рисунке 3.23 представлены результаты сканирующей электронной микроскопии среза текстильного материала полотняного переплетения из

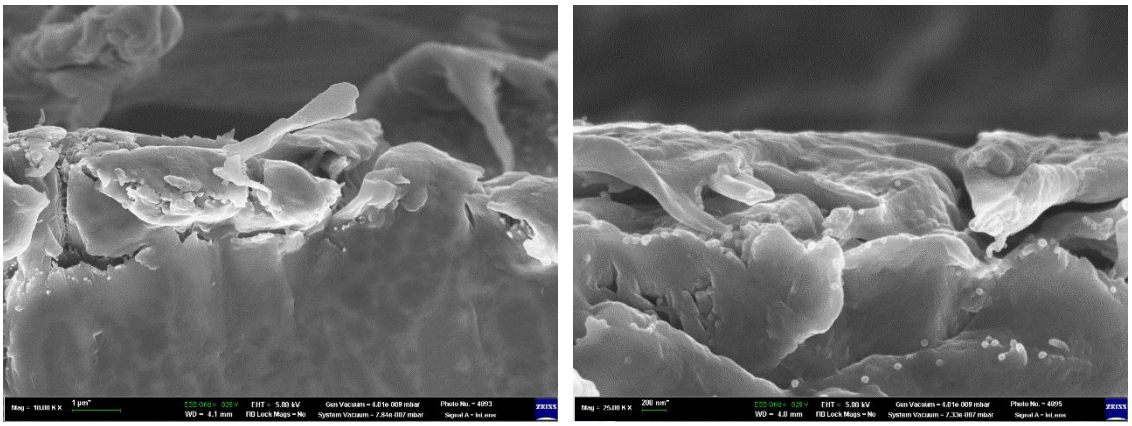
100% технической конопли до и после проведения плазменной обработки в среде азота в течение 3 и 9 минут.



а



б



в

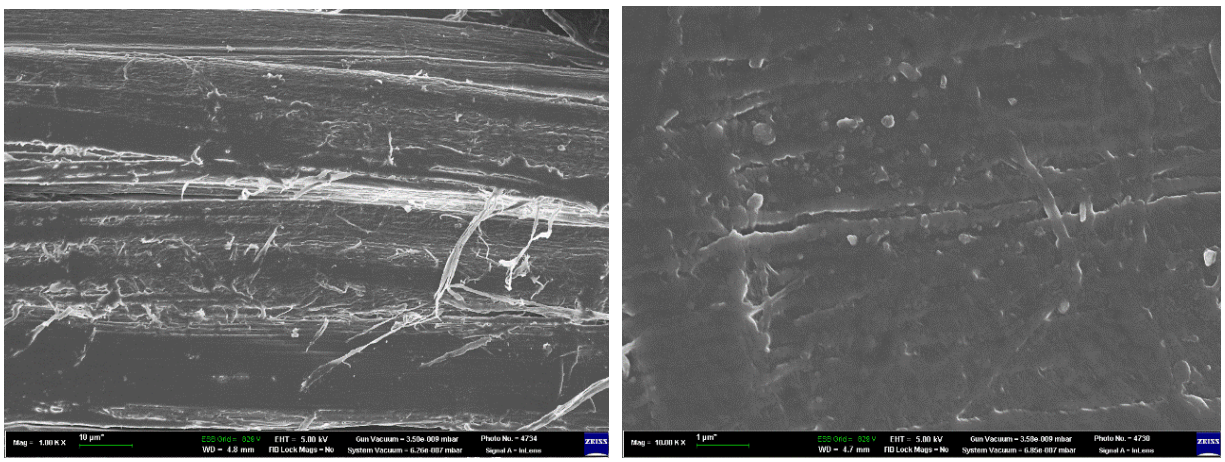
Рисунок 3.23 – Результаты сканирующей электронной микроскопии среза текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли: а – до проведения плазменной обработки, слева ×1000, справа ×10000; б – после проведения плазменной обработки в среде азота в течение 3 минут, слева ×1000, справа ×10000; в – после проведения плазменной обработки в среде азота в течение 9 минут, слева ×10000, справа ×25000

Как видно из рисунка 3.23, срез образца текстильного материала из технической конопли до проведения плазменной обработки ровный, структура среза гомогенная. После проведения плазменной обработки в среде азота в течение 3 и 9 минут наблюдается значительное разволокнение поверхности элементарного волокна. Морфология поперечного среза носит неоднородный характер

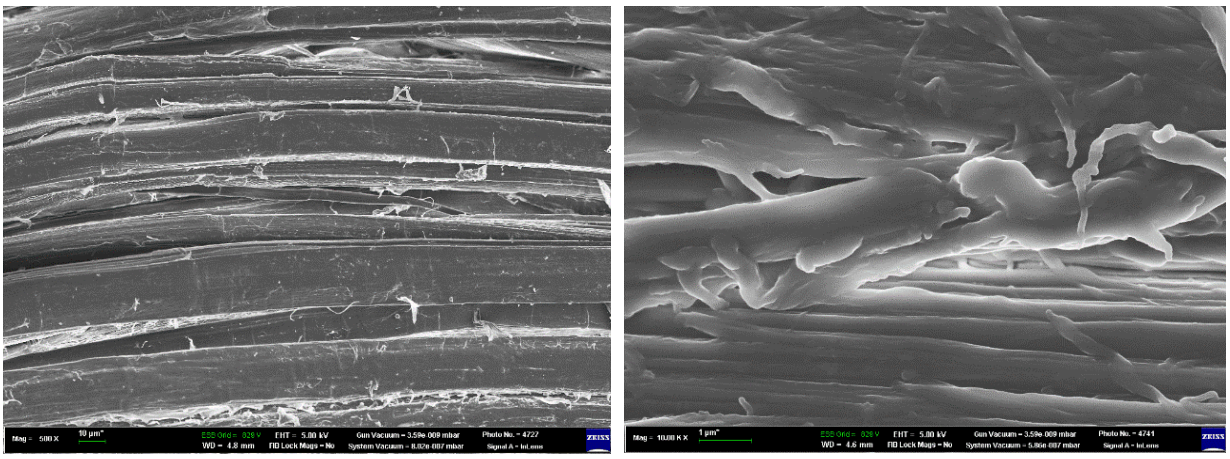
Проведен анализ микрофотографий текстильного материала из 100% волокон технической конопли до плазменной обработки и после проведения плазменной обработки в среде аргона в течение 3 и 9 минут (образец 4, трикотаж, 100% конопля). На рисунке 3.24 представлены микрофотографии поверхности образца №4, трикотажа из 100% технической конопли. На микрофотографии с выбранным увеличением х1000 идентифицированы элементарные волокна технической конопли, средний диаметр волокон составляет 18 мкм. Элементарные волокна имеют продольную ориентацию, укладка волокон, параллельная. На микрофотографиях с увеличением х10000 наблюдаемая морфология поверхности элементарных волокон неоднородная, имеются впадины. На поверхности волокна после проведения плазменной обработки наблюдается разволокнение поверхности.

На рисунке 3.25 представлены результаты сканирующей электронной микроскопии среза текстильного трикотажного материала из 100% технической конопли до и после проведения плазменной обработки.

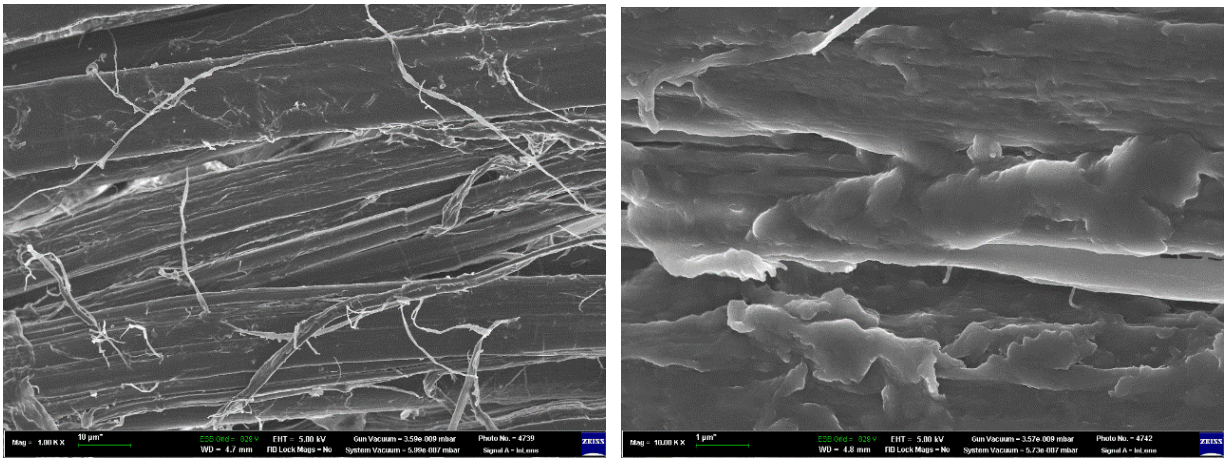
Как видно из рисунка 3.25, поверхность среза волокна до проведения плазменной обработки неровная, имеется ряд выступов неоднородной высоты. После проведения плазменной обработки в среде аргона наблюдается разволокнение поверхности среза, морфология среза неоднородна.



а

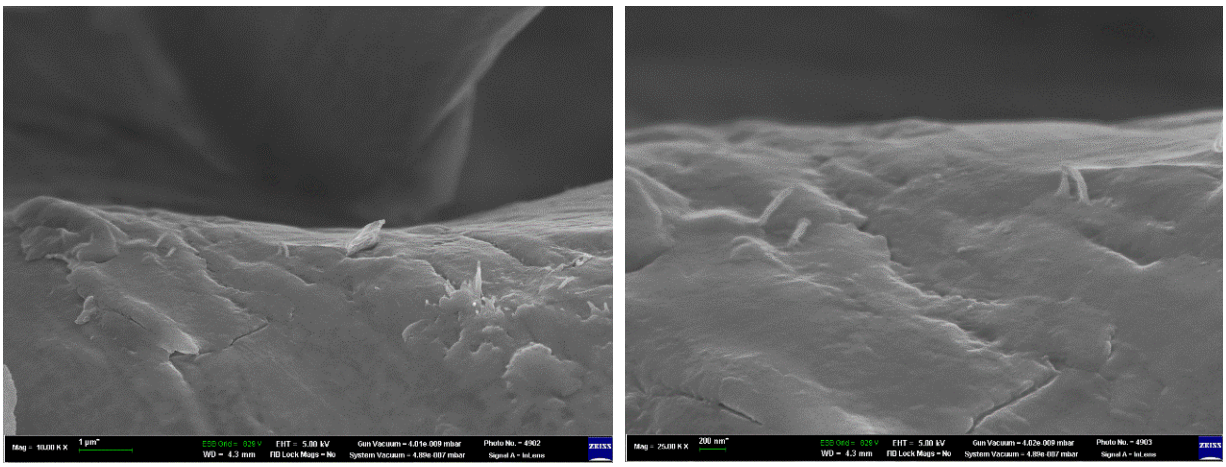


б

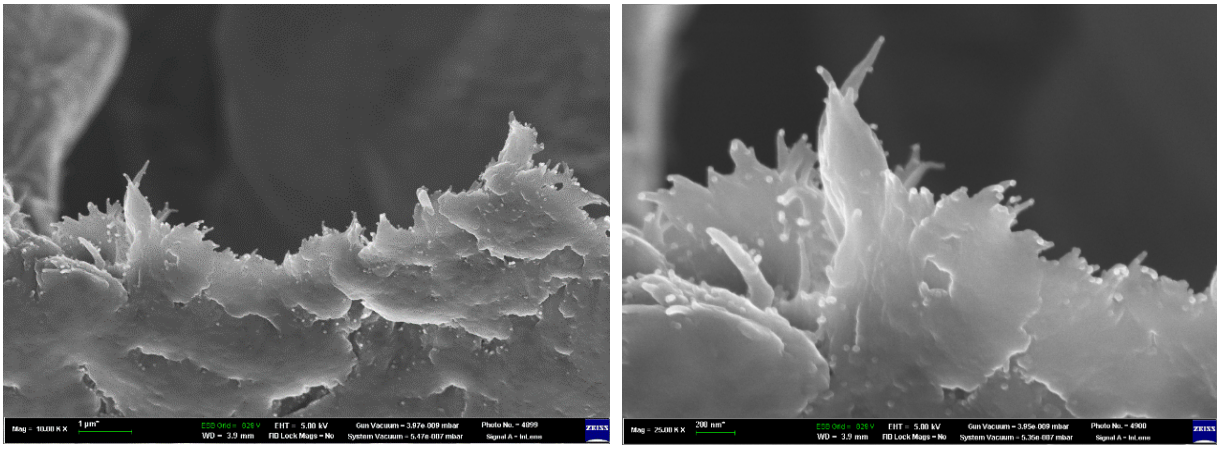


в

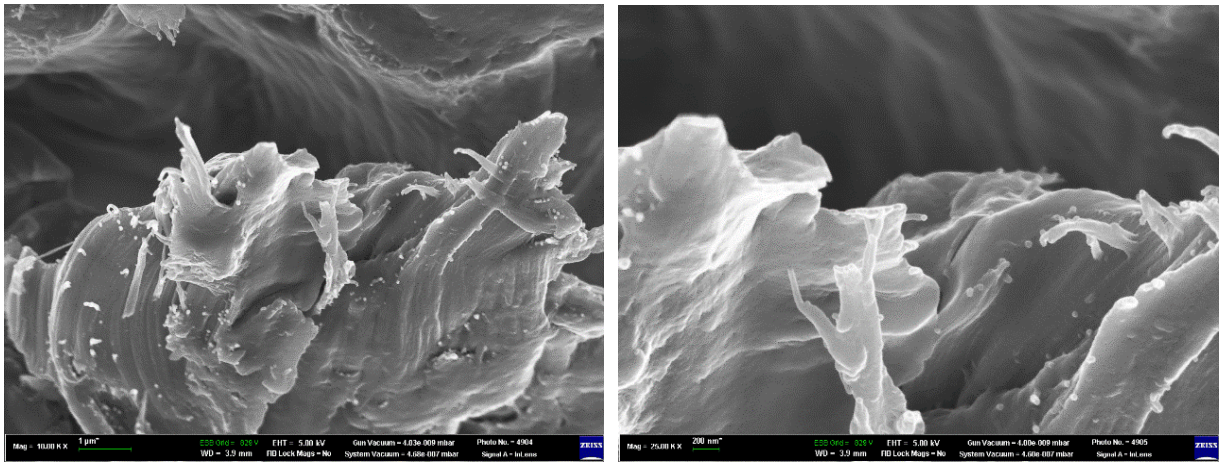
Рисунок 3.24 – Результаты сканирующей электронной микроскопии поверхности текстильного трикотажного материала из 100% волокон технической конопли: а – до проведения плазменной обработки, слева ×1000, справа ×10000; б – после проведения плазменной обработки в среде аргона в течение 3 минут, слева ×1000, справа ×10000; в – после проведения плазменной обработки в среде аргона в течение 9 минут, слева ×1000, справа ×10000



а



б



в

Рисунок 3.25 – Результаты сканирующей электронной микроскопии среза текстильного трикотажного материала из 100% волокон технической конопли: а – до проведения плазменной обработки, слева ×1000, справа ×10000; б – после проведения плазменной обработки в среде аргона в течение 3 минут, слева ×1000, справа ×10000; в – после проведения плазменной обработки в среде аргона в течение 9 минут, слева ×10000, справа ×25000

Проведённые исследования позволяют сделать вывод об основных процессах влияния плазменной обработки на текстиль из волокон технической конопли. Все режимы плазменной обработки обеспечивают увеличение степени кристалличности и увеличение размера зоны упорядоченности целлюлозы. После проведения плазменной обработки в среде азота в течение 3 минут текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли упорядоченность целлюлозы увеличивается на 66,67%, размер зоны упорядоченности увеличивается на 5,38%. Плазменная обработка вызывает выраженное наноструктурировнаие, наблюдаемое на поверхности и срезе элементарного волокна технической конопли, что приводит к увеличению удельной поверхности волокна и объясняет рост показателя гигроскопичности при данном режиме плазменной обработки на 18%. После проведения плазменной обработки текстильного трикотажного материала в аргоне в течение 9 минут упорядоченность структуры целлюлозы значительно увеличивается, на 82,93%, размер зоны упорядоченности увеличивается на 4,69%, рост разрывной нагрузки при выборе данного режима плазменной обработки составляет 23,1%.

Методами ИК-спектроскопии новых химических групп не регистрируется, на морфологическом уровне плазма вызывает разволокнение, ведущее к увеличению удельной поверхности. Таким образом, плазменное воздействие на текстильные материалы из технической конопли носит морфологический, а не химический характер, что открывает возможности в том числе для использования в составе композитов, где требуется повышенная адгезия и улучшенные механические характеристики волокон.

Статистическая обработка результатов исследования сорбционных и механических свойств текстильных материалов из волокон технической конопли

Для проведения обработки результатов исследований применен квалиметрический метод выбора режимов плазменной обработки для управления сорбционными и механическими свойствами текстильных материалов из волокон технической конопли.

За квалиметрический показатель принят параметр, который выражает степень комплексного соответствия механических и сорбционных свойств какого-либо текстильных материалов из технической конопли установленным требованиям.

В данной работе проведена квалиметрическая оценка режимов плазменной обработки, учитывающая выбор плазмообразующего газа и длительность обработки для текстильных материалов из 100% технической конопли, трикотажа и полотняного переплетения.

Квалиметрический показатель выбора оптимального режима плазменной обработки включает совокупность показателей сорбционных и механических характеристик текстильных материалов из волокон технической конопли с учетом весовых характеристик их значимости (3.2). Весовые характеристики значимости показателей присвоены с учетом проектирования технологии направленного сбалансированного улучшения показателя разрывной нагрузки и гигроскопичности методом плазменной инженерии для тканей бытового назначения. Для расчета квалиметрического показателя использованы показатели изменения сорбционных и прочностных характеристик, рассчитанные в процентном изменении относительно необработанных образцов технических материалов из технической конопли.

$$К=К_{ор,осн}+К_{ор,ут}+К_{оу}+К_{и}+К_{г}+К_{к,осн}+К_{к,ут}+К_{в}, \quad (3.2)$$

где $К$ – квалиметрический показатель;

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

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

$К_{оу}$ - показатель относительного разрывного удлинения, %,

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

$К_{г}$ - показатель относительной гигроскопичности, %,

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

$К_{к,ут}$ - показатель капиллярности по утку или поперек петельных рядов, %,

$К_{в}$ - относительный показатель времени впитывания капли, %.

В таблице 3.13 приведены значения весовых характеристик относительных показателей механических и сорбционных свойств.

Таблица 3.13 – Значения весовых коэффициентов

Наименование показателя	Весовой коэффициент
$К_{ор}$ - показатель относительной разрывной нагрузки	0,38
$К_{ор,осн}$ - показатель относительной разрывной нагрузки по основе или вдоль петельных рядов	0,19
$К_{ор,ут}$ - показатель относительной разрывной нагрузки по утку или вдоль петельных рядов	0,19
$К_{оу}$ - показатель относительного разрывного удлинения	0,04
$К_{и}$ - показатель относительной стойкости к истиранию	0,04
$К_{г}$ - показатель относительной гигроскопичности	0,38
$К_{к}$ - показатель относительной капиллярности	0,10
$К_{к,осн}$ - показатель относительной капиллярности по основе или вдоль петельных рядов	0,05
$К_{к,ут}$ - показатель капиллярности по утку или поперек петельных рядов	0,05
$К_{в}$ – относительный показатель времени впитывания капли.	0,06

На рисунке 3.26 представлены значения квалиметрического показателя в зависимости от выбора плазмообразующего газа и времени обработки для

текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли.

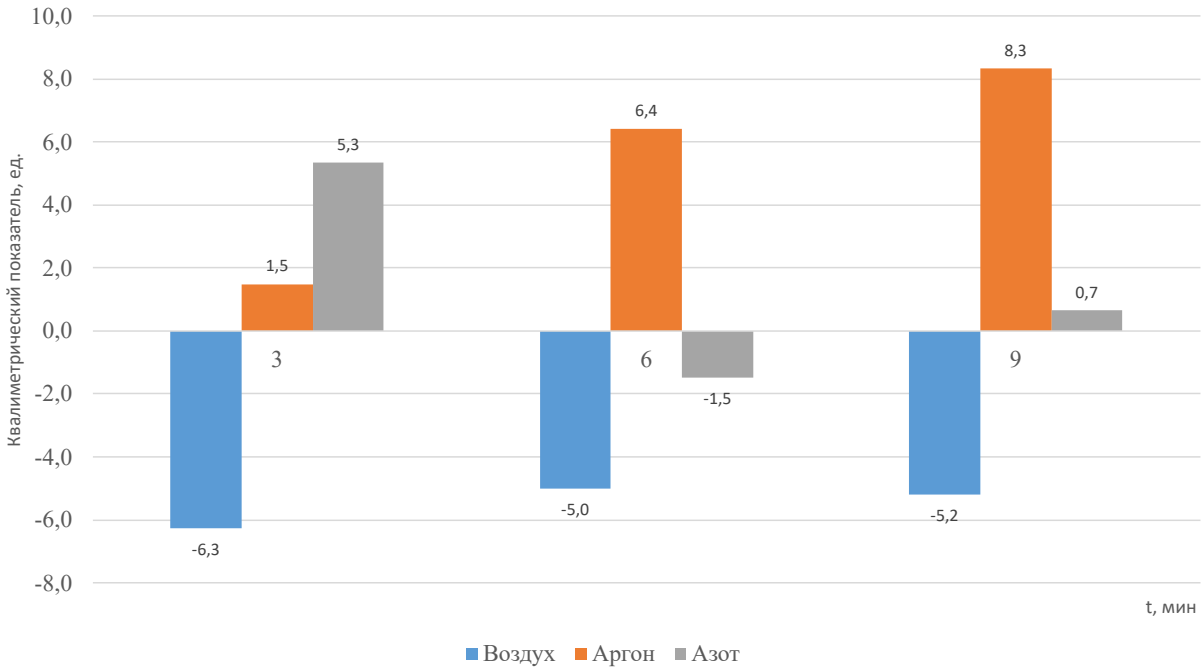


Рисунок 3.26 – Значения квалиметрического показателя в зависимости от выбора плазмообразующего газа и времени обработки для текстильного материала полотняного переплетения из 100% технической конопли.

Для сбалансированного улучшения показателей разрывной нагрузки и гигроскопичности целесообразно проводить плазменную обработку в среде аргона в течение 9 минут, в данном режиме значение квалиметрического показателя является наибольшим и составляет 8,3%.

На рисунке 3.27 представлены значения квалиметрического показателя в зависимости от выбора плазмообразующего газа и времени обработки для трикотажного текстильного материала из 100% технической конопли.

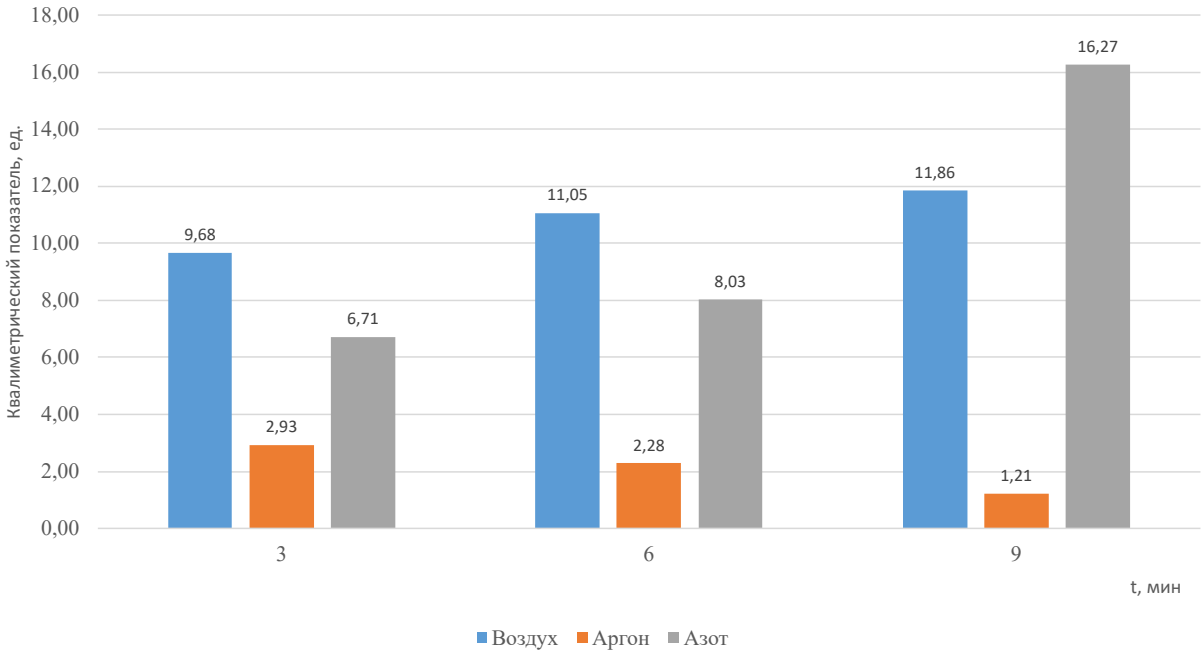


Рисунок 3.27 – Значения квалиметрического показателя в зависимости от выбора плазмообразующего газа и времени обработки для текстильного трикотажного материала из 100% технической конопли.

Все рассмотренные режимы плазменной обработки способствуют росту квалиметрического показателя. Обработка в среде аргона отличается наименьшими значениями квалиметрического показателя, обработка в воздушной среде более предпочтительна. Максимальное значение квалиметрического показателя, 16,27%, соответствует режиму обработки в среде азота в течение 9 минут.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОЛУЧЕНИЮ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ТЕХНИЧЕСКОЙ КОНОПЛИ

Результаты экспериментальных исследований, представленных в главе 3, установили количественные закономерности влияния параметров потока низкотемпературной плазмы пониженного давления на комплекс показателей качества текстильных материалов из конопли. Выявленная возможность целенаправленного изменения сорбционных и механических свойств тканей путём варьирования вида плазмообразующих газов и времени экспозиции, что создаёт научную основу для разработки технологических рекомендаций по производству текстильных материалов с заданными эксплуатационными характеристиками.

4.1 Разработка технологических рекомендаций по получению наноструктурированных текстильных материалов из волокон технической конопли

Разработка технологических рекомендаций по получению наноструктурированных текстильных материалов из волокон технической конопли базируется на следующих принципах:

- дифференцированный подход к выбору режимов плазменной обработки в зависимости от назначения текстильного материала и требуемого комплекса свойств;

- учёт структурных особенностей тканей (тип переплетения, волокнистый состав) при определении оптимальных параметров воздействия;

- обеспечение баланса между улучшением целевых показателей и сохранением или повышением остальных характеристик качества;

- технологическая реализуемость рекомендуемых режимов в условиях промышленного производства.

Применение плазменных технологий в процессе производства текстиля перспективно и обоснованно.

Технологический процесс включает следующие этапы:

Этап 1. Подготовка текстильного материала. Текстильный материал раскраивается на полотна заданных размеров, соответствующих размерам рабочей камеры плазменной установки. Перед обработкой материал кондиционируется в стандартных атмосферных условиях (температура 20±2 °C, относительная влажность 65±4%) в течение не менее 24 часов для достижения равновесной влажности.

Этап 2. Выбор режима плазменной обработки. На основании требований к готовому изделию и результатов, выбирается оптимальный режим обработки: тип плазмообразующего газа (воздух, аргон или азот) и время экспозиции (3, 6 или 9 минут).

Этап 3. Загрузка материала в плазменную установку. Подготовленный материал размещается в зазоре между электродами плазменной установки ВЧЕ разряда пониженного давления вдоль потока плазмообразующего газа. Образец фиксируется в приспособлении для закрепления, обеспечивающем равномерность обработки.

Этап 4. Создание вакуума и напуск плазмообразующего газа. Система откачки обеспечивает создание разрежения в вакуумной камере. После достижения заданного разрежения производится напуск плазмообразующего газа через измеритель расхода с расходом 2000 см³/с.

Этап 5. Плазменная обработка. На электроды подаётся высокочастотное напряжение частотой 13,56 МГц и мощностью 1,2 кВ. В межэлектродном промежутке возникает плазма ВЧЕ разряда, которая является инструментом обработки. Продолжительность обработки составляет 3, 6 или 9 минут в зависимости от выбранного режима. В процессе обработки контролируются основные параметры: давление в камере, расход газа, ток разряда.

Этап 6. Выгрузка материала и кондиционирование. После завершения цикла обработки плазмообразующий газ отключается, камера вентилируется до атмосферного давления. Обработанный материал выгружается и кондиционируется в стандартных атмосферных условиях в течение не менее 2 часов перед дальнейшей переработкой или контролем качества.

Этап 7. Контроль качества. Контроль качества обработанного материала осуществляется по показателям, соответствующим назначению готового изделия.

Кроме режимов плазменной обработки, предназначенных для улучшения механических и сорбционных свойств тканей, целесообразно, имея ввиду придание плазменной обработкой высокой степени шероховатости поверхности, использовать данные режимы до нанесения аппретов различного назначения для получения наилучшей адгезии.

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

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

− плазменная обработка может проводиться на заключительном этапе отделки текстильного материала, после выполнения всех механических операций (раскрой, пошив) 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.

Рекомендации по стандартизации.

Отсутствие в Российской Федерации специализированных государственных стандартов на текстильные материалы из конопли создаёт необходимость разработки нормативных документов, регламентирующих требования к качеству такой продукции и методы её контроля.

При внедрении на предприятии технологических режимов плазменной модификации рекомендуется разработка и утверждение технических условий на данный вид продукции, для стандартизации и возможности контроля параметров производимых товаров и поддержания конкурентоспособности.

В технических условиях необходимо закрепить параметра режимов плазменной обработки, перечень контролируемых показателей тканей и методики их измерения, определить точки контроля, предусмотреть возможность маркировки и идентификации.

Целесообразно проводить направленное улучшение свойств текстильных материалов из технической конопли в зависимости от их функционального назначения.

Комплексное сочетание высоких показателей износостойкости, повышенной гигроскопичности и приобретённой в результате плазменной обработки гидрофобности определяет перспективность модифицированных текстильных материалов для применения в условиях, характеризующихся повышенной влажностью, загрязнённостью и отсутствием возможности

регулярной смены одежды и экипировочного снаряжения. Полученные образцы текстильных материалов характеризуются устойчивой гидрофобностью поверхностного слоя, достигнутой без применения плёнкообразующих покрытий и пропиток. В отличие от традиционных методов гидрофобизации, основанных на нанесении полимерных плёнок, плазменная модификация не приводит к закупорке межволоконных пор и капилляров, что исключает возникновение «парникового эффекта» и сохранение высокого уровня воздухо- и паропроницаемости материала. Таким образом, обеспечивается комплекс свойств, при котором водоотталкивающая способность поверхности сочетается с сохранением гигиенических характеристик, необходимых для комфортной эксплуатации изделий.

К числу наиболее востребованных областей применения таких материалов относятся:

- полевые условия - сочетание водо- и грязеотталкивающих свойств с высокой механической прочностью обеспечивает защиту от воздействия атмосферных осадков, грунтовых загрязнений и интенсивных механических нагрузок, одновременно поддерживая гигиенический комфорт нательного слоя за счёт сохранённой гигроскопичности;
- спортивный и экстремальный туризм (горный туризм, альпинизм, водные походы, экспедиционная деятельность) — ткани с плазменной модификацией позволяют снизить массу и объём сменного гардероба при длительных автономных маршрутах, обеспечивая защиту от дождя, снега и брызг без потери воздухопроницаемости;
- полевые работы в сельском хозяйстве, лесном хозяйстве и строительстве — длительное пребывание на открытом воздухе в условиях переменной погоды, контакта с грунтом, строительными растворами и техническими жидкостями;
- профессиональная экипировка рыбаков, охотников и работников добывающих отраслей — условия повышенной влажности и контакта с

агрессивными средами при необходимости длительного ношения одежды без замены;

– материалы, применение которых требует повышенной адгезии для прочности клеевых соединений и износостойкости, например в производстве обуви.

На основе данного диссертационного исследования на предприятии АО «Егорьевск-обувь», г. Егорьевск, для изготовления обувной подкладки было внедрено использование текстильных материалов из технической конопли, подвернутых плазменной модификации (приложение Г).

На рисунке 4.1 представлена схема расположения подкладочной детали в обуви.



Рисунок 4.1 – Схема послойного расположения подкладочного материала

Для изготовления обувной прокладки использован текстильный материал следующего состава: 53% конопля техническая, 44% хлопок, 3%

спандекс. В качестве метода обработки выбрана низкотемпературная плазменная модификация на установке ВЧЕ пониженного давления в плазмообразующей в аргоновой среде. Обработанная партия материала составила 30 погонных метров. Внедрение технологии позволило улучшить следующие эксплуатационные свойства подкладочного материала:

1. Гигроскопичность увеличилась на 75%, что обеспечивает лучший микроклимат внутри обуви;
2. Прочность при разрыве увеличилась на 27,5%;
3. Устойчивость к истиранию выросла на 16,3%;
4. Адгезионная прочность (прочность склеивания) соединения увеличилась в 2 раза по сравнению с использованием необработанных материалов.

Предприятием АО «Егорьевск-обувь» технология признана эффективной и воспроизводимой. Рекомендовано полномасштабное внедрение на всех производственных линиях предприятия, использующих данный вид подкладочных материалов.

4.2 Обоснование экономической эффективности получения наноструктурированных текстильных материалов из волокон технической конопли

Расчет экономического эффекта от внедрения технологии плазменной обработки текстильных материалов из конопляного волокна в условия производства проводили на основании разработанной в разделе 4.1 технологической схемы. Производство организуется на базе оборудования с использованием установки ВЧЕ-разряда низкого давления с рулонной подачей материала.

Расчет полной себестоимости осуществлялся на месячный объем производства 30 000 м. пог. текстильного материала и производился с учетом норм расхода и стоимости для выработки 1 м. пог. продукции. Статьи затрат

для расчета калькуляции себестоимости для изготовления обработанного плазмой текстильного материала (НТМ) приведены в таблицах 4.1–4.3.

Определение расхода материально-сырьевых ресурсов осуществляется на основании технологической карты процесса плазменной обработки текстильных материалов из конопляного волокна. В качестве объектов обработки выбраны ткан трикотаж со спандексом. В качестве плазмообразующего газа используется азот, наиболее эффективный для повышения гигроскопичности.

Таблица 4.1 – Расчет потребности в материально-сырьевых ресурсах для изготовления НТМ

Материалы	Расход на 1 м.пог.	Расход общий	Ед. изм.	Цена без НДС, руб./ед. изм.	Общая стоимость, руб.
Основные материалы					
Текстильный материал (ткань из 100% конопли, полотняное переплетение)	1	1 400	м.пог.	500,00	700 000
Аргон (плазмообразующий газ, баллон 40 л)	0,0025	120	м³	850,00	102 000
Воздух (плазмообразующий газ, компрессорная подача)	—	—	—	—	—
Вспомогательные материалы					
Упаковочный материал (пленка ПЭ, лента)	0,01	480	кг	120,00	57 600
Итого основное сырье и материалы:					859600

Расход аргона рассчитан исходя из расхода газа в плазменной камере ~0,02 дм³/мин и времени обработки 6 минут на одну загрузку (10 м.пог.), что составляет 0,12 дм³ на 1 м.пог. (с учетом потерь при вакуумировании — 0,0025 м³/м.пог.).

Определение расхода топливно-энергетических ресурсов осуществляется на основании фактически отработанного периода функционирования оборудования, задействованного в изготовлении продукции, а также с учетом производительности соответствующего оснащения. Реальная длительность функционирования оборудования, необходимая для выпуска запланированного объема материала (1 400 м.пог.), предусматривает эксплуатацию плазменной установки на протяжении 20 дней при режиме трудовой активности, составляющем 8-часовую рабочую смену.

Время цикла: вакуумирование — 6 мин, плазменная обработка — 6 мин, девакуумирование — 6 мин = 18 мин на операцию; операции по транспортировке и упаковке 30 мин; средняя длина рулона 50 м, 1,4 загрузки за 8-часовую смену = 70 м.пог./смену; за 20 рабочих дней ≈ 1 400 м.пог.).

Таблица 4.2 – Расчет потребности в топливно-энергетических ресурсах для изготовления НТМ

Статьи расходов	Ед. изм.	Факт. время работы, час	Расход на ед. изм., кВт/ч	Расход общий, кВт/ч	Цена без НДС, руб./кВт/ч	Общая стоимость, руб.
Энергопотреб-ление установки ВЧЕ-разряда	кВт/ч	160	20,0	3 200	5,73	18 336,00
Итого:						18 336,00

Расходы на оплату труда рассчитываются в соответствии с принятой на предприятии повременно-премиальной системой, в рамках которой учитывается фактически отработанное время, затраченное на выпуск материалов.

Расчет основной заработной платы (4.1):

$$Р_{з/п} = Т_ч * Ф_о + П, \quad (4.1)$$

где $Р_{з/п}$ – основная заработная плата, руб.;

$Т_ч$ – часовая тарифная ставка, руб.;

$Ф_о$ – фактически отработанное время, час.;

$П$ – сумма премии.

Часовая тарифная ставка определяется исходя из производственного календаря и установленного оклада рабочих. Часовая тарифная ставка:

$$Т_ч = З_п / 165, \quad (4.2)$$

где $З_п$ — оклад; среднее количество рабочих дней — 247 дней, среднее количество часов — 165 часов/месяц.

Фонд рабочего времени оборудования, вовлечённого в процесс производства материала, установлен согласно фактически отработанному временному интервалу и составляет 160 часов. Алгоритм расчёта совокупного фонда оплаты труда представлен в таблице 4.4.

Таблица 4.3 — Алгоритм расчета фонда оплаты труда работников предприятия для изготовления НТМ

Должность	Оклад, руб.	Числ., чел.	Часовая тарифная ставка, руб./час	Фонд рабочего времени, час.	Зарплата тарифная, руб.	Премия, 20%	Итого, руб.
Оператор плазменной установки	55 000	1	333,33	160	53 332,8	10666,56	63999,36
Подсобный рабочий	42 000	1	254,54	160	40 726,40	8 145,28	48 871,68
Технолог	55 000	1	333,33	160	53 332,80	10 666,56	63 999,36
Итого основная заработная плата персонала:		3			249 209,60	49 841,92	176870,4
Отчисления во внебюджетные фонды							53061,12
Итого фонд оплаты труда:							229931,52

Таблица 4.4 — Калькуляция себестоимости производства для изготовления НТМ

№	Наименование статей затрат	Затраты всего, руб.	на ед. прод., руб.
1	Сырье и материалы	859600,00	614,00
2	Энергия и топливо на технологические нужды	18 336,0	13,10
3	Заработная плата основных производственных рабочих (основная и дополнительная)	229931,52	164,24
4	Выплаты в страховые фонды (ПФР, ФФОМС, ФСС)	53061,12	37,90
5	Расходы на подготовку и освоение производства	10 000,00	7,14
6	Цеховая себестоимость	1 170 928,64	836,38
7	Общезаводские расходы (10% от цеховой с/с)	117 092,86	83,64
8	Производственная себестоимость	1 288 021,5	920,01
9	Себестоимость с прибылью 15%	1 481 224,73	1058,02
10	Цена с НДС, 22%	1 807 094,17	1 290,78

Производственная себестоимость 1 м. пог. составляет 920,01 руб.

Оптовая цена за 1 м. пог. составляет 1058,02 руб. Розничная цена за 1 м. пог. с НДС 22% составляет 1 290,78 руб.

Анализ экономической эффективности производства наноструктурированных текстильных материалов, обработанных потоком «холодной» плазмы пониженного давления, преследует цели комплексного выявления финансового потенциала внедряемого продукта и подтверждения его практической значимости для дальнейшего включения в производственную деятельность предприятия.

Исследование основано на применении ключевых экономических индикаторов, таких как производственная себестоимость, отпускная цена и общий объем реализованной продукции. Основными результатами анализа стали показатели годовой прибыли, налоговой нагрузки и рентабельности производства, выступающих важными ориентирами для принятия управленческих решений и оценки перспектив внедрения инновационного продукта.

Исходные данные для анализа включают режим работы предприятия, предусматривающий 247 рабочих дней в году при пятидневной рабочей неделе и 8-часовом рабочем дне, при этом за 20 дней изготавливается 1 400 пог. м. текстильного материала. Полная себестоимость производства указанной партии составляет 1 288 021,5 руб., оптовая цена за 1 м. пог. – 966,02 руб., а розничная цена с учетом НДС (22%) – 1 178,54 руб. (таблица 4.6).

1. Объем производства за год (4.3):

$$V_{год} = V_{мес} x12 = 16\ 800\ м.пог., \quad (4.3)$$

2. Выручка от реализации за год (4.4):

$$R = V_{год}\ x1\ 058,\ 02 = 17\ 774\ 736\ ,\ 00\ руб., \quad (4.4)$$

где 1058, 02 – оптовая цена за 1 м.пог., руб.

3. Полная себестоимость производства за год (4.5):

$$S = V_{год}\ x\ 920,01 = 15\ 456\ 168,00\ руб. \quad (4.5)$$

где 920,01 – себестоимость за 1 м.пог., руб.

4. Прибыль от реализации за год (4.6):

$$П = R - S = 2\ 318\ 568\ ,00\ руб. \quad (4.6)$$

где R – выручка за год, руб.;

S – полная себестоимость за год, руб.

5. Чистая прибыль за год (4.7):

$$Ч = П - Н = 1\ 900\ 465,57\ руб., \quad (4.7)$$

где $П$ – прибыль от реализации за год, руб.;

$Н$ – налог (22%).

6. Рентабельность производства за год (4.8):

$$Р = Ч / S\ x\ 100\% = 12,3\%, \quad (4.8)$$

где $Ч$ – чистая прибыль за год, руб.;

S – полная себестоимость за год, руб.

Значение экономических показателей от производства плазмомодифицированного текстильного материала из конопли представлены в таблице 4.5.

Таким образом, внедрение производства плазмомодифицированного текстильного материала из конопли, обработанного потоком «холодной» плазмы пониженного давления, обеспечивает значимый финансовый результат, выражаемый в формировании устойчивой операционной прибыли и увеличении капитализации предприятия.

Таблица 4.5 — Значение экономических показателей от производства НТМ

Наименование показателя	Значение
Производственная себестоимость за 1 м.пог., руб.	920,01
Оптовая цена за 1 м.пог., руб.	1 058, 02
Розничная цена за 1 м.пог. с НДС, руб.	1 290,78
Годовой объем производства, м.пог.	16 800,00
Выручка от реализации за год, руб.	17 774 736, 000
Прибыль от реализации за год, руб.	2 318 568 0,00
Чистая прибыль за год, руб.	1 900 465,57
Рентабельность, %	12,30

Согласно проведенному расчету, предприятие сможет получать ежегодно чистую прибыль в размере около 2 318 568 ,00 руб., достигая рентабельности порядка 12,3 %.

Внедрение нового материала обеспечит предприятиям-потребителям надежного партнера, способного предложить качественные и эффективные продукты для удовлетворения растущих запросов рынка спецодежды и технического текстиля из отечественного сырья – технической конопли.

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.

Список использованной литературы

1. Тренды устойчивой моды на биоволокнах и биоразлагаемых волокнах: как меняется текстильная индустрия [Электронный ресурс]. – URL: https://rosstip.ru/news/13088-trendy-ustojchivoj-mody-na-biovoloknakh-i-biorazlagaemykh-voloknakh-kak-menyaetsya-tekstilnaya-industriya (дата обращения: 24.06.2026).

2. Karst S. M., Kirwan D. E., Biddy C. E. et al. Hemp as a potential raw material toward a sustainable world: A review // Materials Today Sustainability. – 2021. – Vol. 14. – P. 100163.

3. Bacci L., Caputo N., De Lucia C. et al. Environmental impact assessment of hemp cultivation and its seed-based food products // Frontiers in Environmental Science. – 2024. – Vol. 12. – 1342330.

4. Дубровин, М. С. Применение технической конопли в производстве широкого спектра продукции различного назначения / М. С. Дубровин // International Agricultural Journal. – 2022. – Т. 65, № 2. – п.н. 30.

5. Лаврентьева, Е. П. Глубокая переработка лубяных волокон - путь к возрождению национальных традиций России / Е. П. Лаврентьева, О. К. Санина, Р. О. Белоусов // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 3(399). – С. 130-139

6. Льготное кредитование сельскохозяйственных потребительских кооперативов // Министерство сельского хозяйства Российской Федерации: официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: https://mcx.gov.ru/activity/state-support/measures/preferential-credit-spk (дата обращения: 24.06.2026).

7. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Электронный ресурс]. – URL: https://docs.cntd.ru/document/574820182/titles/3I7VH5F (дата обращения: 24.06.2026).

8. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 25 августа 2017 г. № 996// Правительство России : официальный сайт [Электронный ресурс]. – URL: http://government.ru/docs/all/141182/?page=49 (дата обращения: 24.06.2026).

9. Козлова, О. А. О необходимости перехода от политики импортозамещения к стимулированию экспорта в российской экономике (на примере текстильной промышленности) / О. А. Козлова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 88-93

10. Прогноз долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2030 года // КонсультантПлюс [Электронный ресурс]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_144190/ (дата обращения: 24.06.2026).

11. Кутепов, А. М. Плазменное модифицирование текстильных материалов: перспективы и проблемы / А. М. Кутепов, А. Г. Захаров, А. И. Максимов, В. А. Титов // Российский химический журнал. – 2002. – Т. XLVI, № 1. – С. 103-115.

12. Азанова А. А., Желтухин В. С., Абуталипова Л. Н. Моделирование воздействия неравновесной низкотемпературной плазмы на трикотажные материалы : монография. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2019. – 236 с.

13. Bast Fibers: Hemp, Ramie, and Jute Properties // Textile School [Электронный ресурс]. – URL: https://www.textileschool.com/10176/bast-fibers-hemp-ramie-and-jute-properties/ (дата обращения: 24.06.2026).

14. Sadeghi P., Cao Q., Abouzeid R., Shayan M., Koo M., Wu Q. Experimental and Statistical Investigations for Tensile Properties of Hemp Fibers // Fibers. – 2024. – Vol. 12. – № 11. – P. 94.

15. Bakar N., Chin S.C., Siregar J.P., Ngien S.K. A review on physical, mechanical, thermal properties and chemical composition of plant fibers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 736. – № 5. – P. 052017.

16. Cotton vs Linen vs Hemp: Which Natural Fabric Is Best // NoName Global [Электронный ресурс]. – URL: https://nonameglobal.com/blogs/news/cotton-vs-linen-vs-hemp-which-natural-fabric-is-best (дата обращения: 24.06.2026).

17. Вершинина А.В., Веселова О.В., Иванова С.Н. Исследование характеристик биосырья – волокон технической конопли // Российские нанотехнологии. – 2023. –Т. 18. – № 1. – С. 72-80.

18. Дядищева, Е. А. Влияние микропластика на здоровье человека и окружающую среду / Е. А. Дядищева, М. Е. Дядищев // БиоЭкоМед. – 2025. – № 1(1). – С. 80-87.

19. Насретдинова, А. С. Современные тенденции и перспективы применения ненаркотической конопли в мире / А. С. Насретдинова, А. И. Храмова, И. В. Красина // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2025. – № 5(419). – С. 11-18.

20. Chinese Hemp Cultivation // Made-in-China.com [Электронный ресурс]. – URL: https://resources.made-in-china.com/article/industry-view/OxtJlEGKVQiZ/Hemp-Inc- Reports-Good-Progress-in-Chinese-Hemp-Cultivation/ (дата обращения: 24.06.2026).

21. Medical Journal of Chinese People's Liberation Army // Wanfang Data. [Электронный ресурс]. – URL: https://med.wanfangdata.com.cn/ Periodical/jfjyxzz (дата обращения: 24.06.2026).

22. Co-constructing a European textile hemp industry [Электронный ресурс]. – URL: https://allianceflaxlinenhemp.eu/en/european-textile-hemp-industry (дата обращения: 24.06.2026).

23. Lin et Chanvre bio: l'association des acteurs du lin et du chanvre textiles bio [Электронный ресурс]. – URL: https://linetchanvrebio.org/ (дата обращения: 24.06.2026).

24. Our hemp yarns // Safilin [Электронный ресурс]. – URL: https://www.safilin.fr/yarns/hemp-yarns/?lang=en (дата обращения: 24.06.2026).

25. Libeco: Belgian Linen of the highest quality [Электронный ресурс]. – URL: https://www.libeco.com/en/ (дата обращения: 24.06.2026).

26. Van de Bilt Zaden en Vlas [Электронный ресурс]. – URL: https://vandebiltzadenvlas.com/en/home/ (дата обращения: 24.06.2026).

27. NATUVALIS: Verarbeitung von Nutzhanf aus regionalem Anbau [Электронный ресурс]. – URL: https://natuvalis.de/ (дата обращения: 24.06.2026).

28. Natural Fiber Welding // Microfiber Innovation Challenge [Электронный ресурс]. – URL: https://www.microfiberinnovation.org /innovation/natural-fiber-welding (дата обращения: 24.06.2026).

29. Hemp Fabric – Sustainable, Durable & Versatile Textiles // Hemp Traders [Электронный ресурс]. – URL: https://hemptraders.com/collections/hemp-fabric (дата обращения: 24.06.2026).

30. Zimniewska M. Hemp Fibre Properties and Processing Target Textile: A Review // Materials. – 2022. – Vol. 15. – No. 5. – P. 1901.

31. Современные методы переработки волокон технической конопли / А. С. Парсанов, Д. В. Тунцев, И. В. Красина, Н. В. Тихонова // Технологии и качество. – 2025. – № 4(70). – С. 41-48.

32. Конопля // Tadviser.ru : портал по информатизации [Электронный ресурс]. – URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Статья:Конопля (дата обращения: 24.06.2026).

33. От масла до каната: особенности национального коноплеводства // Поле.РФ: журнал. [Электронный ресурс]. – URL: https://поле.рф/journal/publication/1780 (дата обращения: 24.06.2026).

34. NeoAnalytics: консалтинговая компания [Электронный ресурс]. – URL: https://www.neoanalytics.ru/ (дата обращения: 24.06.2026).

35. Агропром Холдинг [Электронный ресурс]. – URL: https://agrohold.su/ (дата обращения: 24.06.2026).

36. Макошь: завод полного цикла глубокой переработки семян конопли [Электронный ресурс]. – URL: https://makosh.pro/ (дата обращения: 24.06.2026).

37. Авилат: крупнейшее сельхозпредприятие Башкортостана [Электронный ресурс]. – URL: https://avilat.ru/ (дата обращения: 24.06.2026).

38. Русская пенька // ООО «Мордовские пенькозаводы» [Электронный ресурс]. – URL: https://www.mpz-insar.ru/ (дата обращения: 24.06.2026).

39. Нижегородские Волокна Конопли // ООО «НВК» [Электронный ресурс]. – URL: https://nnvk.ru/ (дата обращения: 24.06.2026).

40. Hemp For Life: вещи и товары из конопли [Электронный ресурс]. – URL: https://hempforlife.ru/ (дата обращения: 24.06.2026).

41. Uzor Wear: одежда, белье и косметика из натуральных материалов [Электронный ресурс]. – URL: https://uzorwear.com/ (дата обращения: 24.06.2026).

42. Country Textile: эко одежда и домашний текстиль[Электронный ресурс]. – URL: https://countrytextile.co/ (дата обращения: 24.06.2026).

43. Товары из конопли [Электронный ресурс]. – URL: https://konop.ru/ (дата обращения: 24.06.2026).

44. Косилка-измельчитель самоходная F 2450 HEMP [Электронный ресурс]. –URL: https://rostselmash.com/products/self-propelled-mowers/f-2450-hemp/ (дата обращения: 17.02.2025).

45. Hemp: From Field to Fiber – A Review // Textiles. – 2024. – Vol. 4. – No. 2. – P. 165–182.

46. Мезенцев, И. С. Первичная обработка технической ненаркотической конопли и технология получения конопляной пряжи и нитей / И. С. Мезенцев, И. В. Красина, А. С. Парсанов // Материалы докладов 55-й Международной научно-технической конференции преподавателей и студентов : в 2 т., Витебск, 27 апреля 2022 года. Том 2. – Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2022. – С. 335-337.

47. Привалов А.В., Коврижных А.А., Травин Г.М. Методы и модели адаптации льноперерабатывающего оборудования под производство тканей из конопли // Вестник КГУ [Электронный ресурс]. – 2014. – № 1. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/metody-i-modeli-adaptatsii-lnopererabatyvayu-oborudovaniya-pod-proizvodstvo-tkaney (дата обращения: 24.06.2026).

48. Ельчанинова, Г. С. Перспективные технологии прядения конопляного волокна: оборудование коттонизации фирмы Laroche / Г. С. Ельчанинова, А. В. Силаков // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2019. – № 1-1. – С. 48-53.

49. Производство чесальных машин и оборудования для переработки сырья из хлопка, конопли, шерсти и синтетических волокон // ТексИнж [Электронный ресурс]. – URL: https://тексинж.рф/ (дата обращения: 24.06.2026).

50. Машины для уборки и первичной переработки лубяных культур // ФГБНУ ФНЦ ЛК [Электронный ресурс]. – URL: https://fnclk.ru/uslugi/mashiny-dlya-uborki-i-pervichnoy-pererabotki-lubyanykh-kultur/ (дата обращения: 24.06.2026).

51. АО «Научно-производственное объединение "Ударно-волновые технологии"»: Текстильная промышленность [Электронный ресурс]. – URL: https://npo-uvt.ru/tekstilnaya-promyshlennost (дата обращения: 17.02.2025).

52. Davey Textile Solutions, University of Alberta, Techfibre Industries. Cellulose Textiles from Hemp Biomass: Opportunities and Challenges // Sustainability. – 2022. – Vol. 14. – No. 22. – P. 15337. — DOI: 10.3390/su142215337.

53. 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, 27 ноября 2025 года. – Уфа: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего профессионального образования "Уфимский государственный нефтяной технический университет", 2025. – С. 100-102. – EDN VEEYLK.

54. Мурашкина, А. А. Анализ современного состояния рынка легкой промышленности в России / А. А. Мурашкина, В. О. Грузинова // Вестник науки. – 2024. – Т. 1. – № 8(77). – С. 14-22.

55. Кабунина И.В. Современный опыт и перспективы переработки технической конопли в России // Международный сельскохозяйственный журнал [Электронный ресурс]. — 2021. — № 6 (384). — С. 34–37. — URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sovremennyy-opyt-i-perspektivy-pererabotki-tehnicheskoy-konopli-v-rossii (дата обращения: 24.06.2026).

56. Союзлегпром развитие текстильной и легкой промышленности России [Электронный ресурс]. – URL: https://www.souzlegprom.ru/ (дата обращения: 24.06.2026).

57. Лубяные волокна // Большая российская энциклопедия [Электронный ресурс]. — URL: https://bigenc.ru/c/lubianye-volokna-0ee2e7 (дата обращения: 20.06.2026).

58. Роговин З. А. Химия целлюлозы. — М.: Химия, 1972. — 520 с.

59. Jasti A., Biswas S. Characterization of Elementary Industrial Hemp (Cannabis sativa L.) Fiber and Its Fabric // Journal of Natural Fibers. — 2023. — Vol. 20, № 1. – Art. 2158982.

60. Серков Валериан Александрович, Белоусов Роман Олегович, Александрова Милена Роландовна, Давыдова Ольга Константиновна НОВЫЙ СОРТ КОНОПЛИ ПОСЕВНОЙ РОМАН ДЛЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ // МСХ. 2021. №3 [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/novyy-sort-konopli-posevnoy-roman-dlya-tsellyulozno-bumazhnoy-promyshlennosti (дата обращения: 10.06.2026).

61. 17. JiA., JiaL., KumarD., Yoo C.G. Recent advancements in biological conversion of industrial hemp for biofuel and value-added products // Fermrntation/ – 2021. – 7, 6.

62. Terinte, N. Overview on native cellulose and microcrystalline cellulose I structure studied by X-ray diffraction (WAXD): Comparison between measurement techniques / N. Terinte, R. Ibbett, K. Schuster // Lenzinger Berichte. – 2011. – Vol. 89. – P. 118–131.

63. Park, S., Baker, J.O., Himmel, M.E. et al. Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance // Biotechnol Biofuels. – 2010. – Vol. 3. – Art. 10.

64. Dalle Vacche, S.; Karunakaran, V.; Patrucco, A.; Zoccola, M.; Douard, L.; Ronchetti, S.; Gallo, M.; Schreier, A.; Leterrier, Y.; Bras, J.; et al. Valorization of Byproducts of Hemp Multipurpose Crop: Short Non-Aligned Bast Fibers as a Source of Nanocellulose // Molecules. – 2021. – Vol. 26. – 4723.

65. Vorokh A.S. Scherrer formula: estimation of error in determining small nanoparticle size // Наносистемы: физика, химия, математика. 2018. №3 [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/scherrer-formula-estimation-of-error-in-determining-small-nanoparticle-size (дата обращения: 10.06.2026).

66. Дорофеев В. В. Разработка и исследование технологии получения модифицированных лубяных волокон на базе ударно-волнового воздействия: дис. ... канд. техн. наук : 05.19.02. М., 2014. 192с.

67. Волков Е.А. Кинетический метод определения капиллярных свойств текстильных материалов /Волков Е.А., Агеев А.А. // КиберЛенинка [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/kineticheskiy-metod-opredeleniya-kapillyarnyh-svoystv-tekstilnyh-materialov/viewer (дата обращения: 24.06.2026).

68. Бузов Б.А Алыменкова Н.Д. Материаловедение в производстве ихделий легкой промышленности (швейное производство): Учебник для студ.высш.учебнюзаведений/ Б.А Бузов Н.Д. Алыменкова6 Под. Ред.Б.А. Бузова —М.: Издательский центр «Академия», 2004. — 448 с.

69. Шустов, Ю.С. Текстильное материаловедение / Ю.С. Шустов. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2018. – 312 с.

70. Стельмашенко, В.И. Материаловедение в производстве изделий лёгкой промышленности / В.И. Стельмашенко, Н.В. Ульянова. – М.: Академия, 2017. – 448 с.

71. Гальбрайх Л. С. Целлюлоза и её производные : учебное пособие. — Москва : МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2010. – 134 с.

72. Kozlowski R., Batog J., Konczewicz W., et al. Survey and Recent Report on Enzymatic Processing of Bast Fibers // Journal of Natural Fibers. – 2006. – Vol. 3, No. 2. – P. 121–135.

73. Ерохина, Е. В. Перспективы лубяного сырья в "зелёной" нанотехнологии / Е. В. Ерохина, Н. С. Дымникова // Новые технологии и материалы легкой промышленности : Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции с элементами научной школы для студентов и молодых ученых, Казань, 15–19 мая 2023 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2023. – С. 148-150.

74. Siddika A., Hossain M.M., Harmon J. Hemp-Based Electronic Textiles for Sustainable and Wearable Applications // ACS Sustainable Chemistry & Engineering. – 2023. – Vol. 11. – No. 41. – P. 14913–14920.

75. Рахилин А.А., Костылев А.В. Современные методы модификации текстильных материалов // Текстильная промышленность. – 2020. – № 1. – С. 15–20.

76. Пат. WO 2016/024880 A1 : МПК D01C 1/00, D01B 1/00 / заявитель и патентообладатель Максимов В.В. [и др.]. – № PCT/RU2014/000885 ; заявл. 23.11.2014; опубл. 18.02.2016.

77. Нуруллина Г. Н., Богданова В. И. Влияние плазменной активации на качественные и количественные показатели цветовых характеристик целлюлозосодержащих трикотажных полотен // Вестник Казанского технологического университета. 2014. №17 [Электронный ресурс]. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-plazmennoy-aktivatsii-na-kachestvennye-

i-kolichestvennye-pokazateli-tsvetovyh-harakteristik-tsellyulozosoderzhaschih (дата обращения: 24.06.2026).

78. Азанова А.А., Абуталипова Л.Н., Тихонова Н.В., Хисамиева Л.Г., Миннебаева Р.Г., Ившин Я.В. Особенности плазменной обработки льняного волокна Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 6 (390). – С. 119-120.

79. Ибатуллина, А. Р. Исследование влияния плазменной модификации на свойства конопляных волокон / А. Р. Ибатуллина, А. Р. Файзуллина // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 16. – С. 43-45.

80. Radetić M., Jovančić P., Jocić D., Topalović T., Puač N., Petrović Z.L.J. The Influence of Low-temperature Plasma and Enzymatic Treatment on Hemp Fabric Dyeability // Fibres and Textiles in Eastern Europe. – 2007. – Vol. 15. – No. 4. – P. 93–96.

81. Bapat K.S., Kee T.P., Russell S.J., Lin L. Improved coloration of hemp fabrics via low-pressure argon plasma assisted surface modification // Cleaner Chemical Engineering. – 2024. – Vol. 10. – P. 100123. – DOI: 10.1016/j.clce.2024.100123.

82**.** Bapat K., Kailas L., Pask C., Kee T.P. Study of Hemp Fiber Properties Modified via Long-Duration Low-Pressure Argon and Oxygen Plasma Treatments // ACS Omega. – 2025. – Vol. 10. – No. 50. – P. 61435–61451. – DOI: 10.1021/acsomega.5c06420.

83. Demin K.A., Khagleev A.N., Petukhova E.S. et al. Effect of Plasma Modification on the Surface of Bast Fiber // Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. – 2024. – Vol. 18. – P. 1730–1735.

84. Naebe M., Haque A.N.M.A., Haji A. Plasma-assisted antimicrobial finishing of textiles: a review // Engineering. – 2022. – Vol. 12. – P. 145–163.

85. Radetić M., Marković D**.** Plasma technology for functional finishing of cellulosic textiles // In: Cellulose – Fundamentals and New Frontiers. – IntechOpen, 2021. – Ch. 8. – P. 155–178.

86. Демин К.А., Хавлеев А.Н., Мокеев М.А., Петров А.Л., Аюрова О.Ж., Цыбикова О.М., Намсараева М.М., Мишигдоржийн У.Л. Функционализация поверхности лубяного волокна плазменной модификацией // Плазменная эмиссионная электроника : труды VII Международного Крейнделевского семинара (31 июля – 6 августа 2023 г., Республика Бурятия, оз. Байкал, с. Максимиха). – Улан-Удэ : Изд-во БНЦ СО РАН, 2023. – С. 296–299.

87. Sawangrat C., Jantanasakulwong K., Suhr J., Kaewapai K., Kanthiya T., Thipchai P., Rachtanapun P., Wattanachai P. Synergistic Effects of Dielectric Barrier Discharge Plasma Treatment on Hemp Fiber Surface Modification and Mechanical Properties of Hemp-Fiber-Reinforced Epoxy Composites // Applied Sciences. – 2025. – Vol. 15. – No. 5. – P. 2818.

88. Азанова А.А., Абуталипова Л.Н., Хисамиева Л.Г. Влияние потока плазмы высокочастотного емкостного разряда пониженного давления на льняное текстильное волокно Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий: сборник статей XI Международной научно-технической конференции. – Казань. – 2019. – С. 13-18.

89. Сафин Р.Р., Саерова К.В. Физико-химическое моделирование высокочастотной плазменной модификации древесины // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2025. №6 [Электронный ресурс]. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-himicheskoe-modelirovanie-vysokochastotnoy-plazmennoy-modifikatsii-drevesiny (дата обращения: 24.12.2025).

90. Демин К.А., Хаглеев А.Н., Мокеев М.А. и др. Функционализация поверхности лубяного волокна плазменной модификацией // Материалы конференции. – 2023. – С. 296–299. – DOI: 10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-296-299.

91. Flynn C.N., Byrne C.P., Meenan B.J. Surface modification of cellulose via atmospheric pressure plasma processing in air and ammonia–nitrogen gas //

Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 233. – P. 108–118. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2013.04.007.

92. Wang M.-J., Chang Y.-I., Poncin-Epaillard F. Effects of the Addition of Hydrogen in the Nitrogen Cold Plasma: The Surface Modification of Polystyrene // Langmuir. – 2003. – Vol. 19, No. 20. – P. 8325–8330. – DOI: 10.1021/la034023d.

93. López-Santos C., Yubero F., Cotrino J., González-Elipe A.R. Nitrogen plasma functionalization of low density polyethylene // Surface and Coatings Technology. – 2011. – Vol. 205, No. 11. – P. 3356–3364. – DOI: 10.1016/j.surfcoat.2010.11.038.

94. Lekobou W.P., Englund K.R., Laborie M.-P., Pedrow P.D. Influence of atmospheric pressure plasma treatments on the surface properties of ligno-cellulosic substrates // Holzforschung. – 2015. – Vol. 70. – P. 55–61.

95. Study of Hemp Fiber Properties Modified via Long-Duration Low-Pressure Argon and Oxygen Plasma Treatments // ACS Omega. – 2025. – Vol. 10, No. 50. – P. 61435.

96. Influence of Cold Plasma Treatment on Cellulose Modification with Different Oxidizing Agents // Materials. –2025. –Vol. 18.

97. Конопляная ткань: интернет-магазин эко тканей[Электронный ресурс]. – URL: https://конопляняткань.рф/ (дата обращения: 24.06.2026).

98. ВАТТ 4000 ПТ ПЛАЗМА: установка для обработки тканевых материалов в ВЧ плазме пониженного давления // Ferryvatt[Электронный ресурс]. – URL: https://ferryvatt.ru/products/plazmennaya-obrabotka/ionno-plazmennoe-travlenie/vatt-4000-pt-plazma (дата обращения: 24.06.2026).

99. Методы и оборудование для экспериментальных исследований взаимодействия ВЧ плазмы с поверхностями [Электронный ресурс]. – URL: https://moodle.kstu.ru/pluginfile.php/282781/mod_resource/content/1/Тема%204.pdf (дата обращения: 24.06.2026).

100. ГОСТ 20566-75. Ткани и штучные изделия текстильные. Правила приемки и метод отбора проб. – Введ. 1976-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2006. – 13 с.

101. ГОСТ 3813-72. Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении. Межгосударственный стандарт. Взамен ГОСТ 3813-47. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 2003. – 20 с.

102. ГОСТ Р ИСО 12947-1–2011. Материалы текстильные. Определение устойчивости к истиранию полотен по методу Мартиндейла. Часть 1. Устройство для испытания по методу истирания Мартиндейла. — Введ. 2013-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2012. – II, 10 с.

103. ГОСТ ISO 12947-2–2021. Материалы текстильные. Определение стойкости текстильных материалов к истиранию по методу Мартиндейла. Часть 2. Определение момента разрушения. – Введ. 2023-07-01. – Москва : Российский информационно-технический центр по стандартизации, 2023. – II, 8 с.

104. OCA series – Optical contact angle measuring and contour analysis systems // DataPhysics Instruments [Электронный ресурс]. — URL: https://www.dataphysics-instruments.com/products/oca/ (дата обращения: 24.06.2026).

105. ГОСТ 3816-81. Полотна текстильные. Методы определения гигроскопических и водоотталкивающих свойств. – Москва : Стандартинформ, 2020. –18 с.

106. ГОСТ 32995-2014. Материалы текстильные. Методика измерения напряженности электростатического поля. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ. – 2017. – 7 с.

107. ГОСТ ISO 6330–2014. Текстиль. Бытовые процедуры стирки и сушки для лабораторных испытаний текстильных изделий. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 22 с.

108. ГОСТ Р 8.736–2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения : нац. стандарт Рос. Федерации: издание официальное. – Москва : Стандартинформ, 2013. –16 с

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

110. Репина М.В., Хамматова Э.А. Повышение механических свойств волокон конопли на основе модифицирования плазмой // Дизайн и технологии. – Москва. – 2025. № 110 (152). – С. 78-82.

111. 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.

112. 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, 28 ноября 2025 г. – Москва: «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина», 2025 – С. 56.

113. 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.

114. 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 (шифр - МКСИ) : Сборник материалов XXVII Международной научно-практической конференции – Москва. – 2026. – С. 134-137.

115. 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.

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

117. 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.

118. 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.

119. 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.

120. Puttaswamy D. Comparison of End-use Properties of Linen and Hemp Woven Fabrics : Master’s Final Degree Project / Kaunas University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Design. – Kaunas. – 2024. – p. 63.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Дифрактограммы (выдержка из протокола испытаний Аналитического исследовательского центра ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

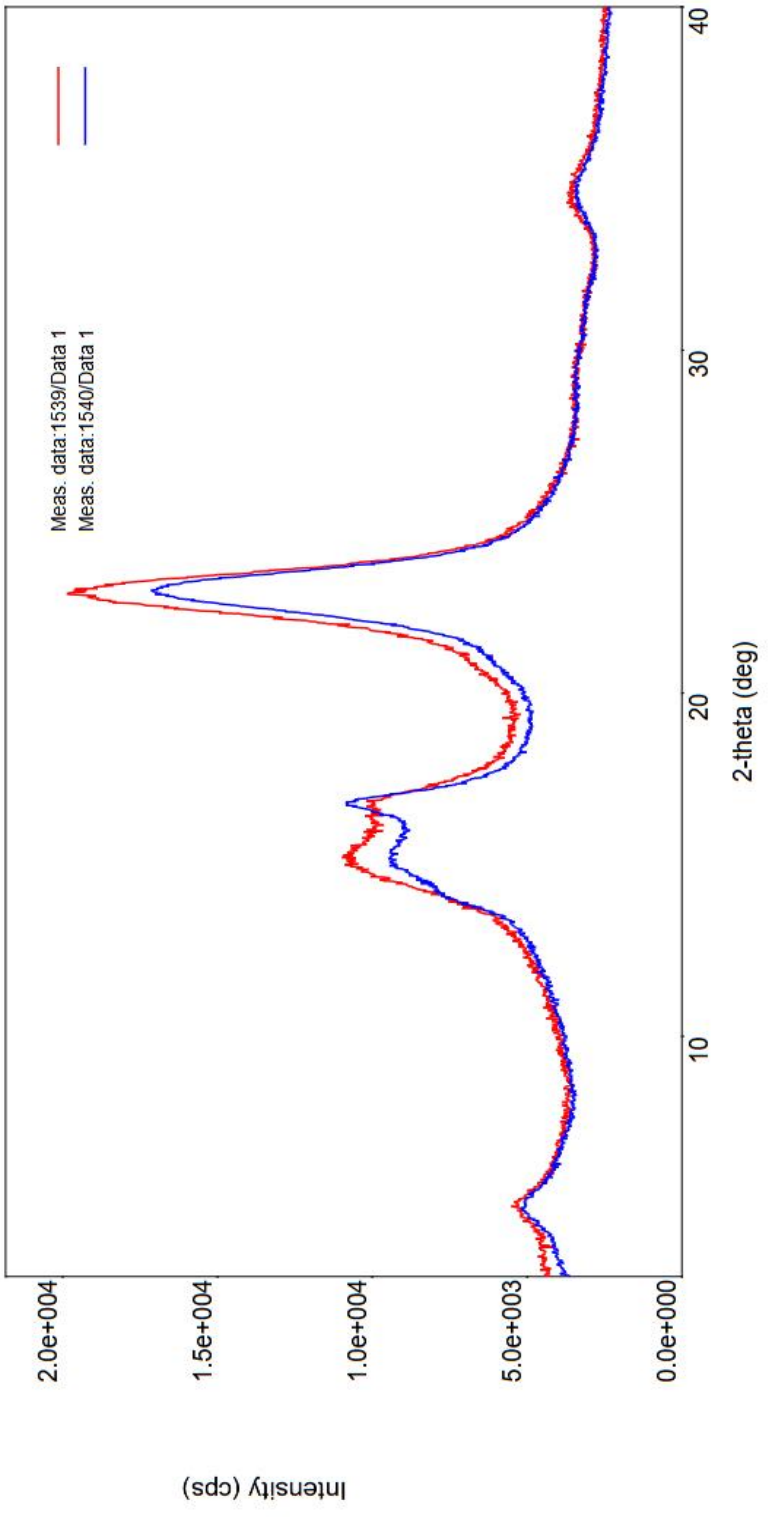


Рисунок 1 – Дифрактограмма образца №1, контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (синий)

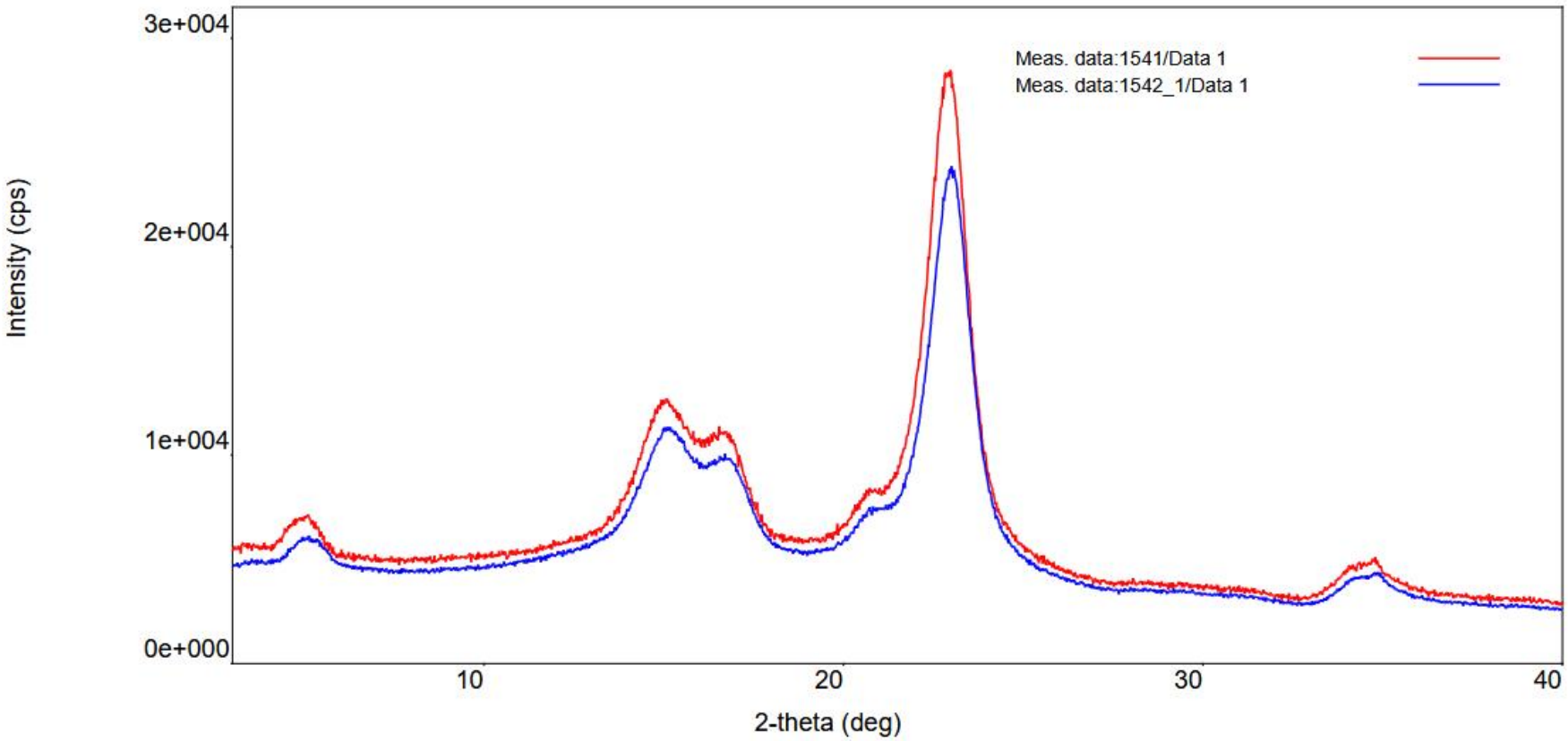


Рисунок 2 – Дифрактограмма образца №3, контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (синий)

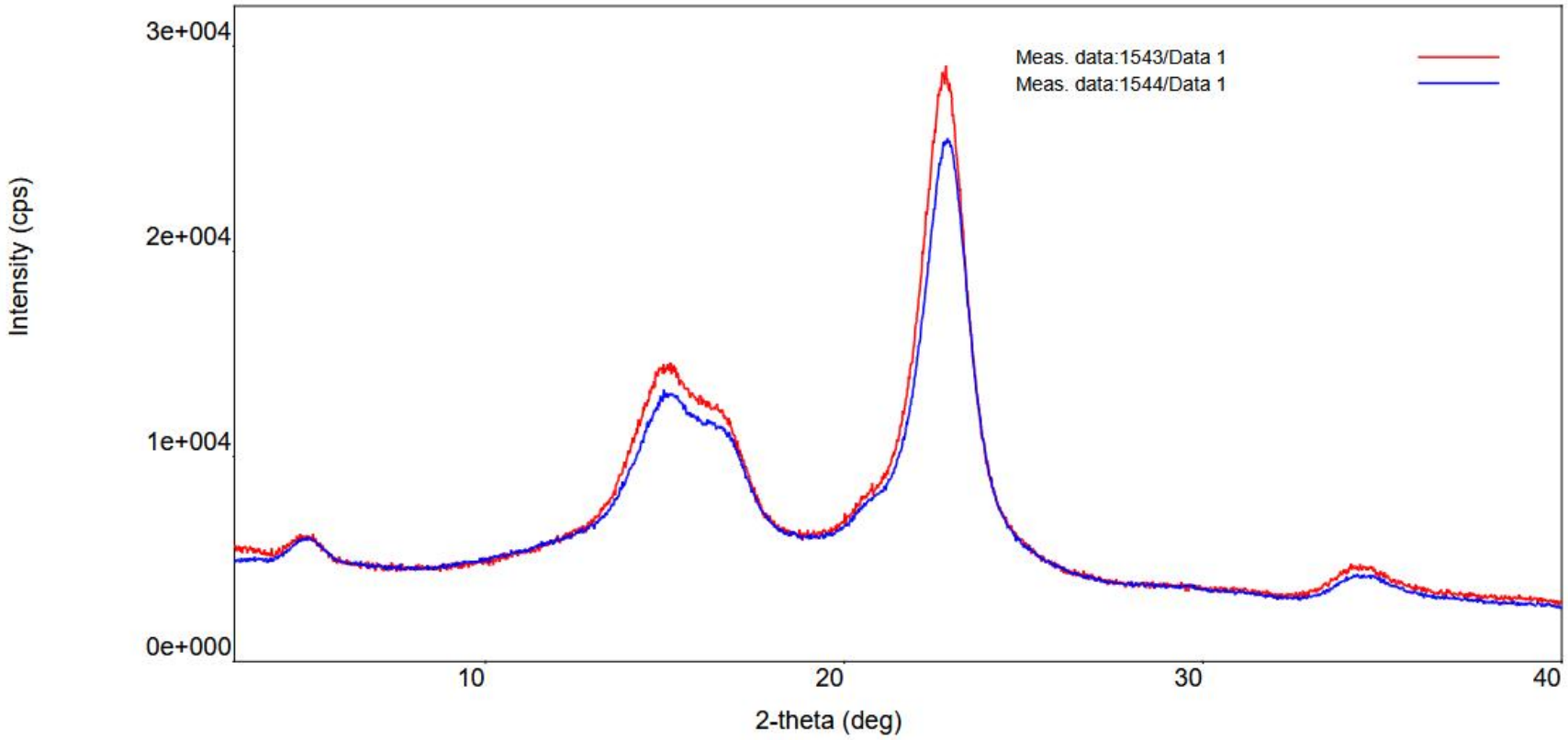


Рисунок 3 – Дифрактограмма образца №4, контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (синий)

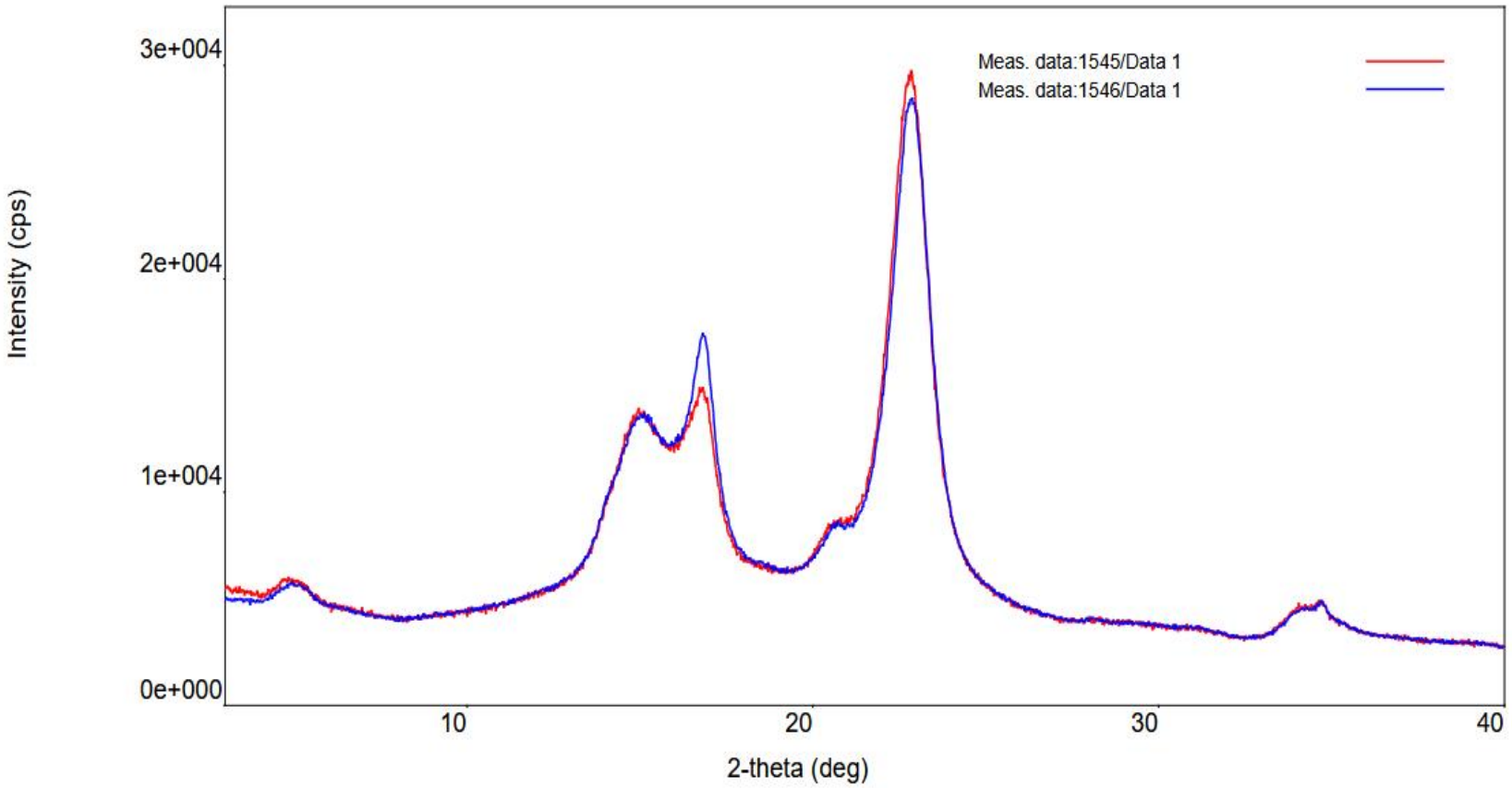


Рисунок 4 – Дифрактограмма образца №5, контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (синий)

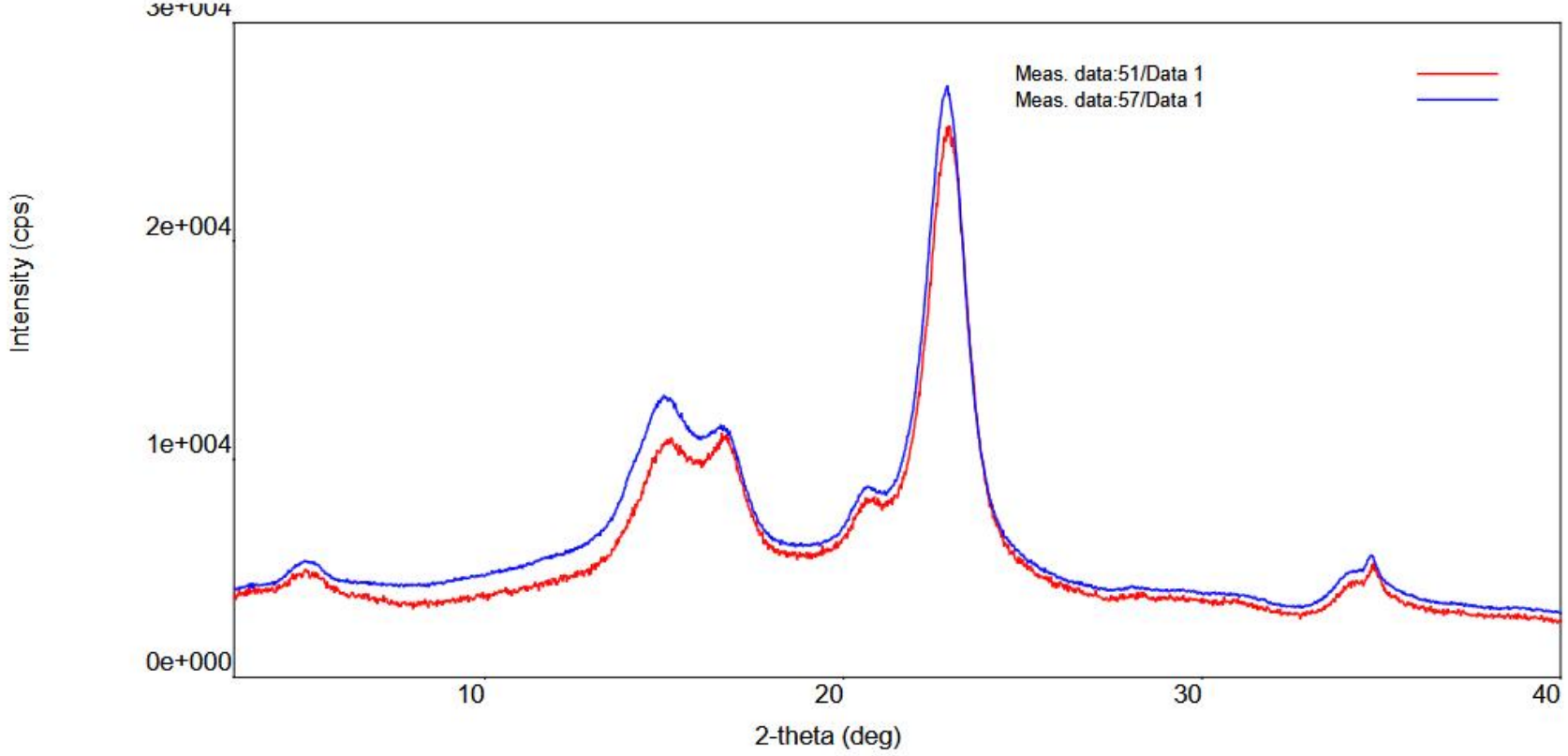


Рисунок 5 – Дифрактограмма образца №6, контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (синий)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ИК-спектры

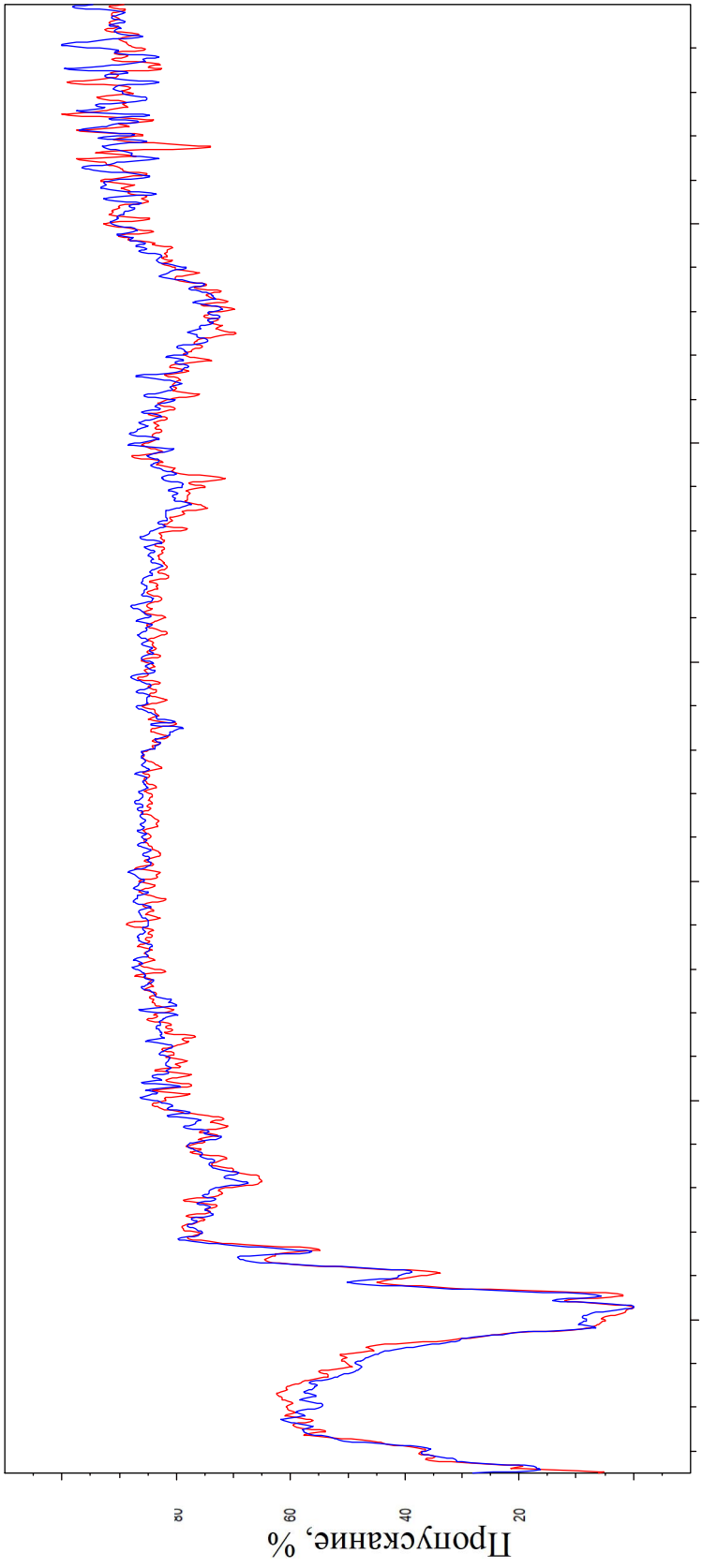


Рисунок 1 – ИК-спектры образца №1, контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (синий)

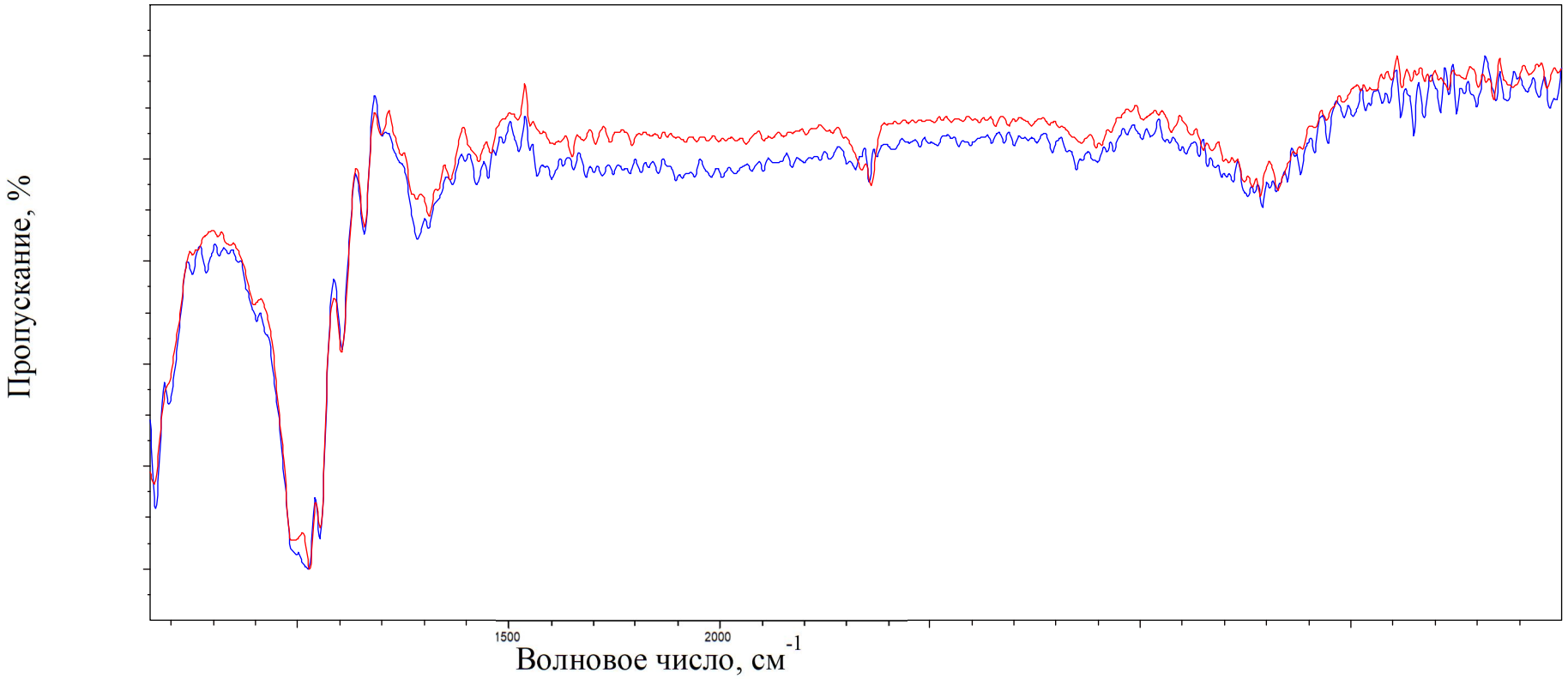


Рисунок 2 – ИК-спектры образца №3 контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (синий)

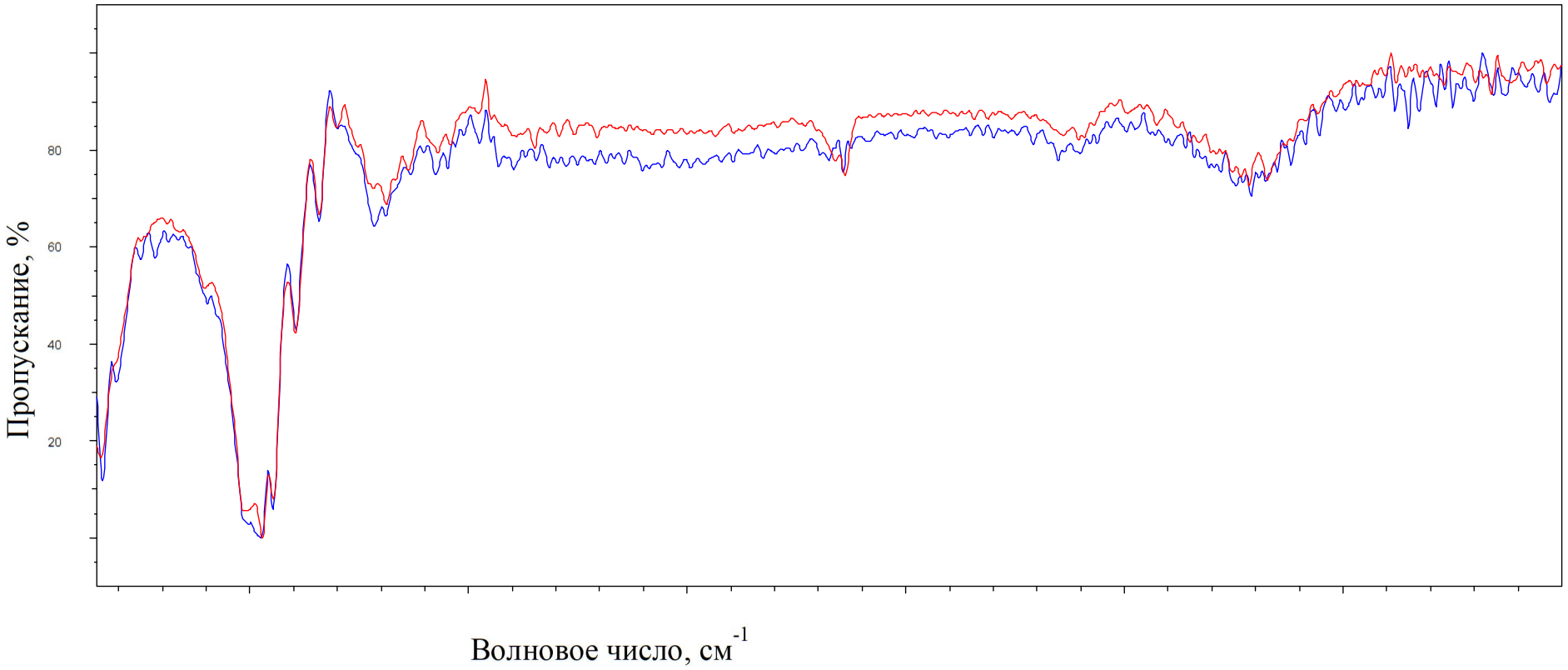


Рисунок 3 – ИК-спектры образца №4, контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (синий)

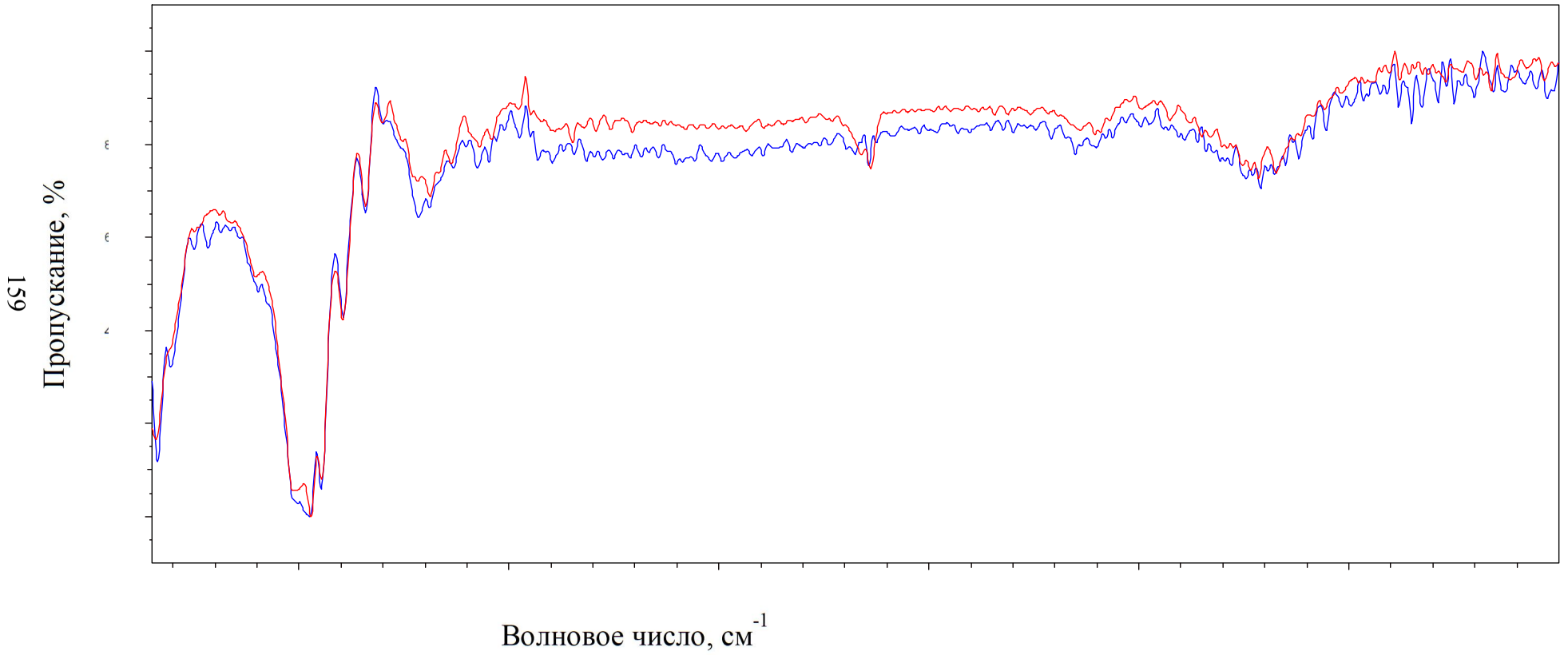


Рисунок 4 – ИК-спектры образца №5, контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (синий)

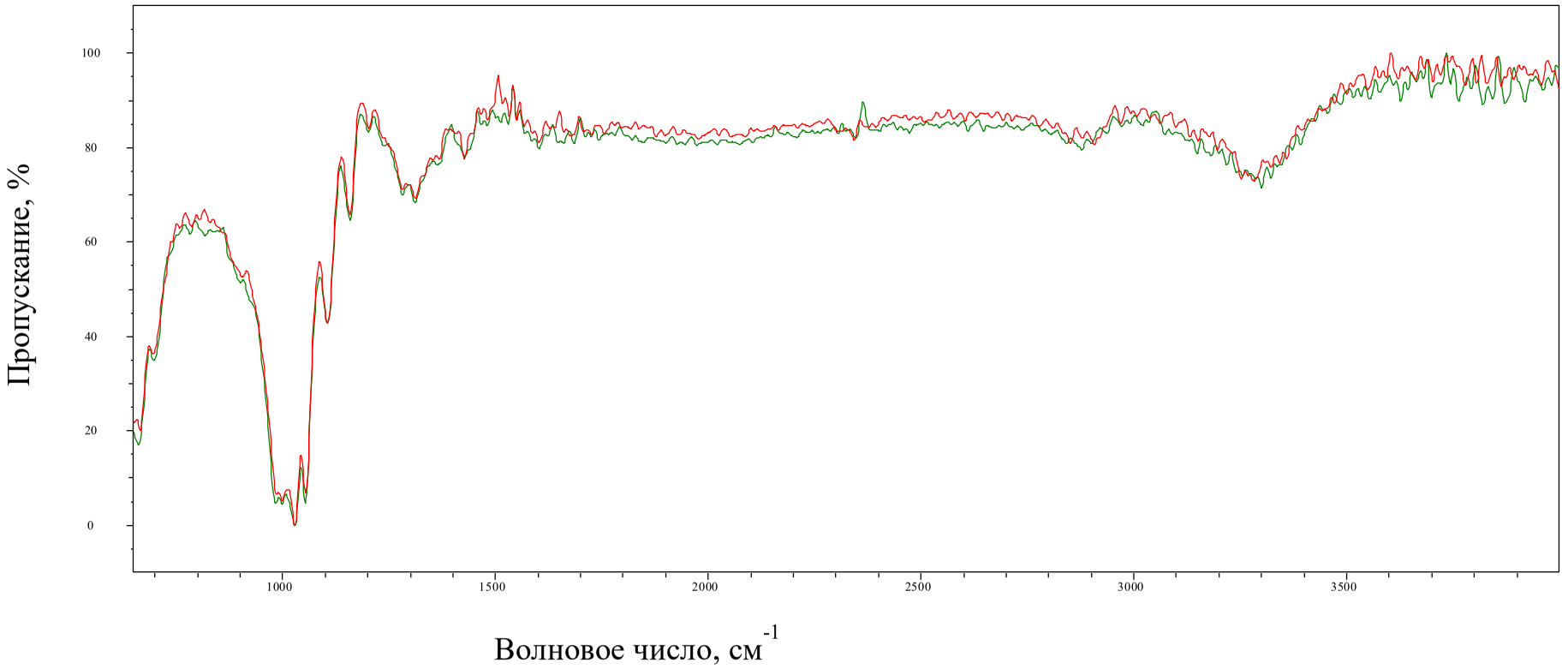


Рисунок 5. ИК-спектры образца №6, контрольный образец (красный) и образец после плазменной обработки (зеленый)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Микрофотографии текстильных материалов из технической конопли

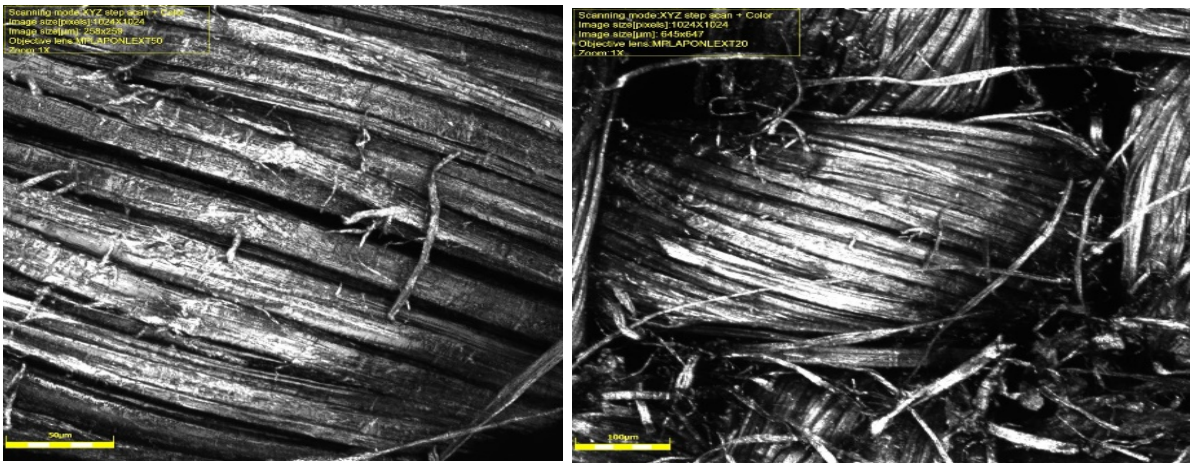


Рисунок 1 – Поверхность образца №1,
слева х50, лазерный режим, справа х20

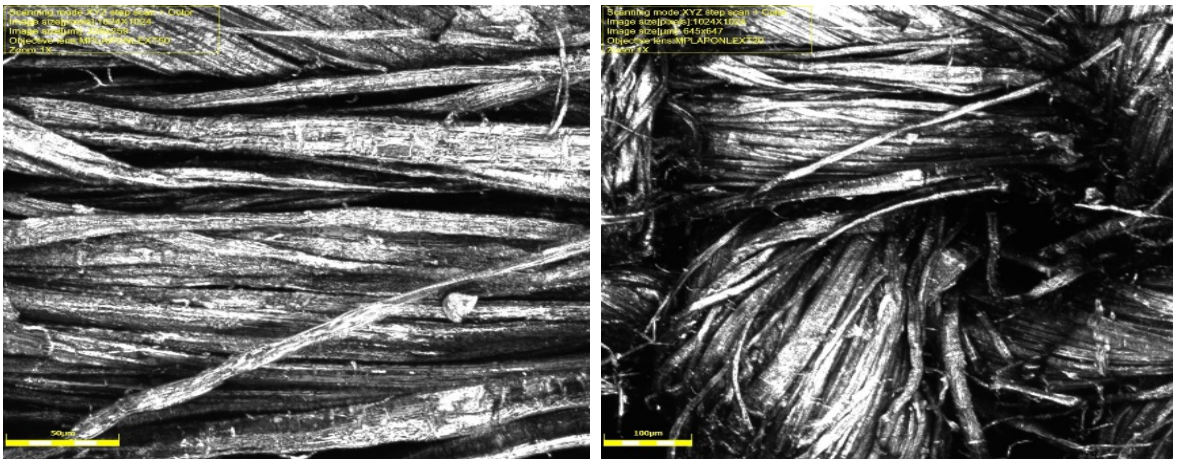


Рисунок 2 – Поверхность к образца №1 после плазменной
обработки, слева х50, лазерный режим, справа х20

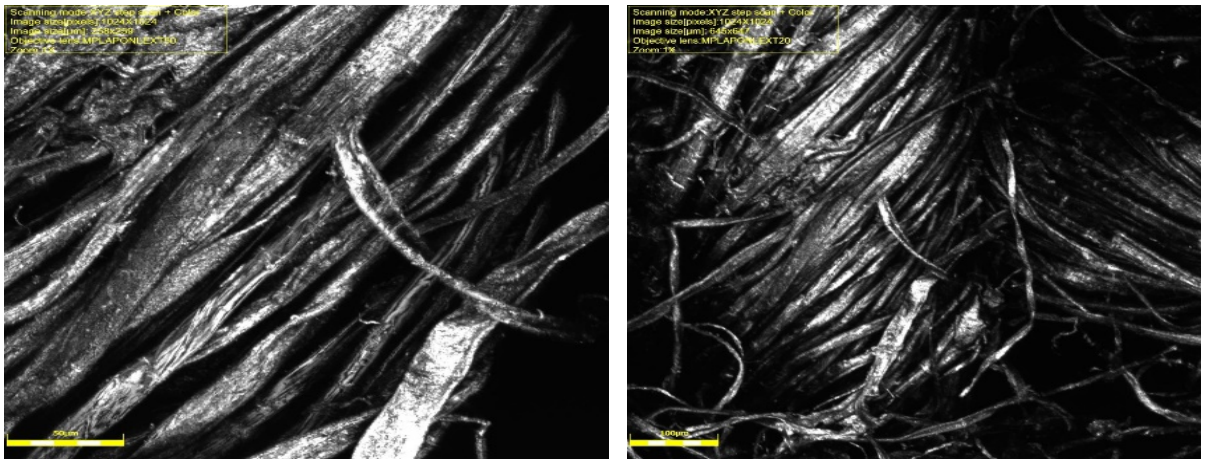


Рисунок 3 – Поверхность к образца №3, слева х50,
лазерный режим, справа х20

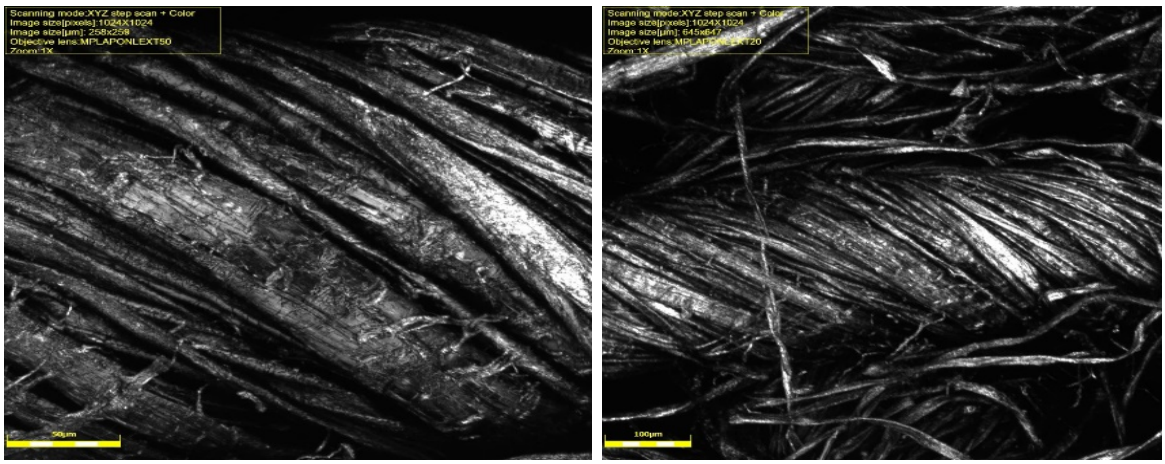


Рисунок 4 – Поверхность к образца №3 после
плазменной обработки, слева х50, лазерный режим, справа х20

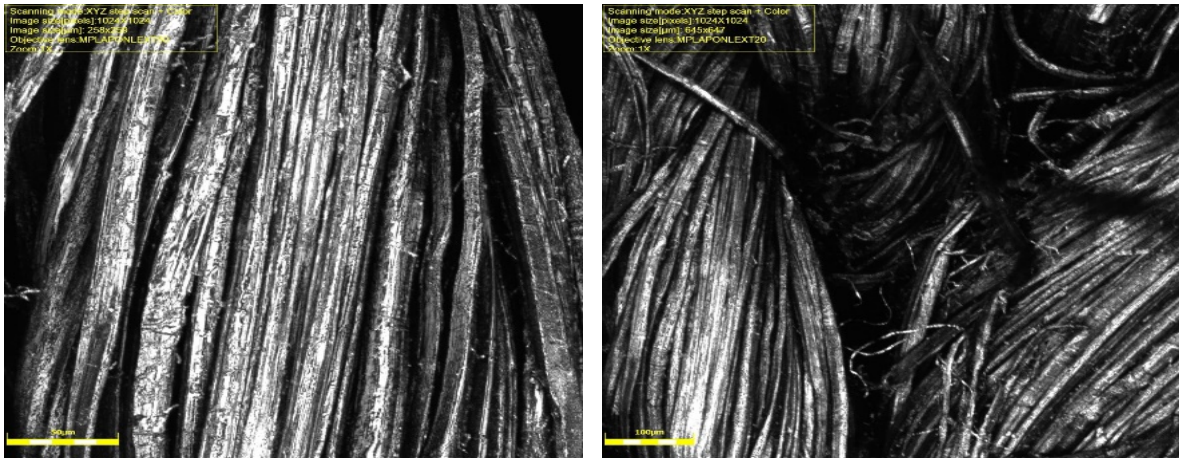


Рисунок 5 – Поверхность к образца №4, слева х50,
лазерный режим, справа х20

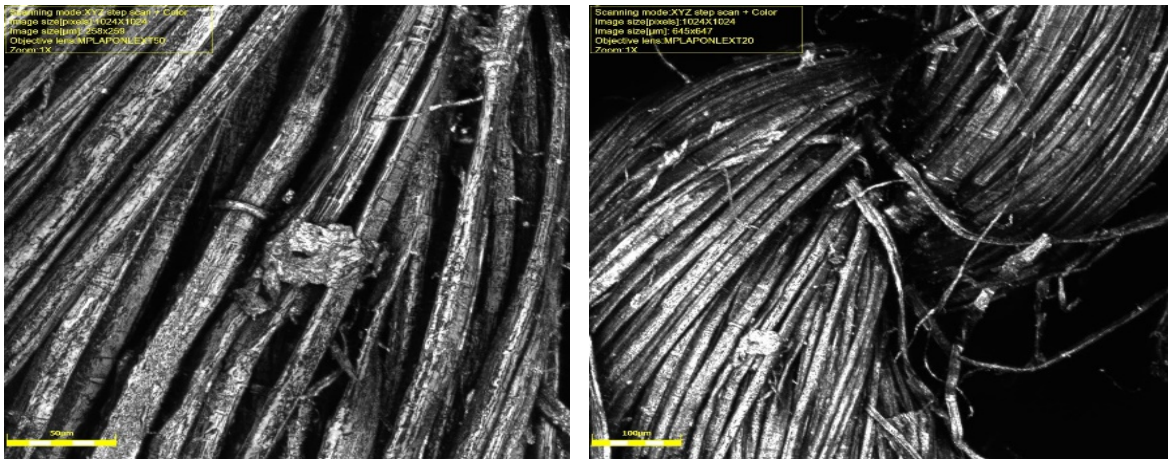


Рисунок 6 – Поверхность к образца №4 после
плазменной обработки, слева х50, лазерный режим, справа х20

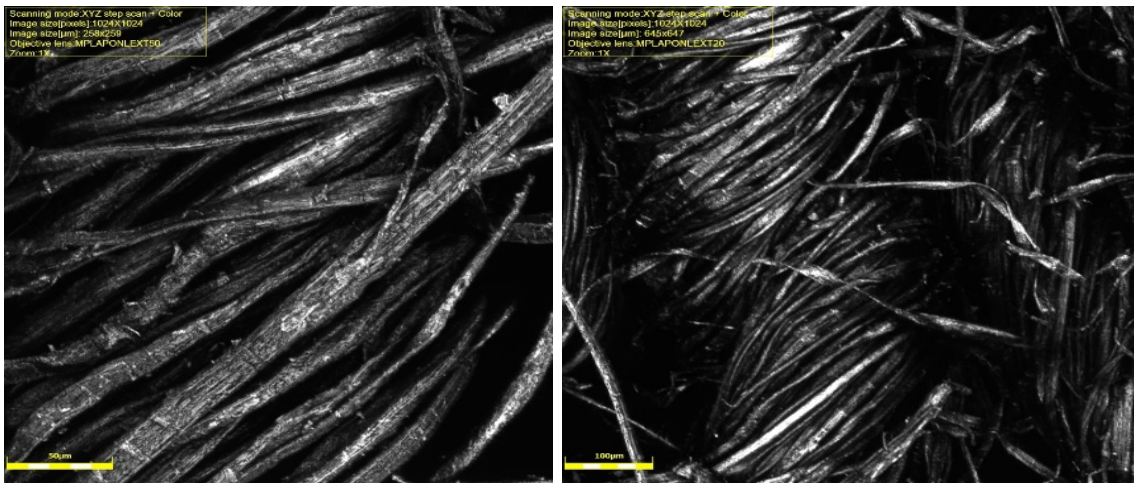


Рисунок 7 – Поверхность к образца №5, слева х50,
лазерный режим, справа х20

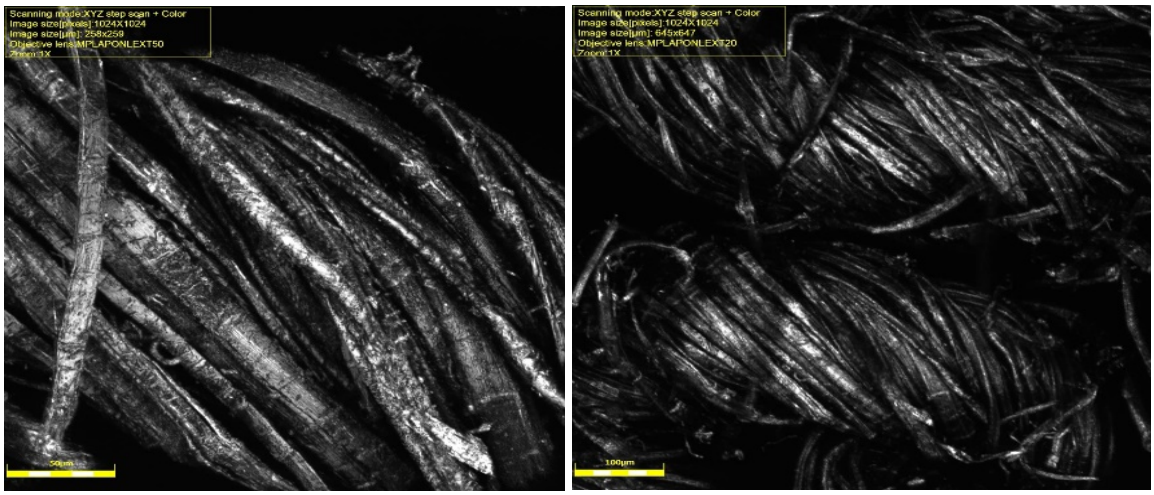


Рисунок 8 – Поверхность к образца №5 после плазменной
обработки, слева х50, лазерный режим, справа х20

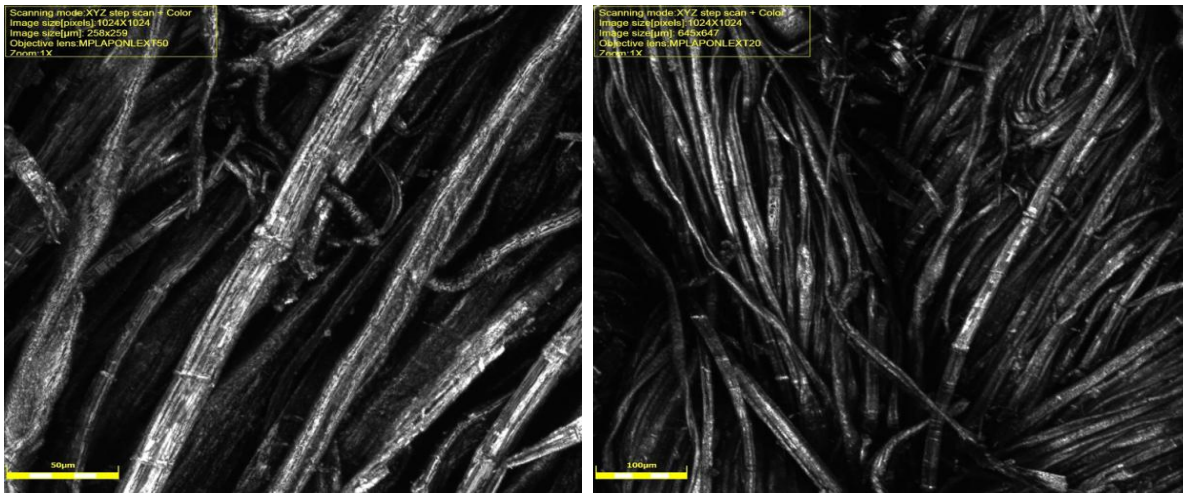


Рисунок 9 – Поверхность к образца №6, слева х50,
лазерный режим, справа х20



Рисунок 10 – Поверхность к образца №6 после плазменной обработки, слева х50, лазерный режим, справа х20

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт внедрения и испытаний

АО «Егорьевск–обувь»
ИНН 5011017647 / КПП 501101001
Россия, 140301, Московская область,
г. Егорьевск, ул. Владимирская д.8

Телефон: +7 496 40 4-05-32
Сайт: www.kotofey.ru
E-mail: info@kotofey.ru

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор
АО «Егорьевск-обувь»

Сорокин С.В.
«10» 06 2026 г.

АКТ

об использовании результатов диссертационной работы
Репиной Марины Викторовны
«Разработка технологии управления сорбционными и механическими свойствами текстильных материалов из лубяных волокон на основе плазменной инженерии»

Мы, нижеподписавшиеся, представители АО «Егорьевск-обувь» с одной стороны, и представители РГУ им. А.Н. Косыгина с другой стороны, составили настоящий акт о том, что в производственных условиях АО «Егорьевск-обувь» внедрена разработанная Технология обработки текстильных материалов из конопли методом низкотемпературной плазменной инженерии с целью модификации их поверхностных свойств для использования в качестве обувной подкладки. В рамках проведенных опытно-промышленных испытаний отработана технология плазменной обработки текстильного материала с содержанием 53% конопли технической, 44% хлопка и 3% спандекса на полупромышленной установке ВЧЕ аргоновой среде с временем экспозиции 9 минут. В результате диссертационного исследования определены параметры обработки: давление в рабочей камере - 18-22 Па; мощность разряда - 3-4,5 Вт; время экспозиции - 3-9 мин; расход плазмообразующего газа - 2000 см³/с. Обработка проводилась на партии материала в количестве 30 погонных метров.

В результате внедрения разработанной технологии были получены следующие подтвержденные результаты. Показатель гигроскопичности обработанного материала увеличился на 75%, что обеспечивает лучший микроклимат внутри обуви. Показатель прочности при разрыве увеличился на 27,5 %, а стойкость к истиранию - на 16,3%. Это позволило повысить эксплуатационные свойства материала, его долговечность. Адгезионная прочность клеевого соединения «наружные детали верха обуви/межподкладка» увеличилась в среднем в 2 раза по сравнению с необработанным материалом.

Комиссия считает, что результаты диссертационной работы успешно внедрены в производство. Разработанная технология плазменной модификации текстильных материалов из конопли является эффективной, воспроизводимой и рекомендуется к полномасштабному внедрению на всех производственных линиях предприятия, использующих данный вид подкладочных материалов.

Представители
АО «Егорьевск-обувь»:

Директор по производству
Корсакова А. В.

Главный технолог
Левшина Е.Д.

р/с 40702.8102.40120100100 БИК 044525225 к/с 30101.8104.00000000225
Среднерусского банка ПАО «Сбербанк России»