Ф.7.37-01

Южно-Казахстанский университет имени М.Ауэзова

УДК 677.01

на правах рукописи

АТАШИКОВА НАРГИЗА АСЛАНБЕКОВНА

Разработка технологии Smart-текстиля с использованием полимерного оптического волокна и мембранного слоя

Диссертация на соискание степени доктора философии (PhD)
по образовательной программе 8D 07206 – Технология и проектирование текстильных материалов

Научные консультанты:
Ботабаев Н.Е. доктор PhD ассоц.профессор,
Азимов А.М. доктор PhD,
Эрдем Р. доктор PhD, ассоц.профессор.

Шымкент 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ..... 8

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА SMART ТЕКСТИЛЯ……... 16

1.1 Разновидности, получение и применение в текстиле полимерного оптического волокна…… 16

1.2 Полимерно-текстильные мембранные материалы..... 31

Вывод по литературному обзору 41

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВ И ПТМ В SMART ТЕКСТИЛЕ……. 43

2.1 Характеристика материалов и реагентов……..…… 43

2.2 Метод формирования трикотажного полотна с полимерным оптическим волокном ……. 44

2.3 Методы получения полимерно-текстильного материала с мембранными свойствами…….. 45

2.4 Исследование физико-механических свойств трикотажного полотна с полимерным оптическим волокном..... 47

2.5 Исследование свойств мембранных полимерно-текстильных материалов…… 48

Вывод ко второй главе 51

ГЛАВА 3 ПОЛУЧЕНИЕ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТЕН С ПОЛИМЕРНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНОМ ……... 52

3.1 Оценка жесткости на изгиб и восстановление его при изгибе 53

3.2 Испытание на сжатие образцов……..... 54

3.3 Испытание на трение образцов…….. 57

3.4 Светоотражающие свойства……... 61

Вывод к третьей главе 65

ГЛАВА 4 ПОЛУЧЕНИЕ, СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА МЕМБРАННЫХ ПОЛИМЕРНО-ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ… 67

4.1 Функциональные свойства ……..... 67

4.2 Термогравиметрический и дифференциальный термический анализ полученных образцов материала…….. 72

4.3 Морфология поверхности и межслойного сечения полимерно-текстильных материалов..…….....……..... 80

4.4 Физико-механические свойства полученных образцов…….. 84

4.5 Влияние многократной водной обработке (стирки) на свойства полученных материалов..... 85

4.6 Разработка математического планирования эксперимента для прогнозирования водоупорности и водопоглощение …….. 88

Вывод к четвертой главе 93

ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... 95

Список использованных источников..... 97

Приложения А – АКТ испытания 106

Приложения В – АКТ опытно-промышленного испытания 108

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие нормативные документы:

ГОСТ 10524-2014	Ткани и штучные изделия льняные и полульняные махровые. Общие технические условия
ГОСТ 3811-72 (ISO 3801-77)	Метод определения линейных размеров, линейной и поверхностной плотностей.
ГОСТ 3813-72 (ISO 5082-82)	Прочность на разрыв (N)
ГОСТ 9913-90	Стойкость к истиранию
ГОСТ 3816-81 (ISO 811-81)	Водопоглощение (%)
ГОСТ 29298-2005	Воздухопроницаемость
ГОСТ 938.17-70	Паропроницаемость
ГОСТ 8710-84	Промывка образцов для определения усадки
NF EN 14970	Европейский стандарт, определяющий методы определения длины петли и линейной плотности пряжи в трикотажных полотнах.

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины и определения:

Акриловая эмульсия – это водная дисперсия полимеров на основе акриловых или метакриловых соединений.

Мембранные свойства – это способность материала избирательно пропускать одни вещества и задерживать, то есть сочетание водонепроницаемости и паропроницаемости («дышащих» качеств)

Полимерные оптические волокна – это оптическое волокно изготовленное из полимеров, которая прозрачная для видимого света. Сердцевина из полиметилметакрилата (ПММА), в качестве материала оболочки используют фторированный полимер.

Трикотажное полотно – текстильный материал, образованный переплетением петель из одной или нескольких нитей.

Хлопчатобумажная ткань – текстильный материал из натуральных хлопковых волокон, полученный ткачеством и обладающим гигроскопичностью и воздухопроницаемостью.

Smart текстиль (умный текстиль) – это текстильные материалы, способные реагировать на внешние воздействия и изменять свои свойства.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В настоящей диссетарции применяют следующие обозначения и сокращения:

B	изгибная жёсткость материала, Н м^2
E	модуль упругости материала, Па
I	осевой момент инерции поперечного сечения, м^4
d	диаметр круглого волокна или нити, м
π	математическая постоянная, $\pi \approx 3{,}1416$.
Irradiance loss (i)	потери излучения(i)
$Irrad_i$	мгновенное излучение
$Irrad_{max}$	максимальная освещенность волокна во время теста
W	водопоглощение образца, %
m_1	первоначальная масса образца, г
m_2	масса образца после обработки, г
m_2-m_1	изменение массы образца, г
A	паропроницаемость, г/(м^2*ч)
m	масса водяного пара, прошедшего через исследуемый образец, г
t	время, ч
πr^2	площадь рабочей части образца, м^2
$y = ax^2 + bx + c$	Коэффициенты полиномиальных уравнений
АП-360СМ	Измеритель электропроводности воздуха
ДТА	Дифференциально-термический анализ
МТ-194	Специальный прибор для испытания устойчивости тканей к истиранию
ПММА	Полиметилметакрилат

ПМА	Полиметилакрилат
ПОВ	Полимерные оптические волокна
ПТМ	Полимерно-текстильные материалы
ТГА	Термогравиметрический анализ
РЭМ–Эво 10 мА (Карл Цейс, Германия)	Сканирующий электронный микроскоп
AG-1	Машина для испытания на растяжение
“GX-400”	Специальные весы
M 235/3	Прибор для определения стойкости тканей к истиранию
SEM-EVO-MA 10 (Carl Zeiss, Германия)	Сканирующий электронный микроскоп
Optika mikroscopes B-150	Цифровой usb микроскоп
JSM-6490 LV (Япония)	Растровый электронный микроскоп
Netzsch Simultaneous Analyzer 409 PG (Germany)	Прибор оснащенный термопарами К-типа и алюминиевыми тиглями

ВВЕДЕНИЕ

Общая характеристика работы. Диссертационная работа посвящена разработке технологии Smart-текстиля с использованием полимерного оптического волокна и мембранного слоя, в частности трикотажного полотна с полимерным оптическим волокном (ПОВ) и полимерно-текстильного материала (ПТМ) с мембранными свойствами.

Актуальность темы исследования. Текстильная промышленность продолжает активно развиваться за счет новых материалов и современных технологий. Многие компании стремятся сделать свою продукцию более экологичной, удобной и долговечной.

На рынке наблюдается растущая тенденция использования «умных тканей» и текстильных изделий из них. Преимуществами «умных тканей» и изделий являются ярко выраженная функциональность, как водоупорность и водопоглощение в сочетании с паро- и воздухопроницаемостью, светопоглощения или светоотражение, теплопроводность, электропроводность или теплоудерживание в сочетании с терморегуляцией, и еще целый ряд свойств, создающих удобство и комфорт в процессе эксплуатации. По данным Presedence Research, в 2024 году объем мирового рынка «умных тканей» оценивается в $6,24 млрд. Прогнозируется, что в 2025 году рынок увеличится с $8,11 млрд до $86,87 млрд к 2034 году, при этом среднегодовой темп роста составит 30,13% в период с 2025 по 2034 годы [1].

Текстильная промышленность остается одной из важнейших составляющих легкой промышленности Казахстана, обеспечивая рабочие места, экспортные поступления и переработку сырья. На начало 2025 года в стране действовало 485 предприятий, производящих текстильные изделия - около 34% от доли всех предприятий легкой промышленности. Основные производственные мощности сосредоточены в Туркестанской области и городе Шымкенте, что объясняется доступом к хлопковому сырью и трудовым ресурсам.

Инновационная активность в отрасли имеет потенциал для дальнейшего роста. По последним данным, доля инновационно-активных предприятий в секторе выросла с 10,4% в 2020 году до 11,1% в 2023-м. Эти цифры указывают на то, что лишь незначительная часть предприятий системно внедряет технологические новшества.

Актуальность исследования технологии в smart текстиле обусловлена ростом рынка к интересу адаптированным текстильным материалам, в том числе светящим изделиям и изделиям с мембранными свойствами. В свою очередь ПОВ обладают рядом преимуществ: высокой гибкостью, малой массой, устойчивостью интеграции в текстильные структуры без ухудшения их эксплуатационных свойств. ПОВ делает перспективным материалом для создания умной одежды, медицинских текстильных изделий, спортивной экипировки, средств индивидуальной защиты и дизайнерских световых текстильных решений. Несмотря на активное развитие Smart-текстиля,

технологии получения и адаптации полимерных оптических волокон именно для текстильных применений остаются недостаточно разработанными. Существующие методы производства часто не обеспечивают требуемых показателей гибкости, светопропускания, износостойкости и совместимости с традиционными текстильными процессами (ткачество, вязание, вышивка).

В связи с этим разработка эффективной технологии внедрения ПОВ в структуру текстильного полотна является актуальной научно-технической задачей. Решение данной проблемы позволит расширить функциональные возможности текстильных изделий, повысить уровень их интеллектуализации и конкурентоспособность, а также будет способствовать развитию междисциплинарных исследований на стыке материаловедения, оптики и текстильной инженерии.

Исследования ПТМ с мембранными свойствами обусловлены с возрастающими требованиями к функциональности, комфорту и защитным характеристикам современных текстильных изделий. В условиях развития высокотехнологичных отраслей промышленности, медицины, спорта и средств индивидуальной защиты особую значимость приобретают материалы, способные сочетать высокие барьерные свойства с воздухо- и паропроницаемостью, а также устойчивость к воздействию внешних факторов.

Полимерно-текстильные мембранные материалы представляют собой многокомпонентные системы, в которых текстильная основа обеспечивает механическую прочность и формоустойчивость, а полимерная мембрана - селективную проницаемость по отношению к газам, парам и жидкостям. Несмотря на широкий спектр существующих мембранных материалов, актуальной остаётся проблема оптимизации структуры и технологии их получения, направленной на достижение сбалансированных эксплуатационных характеристик при сохранении технологичности и экономической эффективности производства.

Современные исследования показывают, что свойства мембранных полимерно-текстильных материалов в значительной степени определяются типом полимерной мембраны, способом её формирования и характером взаимодействия с текстильной основой.

При этом недостаточно изучены закономерности влияния технологических параметров нанесения или формования мембраны на комплекс физико-механических, гигиенических и эксплуатационных свойств готового материала. В связи с этим исследование и разработка полимерно-текстильного материала с мембранными свойствами, основанные на научно обоснованном выборе состава и технологии получения, являются актуальной научно-технической задачей. Решение данной задачи позволит расширить теоретические представления о формировании мембранных структур в текстильных материалах и создать предпосылки для разработки новых функциональных материалов с заданными защитными и эксплуатационными характеристиками.

Степень разработанности проблемы.

В области полимерных оптических волокон накоплен существенный объём научных данных, касающихся их физико-химических свойств, оптических характеристик и методов получения. Исследованы основные полимерные материалы для изготовления оптических волокон, такие как полиметилметакрилат и сополимеры на его основе, а также традиционные технологии формования волокон (экструзия, вытяжка, многослойное формование). Эти исследования в значительной степени ориентированы на телекоммуникационные и осветительные приложения и обеспечивают высокий уровень оптических характеристик в условиях стационарной эксплуатации.

В настоящее время авторами Леал-Джуниор, Арнальдо Г. Диас, Камило Р. был разработан датчик, встроенный в интеллектуальный текстильный материал. В материале с помощью оптических волокон имеется возможность контролировать ряд физиологических показателей, включая давление, частоту сердечных сокращений, пульсоксиметрию и частоту дыхания [2]. Исследования Вэй Цзэн продемонстрировали некоторые в своем исследовании полимерное оптические волокна для «умного» текстиля что, некоторые полимерные оптические волокна (ПОВ) обладают рядом полезных качеств, таких как высокая степень гибкости, которая упрощает интеграцию в текстильные изделия [3]. Брит М. Квандт, Мариса С. Пфистер, Йорн Ф. Люббен в исследовании ПОВ могут быть включены в текстильные изделия посредством ткачества, строчки и вышивки, как продемонстрировали несколько исследований [4].

Но лишь небольшое количество исследований Линда Оскарссон, Элизабет Якобсен Хеймдал, Торбьерн Лунделл, [5] было посвящено включению ПОВ в трикотажные архитектуры. Отдельные исследования посвящены разработке светопроводящих текстильных нитей и композитных структур на основе полимерных оптических волокон, однако такие работы носят преимущественно прикладной характер и не формируют целостной научной концепции управления свойствами волокна в системе «полимерное оптическое волокно - текстильная структура». Практически отсутствуют комплексные исследования, направленные на установление взаимосвязей между составом, структурой и свойствами полимерного оптического волокна, получаемого с учётом требований Smart-текстиля

Проблема применения оптических волокон в текстильных материалах рассматривается в научных исследованиях в рамках развития интеллектуальных текстильных систем (Smart-текстиля). Значительное число работ посвящено вопросам интеграции оптических волокон в текстильные структуры для реализации функций передачи света, сигналов и сенсорного мониторинга. При этом основное внимание уделяется конструктивным решениям и областям применения таких материалов, включая медицинские, защитные и дизайнерские текстильные изделия.

В то же время вопросы адаптации полимерных оптических волокон к условиям текстильной переработки и эксплуатации остаются недостаточно разработанными. В литературе ограниченно представлены данные о влиянии технологических параметров получения волокна на его устойчивость к многократным изгибам, трению и динамическим нагрузкам, характерным для текстильных изделий. Недостаточно изучены процессы деградации оптических свойств полимерных волокон при их интеграции в тканые, трикотажные и нетканые структуры.

Таким образом, несмотря на наличие значительного объёма научных исследований в области полимерных оптических волокон и интеллектуальных текстильных материалов, степень разработанности проблемы их целенаправленного использования в Smart-текстиле остаётся недостаточной. Выявленные научные пробелы определяют необходимость проведения диссертационного исследования, направленного на разработку научно обоснованных технологических подходов к получению полимерных оптических волокон с прогнозируемыми и управляемыми оптико-механическими свойствами, адаптированными к требованиям Smart-текстиля.

В научной литературе достаточно широко представлены работы, посвящённые разработке мембранных материалов для специальной, медицинской, спортивной и защитной одежды, в которых рассматриваются общие принципы формирования барьерных и транспортных свойств. Значительный массив исследований посвящён полимерным мембранам как самостоятельным объектам, включая изучение их химического состава, морфологии, механизмов селективной проницаемости и методов получения. Детально рассмотрены различные типы мембранных полимеров, в том числе полиуретаны, фторполимеры, полиэфиры и их модифицированные системы, а также способы формирования мембранных структур. Полученные в этих работах результаты обеспечивают высокий уровень понимания физико-химических процессов формирования мембран.

В то же время исследования полимерно-текстильных мембранных систем как интегрированных многослойных материалов носят преимущественно прикладной характер и в ряде случаев ограничиваются оценкой отдельных эксплуатационных показателей. В литературе недостаточно полно представлены системные исследования, направленные на установление закономерностей формирования структуры мембранного слоя на текстильной основе, а также характера межфазного взаимодействия «полимерная мембрана - текстильная основа».

Анализ научных публикаций показывает, что остаётся недостаточно изученным влияние технологических параметров получения мембранного слоя (состав полимерной композиции, способ нанесения или формования, режимы сушки и термообработки) на комплекс физико-механических, барьерных и гигиенических свойств полимерно-текстильного материала. Кроме того, в существующих исследованиях редко рассматриваются вопросы

долговременной стабильности мембранных свойств при эксплуатационных воздействиях, включая многократные деформации, влаготепловые нагрузки и механический износ.

Таким образом, несмотря на имеющийся большой ассортимент разнообразных водоупорных «дышащих» мембранных текстильных материалов, вопросы технологии их получения, уравновешивания водонепроницаемости с поглощением воды, пропусканием воздуха и паров воды, улучшения функциональных характеристик все еще остаются проблемными. При производстве материала необходимо найти компромисс между водонепроницаемостью и воздухопроницаемостью с противоположным характером [6]. Были проведены исследования по разработке простого и удобного способа получения воздухопроницаемого и паропроницаемого полимерно-текстильного материала, который поглощает, но не пропускает большое количество воды [7]. В качестве текстильного полотна использована махровая хлопковая ткань с односторонним ворсом. Возможность применения полотен из различного сырья и различного переплетения для разработки водоупорных «дышащих» мембранных текстильных материалов остается открытым.

Объектами исследования являются тканевые и трикотажные полотна, изготовленные из хлопковой, полиэфирной и хлопко-полиэфирной пряжи; оптическое волокно представляет собой моно нить с гладкой поверхностью; акриловая эмульсия - 40%-ная водная эмульсия полиметилакрилата (ПМА) белого или светло молочного цвета, производства АО «Навоиазот» (Республика Узбекистан).

Предметом исследования является получение, состав и строение, физико-механические и гигиенические свойства трикотажного полотна с ПОВ, полимерно-текстильных материалов с мембранной функциональностью.

Цель и задачи исследования.

Цель исследования - разработка технологии Smart-текстиля с использованием полимерного оптического волокна и мембранного слоя.

Для достижения поставленной цели предполагается решение следующих задач:

- аналитический анализ современного состояния исследований и технологии в области Smart текстиля с использованием ПОВ, полимерно-мембранным слоев;
- выбор и обоснования способов формирования и исследования трикотажного полотна с ПОВ;
- обоснования и исследования метода получения ПТМ с мембранными свойствами;
- разработка технологии формирования полимерно-мембранных слоев;
- математического планирования второго порядка (план Бокса Хантера) для прогнозирования водоупорности и водопоглощения ПТМ.

Научная новизна исследования заключается в создании усовершенственных, простых технологий Smart текстильных материалов на основе ПОВ, а также ПТМ с мембранными свойствами, в рамках которой:

- экспериментально подтверждена научная концепции Smart текстиля, как многофункционального материала;
- определены технологические параметры получения трикотажного материала с введением ПОВ в качестве уточной нити;
- разработаны научные принципы по получению водоупорных, водопоглощающих, воздуха- и паропроницаемых ПТМ с заданными характеристиками;
- разработаны и научно обоснованы технологии получения Smart текстильных материалов нового поколения с расширенным функциональным назначением.

Практическая ценность работы заключается в придании функциональных свойств ПТМ:

- введение ПОВ в качестве уточной нити в трикотажное полотно придает материалу высокую механическую прочность при растяжении, устойчивость к истиранию, и отличается светоотражающей способностью.
- полимер-текстильный мембранный материал на основе акриловой эмульсии и махровой хлопковой ткани отличается высоким показателем водопоглащения, высокой (материал с односторонним ворсом) и умеренной водоупорностью (материал с двухсторонним ворсом), сбалансированной высокими значениями воздухопроницаемости и паропроницаемости.

Основные положения, выносимые на защиту:

- технология получения и высокая механическая прочность трикотажного полотна с ПОВ в качестве уточной нити;
- технология получения, способ сбалансирования водопоглощения, водоупорности, воздухопроницаемости и паропроницаемости мембранных полимерно-текстильных материалов.

Связь с планом основных научных работ.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с индивидуальным планом докторанта кафедры «Технология и проектирование текстильных материалов» ЮКУ им.М.Ауэзова по образовательной программе 8D07206 - Технология и проектирование текстильных материалов.

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на международных научно-практических конференциях посвящённых современным технологиям текстильного производства, функциональным материалам и инновациям в лёгкой промышленности.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в научных статьях, отражающих результаты разработки структуры Smart-текстиля на основе интеграции полимерного оптического волокна в текстильную основу, исследования влияния мембранного слоя на эксплуатационные свойства материала, а также оценки функциональных характеристик разработанного текстильного изделия.

Апробация результатов исследования. В результате лабораторных испытаний в кафедре «Технология и проектирование текстильных материалов» ЮКУ им.М.Ауэзова и в учебно-испытательной лаборатории «CENTEXUZ» Ташкентского института текстильной и легкой промышленности установлено, что мембранный материал на основе махровой хлопчатобумажной ткани и акриловой эмульсии обладает высокими физико-механическими, гигиеническими и эксплуатационными характеристиками и может быть рекомендован для практического применения. Получен АКТ испытания (Приложения А).

По результатам проведённых испытаний в производственной базе ТОО «ШАБИТЕКС» установлено, что разработанная в рамках диссертационной работы, технология обеспечивает получение текстильного материала с заданным комплексом физико-механических и функциональных свойств. Получен акт опытно-промышленного испытания разработанного материала (Приложения Б).

Публикации. Совместно с консультантами выполнены анализы и интерпретацию экспериментальных данных, обобщены полученные результаты и подготовлены материалы к ниже следующим публикациям:

1. Nargiza Atashikova, Vladimir Solgalov, Abdugani Azimov (2025) Use of polymer optical fibers to determine friction and pressure in special clothes, The Journal of The Textile Institute, VOL 116. NO 12, 2953-2962, DOI: 10.1080/00405000.2025.2468525 Materials Science (miscellaneous) - процентиль 57, квартиль 2 (Scopus). Science Citation Index Expanded (SCIE) Q2, IF 1.5MATERIALS SCIENCE, TEXTILES (Web of Science)

2.N.A. Atashikova, A.S. Rafikov, D.O. Abdusamatova, M.X. Shirinova, A.M. Azimov, N.Y. Botabayev, «Analysis of Waterproof «Breathable» Functional Polymer-Textile Materials Based on Acrylic Emulsion and Various Types of Fabrics» Polymer Engineering & Science: Volume 66, Issue 5, March 2026 66(5):3799-3813, процентиль 80, квартиль 1 (Scopus), Web of Science Q2, https://doi.org/10.1002/pen.70468.

3. Н.А. Аташикова, А.С. Рафиков, К.З. Юнусов, Э. Рамазан, А.М.Азимов. МОДИФИКАЦИЯ ТРИКОТАЖНОГО ПОЛОТНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИМЕРНОГО ОПТИЧЕСКОЕ ВОЛОКНО В SMART ТЕКСТИЛЕ. Научный журнал «Механика и технологии» № 1(91) (2026), 139-147, Тараз.

4. N.A. Atashikova, A.M. Azimov, N.Ye. Botabayev, B.B. Turakulov, D.S. Kadyrova. New generation textile fibers// Вестник науки Южного Казахстана, Специальный выпуск. Изд-во ЮКУ им. М.Ауэзова, Шымкент, 2024, 568-570

5. Н.А. Аташикова, А.М. Азимов, А.С. Рафиков, Н.Е. Ботабаев, Д.С. Кадырова. SMART текстиль как современная тенденция развития // Вестник науки Южного Казахстана, Специальный выпуск. Изд-во ЮКУ им. М.Ауэзова, Шымкент, 2024, 8-10

6. G.A. Jurayeva, N.R. Kadirova, N.A. Atashikova, A.S. Rafikov, Biochemical modification of leather-containing waste for paper and cardboard

production // ICITE– 2024 XI Международная ежегодная конференция «Промышленные технологии и инжиниринг» 14-15 ноября 2024 Шымкент, Казахстан

7. N.A. Atashikova, K.S. Fayzullayeva, D.O. Abdusamatova, A.S. Rafikov, A.M. Azimov. Biochemical and waterproof modification of textile materials // ICITE- 2024 XI Международная ежегодная конференция «Промышленные технологии и инжиниринг» 14-15 ноября 2024 Шымкент, Казахстан

8. Абдусаматова Д.О., Аташикова Н.А., Ширинова М.Х., Нигматова Ф.У. «Получение и свойства водонепроницаемых композиционных слоистых материалов с мембранными свойствами для медицинских простыней», Международная научно-техническая конференция «ИННОВАЦИИ В ТЕКСТИЛЕ, ОДЕЖДЕ, ОБУВИ (ICTAI-2025)» посвященной 60-летию УО «Витебского государственного технологического университета» INTERNATIONAL CONFERENCE ON TEXTILE AND APPAREL INNOVATION ICTAI-2025, 18-19 ноября 2025 года, г. Витебск, Белоруссия.

Структура диссертации состоит из списка нормативных ссылок, терминов и определение, обозначения и сокращения, введения, 4 глав, заключения, а также списка 106 использованных источников. Содержание диссертационной работы изложена на 110 страницах, 11 таблиц, 32 рисунков и приложений.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТКИ И ПРОИЗВОДСТВА SMART ТЕКСТИЛЯ

1.1 Разновидности, получение и применение в текстиле полимерного оптического волокна

Развитие полимерного оптического волокна (POF, Polymer Optical Fiber) в умном-текстиле стало итогом пересечения достижений в сфере оптической связи, полимерных материалов и интеллектуальных текстильных систем. Основной предпосылкой его возникновения стала необходимость создания гибких, лёгких и безопасных сенсорных компонентов, которые можно встроить непосредственно в структуру ткани без ухудшения её функциональных свойств.

История оптических волокон начинается в 1960-х годах, когда были заложены основы волоконно-оптической связи. В 1966 году исследователи Charles Kao и George Hockham подтвердили возможность применения оптических волокон для передачи данных на большие дистанции. Первоначально использовались стеклянные волокна, обладавшие высокими оптическими свойствами, но недостаточно подходившие для текстильных изделий из-за хрупкости и малой гибкости [8].

В 1970–1980-х годах стартовало активное развитие полимерных оптических волокон. По сравнению со стеклянными аналогами они имели большую гибкость, меньшую массу, высокую ударопрочность и простоту обработки. Основными материалами стали полиметилметакрилат (ПМА) и фторированные полимеры. Благодаря этим свойствам ПОВ начали рассматриваться как перспективный материал для носимых устройств и текстильных конструкций [9].

В 1990-х годах развитие концепции смарт-текстиля стимулировало поиск новых функциональных волокон, способных выполнять не только механические, но и информационные задачи. В этот период учёные начали интегрировать полимерные оптические волокна в тканые и трикотажные структуры для создания светящихся материалов, сенсорных покрытий и систем слежения за состоянием человека. Появились первые разработки текстильных изделий с функциями передачи света и регистрации механических воздействий [10].

В начале XXI века сфера применения ПОВ в умном текстиле существенно расширилась. Полимерные волокна начали использоваться для контроля дыхания, сердечного ритма, движений тела, распределения давления и деформации материалов. Их высокая гибкость позволила встроить сенсоры прямо в одежду без потери удобства пользователя. Кроме того, были разработаны боковые светящиеся нити для декоративных и сигнальных функций в одежде, спортивной экипировке и медицинских изделиях [8].

Современный этап развития характеризуется созданием многофункциональных оптических волокон, сочетающих функции передачи света, сенсорики и связи. Исследования направлены на улучшение

чувствительности сенсоров, стойкости к повторным деформациям и интеграции с беспроводными системами передачи данных. Полимерные оптические волокна рассматриваются как один из ключевых компонентов интеллектуальной одежды для медицины, спорта, производственной безопасности и военной сферы [9].

Умный текстиль (смарт-текстиль, интеллектуальные ткани, e-textiles) является одним из наиболее многообещающих направлений современной текстильной индустрии и материаловедения. Под «умным» текстилем понимаются тканевые материалы, способные ощущать внешние воздействия, откликаться на перемены среды и реализовывать добавочные функции в дополнение к обычным характеристикам одежды и полотен. В отличие от стандартных материалов, смарт-текстиль может производить контроль физиологических показателей, пропускать электрические импульсы, запасать энергию, модифицировать характеристики под влиянием тепла, влажности или механического напряжения [11].

За последние два десятилетия заметно интенсивное развитие умного текстильного материала (Smart Textiles), которые представляют собой новое поколение функциональных изделий, способных воспринимать, передавать и обрабатывать информацию о состоянии человека и окружающей среды. Интеграция электронных, сенсорных и коммуникационных компонентов непосредственно в структуру текстильного материала позволяет создавать изделия для медицины, спорта, военной сферы, промышленной безопасности и систем мониторинга.

Текстильная отрасль продолжает активно расти благодаря новым материалам и передовым технологиям. Многие фирмы стараются сделать свою продукцию более экологичной, комфортной и долговечной. На рынке замечена растущая тенденция применения «умных тканей» и текстильных изделий из них. Преимуществами «умных тканей» и изделий являются встроенные датчики или другие электронные компоненты, обладающие функциями терморегуляции, влагоотвода и антибактериального воздействия.

В тренде на «умные» материалы можно выделить шведскую компанию Polygiene, ее разработка тканей с антимикробным покрытием позволяет не впитывать запахи и, соответственно, требуют меньше стирок. Это помогает экономить воду и электроэнергию. Такие ткани особенно востребованы в спортивной и рабочей одежде, где важна гигиеничность и удобство.

В Германии и Южной Корее появились материалы, которые самостоятельно регулируют тепло: сохраняют его в холод и «дышат» в жару. Они применяются в верхней одежде и текстиле для активного досуга.

Также возрастает интерес к экологически безопасным материалам. Например, финская компания Spinnova производит волокна из древесины - без химии и вреда для природы. Эти волокна абсолютно разлагаются и не загрязняют планету. В иных государствах активно применяют грибной мицелий и бактериальную целлюлозу для создания тканей, которые годятся

для модной одежды и аксессуаров. Подобные материалы обретают популярность среди брендов, нацеленных на устойчивое развитие.

Большое значение придается переработке. В Швеции компания Renewcell производит волокно Circulose из старой хлопковой одежды, и его уже применяют известные бренды. Это дает возможность дать вторую жизнь текстильным отходам и уменьшить объемы мусора. В Канаде стартап Debrand содействует магазинам в сборе ненужной одежды, её сортировке и отправке на переработку. Их система сотрудничает с крупнейшими ритейлерами и формирует замкнутый цикл потребления текстиля. В Южной Корее запустили линии, которые самостоятельно разделяют натуральные и синтетические волокна, что ускоряет и облегчает повторное использование тканей. Подобные технологии уменьшают затраты и делают переработку результативнее [1].

Объем мирового рынка умных текстильных систем производства оценивался в 470 миллионов долларов США в 2024 году и, по прогнозам, будет расти со среднегодовым темпом роста 6,6% в период с 2025 по 2034 год благодаря технологическим усовершенствованиям, изменениям в поведении и предпочтениях потребителей, а также общему стремлению отраслей к эффективности и экологичности. Одним из главных факторов этого является увеличивающаяся потребность в функциональном и умном текстиле в сфере здравоохранения, спортивной одежды, обороны, а также в массовой моде[12].

Современный прогресс в текстильной отрасли тесно связан с внедрением функциональных материалов, сенсорных систем и цифровых технологий в саму структуру тканей. Одно из самых многообещающих направлений – разработка Smart-текстиля, то есть интеллектуальных текстильных материалов, способных принимать, транслировать и отвечать на внешние воздействия.

Востребованность создания подобных материалов обусловлена растущим спросом на гибкие носимые системы для медицины, спорта, оборонной промышленности, спасательных служб и охраны труда. Применение полимерного оптоволокна дает возможность реализовать передачу светового сигнала, фиксацию деформаций, температурных перепадов и давления прямо внутри структуры ткани.

«Smart-текстиль» подразделяется на три основные группы: пассивный, активный и интеллектуальный. Пассивные системы способны только регистрировать внешние воздействия, активные реагируют на изменения параметров среды, а интеллектуальные системы выполняют анализ поступающих данных и принимают решения на основе встроенных алгоритмов.

Полимерные оптические волокна, используемые в текстильной промышленности, производятся на основе ограниченного ассортимента полимерных материалов, выбор которых исторически диктовался потребностями телекоммуникационной и светотехнической

промышленности, а не специфическими характеристиками текстильных ручек. Эти условия определяют некоторые фундаментальные различия между оптическими и механическими параметрами волоконной технологии.

Наиболее распространенным материалом для изготовления полимерных сердечников оптических волокон является полиметилметакрилат (ПММА), который обладает высокой оптической прозрачностью в видимом спектре и может быть переработан. Однако обзоры литературы и результаты экспериментальных исследований показали, что при введении волокон ПММА в текстильные структуры реакция определяется не столько их первоначальными оптическими свойствами, сколько чувствительностью материала к многократным изгибам, локальным деформациям и нарушениям поверхности. В условиях структуры ткани, характеризующейся многочисленными микроизгибами, наблюдается быстрое увеличение оптических потерь, обусловленное образованием микротрещин и нарушением сплошности волокна оболочки.

Полистирольные оптические волокна, несмотря на их более высокий показатель преломления, характеризуются пониженной эластичностью и хрупкостью, что серьезно ограничивает возможности их использования в текстильных технологиях, связанных с ткачеством и вязанием. Поэтому использование этих волокон в составе полотна возможно только в качестве жестко закрепленного элемента, что противоречит концепции гибкого функционального текстиля.

Оптические волокна из фторполимера обладают самыми низкими оптическими потерями и повышенной устойчивостью к микродеформациям, но их применение в текстильных изделиях ограничено их высокой стоимостью, сложностью производства и ограниченной совместимостью с традиционными текстильными процессами. Кроме того, недостаточные знания о поведении фторполимерных волокон в условиях длительных циклических нагрузок и эксплуатационных воздействий (стирка, трение, ультрафиолетовое излучение) не позволяют считать их универсальной заменой.

Таким образом, анализ химических систем существующих полимерных оптических волокон показал отсутствие материала, характеристики которого полностью отвечали бы набору требований, предъявляемых к текстильным волокнам. Это свидетельствует о необходимости изменения парадигмы кредитования отрасли оптическими волокнами, связанной со специфическим дизайном полимерных оптических волокон, с учетом структурных, механических и эксплуатационных характеристик текстильных систем.

Оптоволокна играют значимую функцию в создании одежды со светоотражением. Светоотражающие субстанции применяются для улучшения заметности и надёжности при слабой освещённости или в ночное время.

Использование оптических волокон в светоотражающих материалах имеет ряд достоинств. Во-первых, они гарантируют значительную

заметность, что крайне важно для работников – дорожного строительства, спасательным службам и прочими родами деятельности с повышенным риском. Во-вторых, светоотражающие нити могут быть просто внедрены в различные виды обмундирования, включая пиджаки, жилеты, брюки и атрибуты.

SMART - одежда, который имеет добавочные функции и потенциал за счет включения различных систем. Одной из таких систем являются оптические нити, которые способны послужить для выработки особенных и передовых решений в сфере стиля и практичности одежды.

Оптические нити - это тонкие стеклянные или полимерные нити, способные переносить световые импульсы на дальние дистанции. Они состоят из центрального ядра, обычно сделанного из чистого стекла или полимера, и покрытия, которое обволакивает ядро и обладает меньшим коэффициентом преломления.

Оптические волокна могут применяться в умной одежде для генерации разнообразных эффектов и функций. К примеру, их допустимо встроить в текстиль или принадлежности, дабы сформировать световые декорации, вроде сияющих линий, орнаментов или эмблем.

Помимо этого, оптические волокна могут быть задействованы для создания сопрягаемых компонентов в одежде. Например, их можно интегрировать в рукавицы или пиджаки, чтобы получить чувствительные плоскости, которые откликаются на касания или перемещения носителя. Это дает возможность конструировать неповторимые и взаимодействующие средства управления.

Оптические волокна - одна из ключевых технологий в современной фотонике и находят широкое применение в различных секторах промышленности. В текстильной индустрии оптические волокна играют важную роль, давая возможность создавать инновационные материалы и улучшать свойства текстильных изделий. Достоинства применения оптических волокон в текстильной промышленности:

1. Высокая пропускная способность: Оптические волокна располагают высокой пропускной способностью для света, что дает возможность передавать данные на значительные расстояния без потерь качества сигнала.

2. Малый вес и эластичность: Оптические волокна имеют небольшой вес и гибкую структуру, что делает их идеальными для использования в текстильной промышленности. Они могут быть легко вплетены в материю или использованы для создания особых эффектов и орнаментов.

3. Стойкость к воздействию внешних факторов: Оптические волокна обладают высокой устойчивостью к влиянию влаги, жары, химических веществ и механических дефектов. Это позволяет задействовать их в различных условиях производства текстильных изделий.

4. Возможность передачи сведений: Оптические волокна могут применяться для передачи данных и информации в текстильной

промышленности. К примеру, они могут быть задействованы для передачи сведений о состоянии ткани, ее качестве или процессе производства.

Использование оптоволокна в текстильном производстве:

1. Освещение: Оптические волокна могут применяться для формирования освещения в текстильных предметах. Нити световодов могут быть вплетены в полотно или задействованы для создания световых эффектов и орнаментов.

2. Украшающие эффекты: Оптоволокна могут быть задействованы для создания декоративных эффектов на текстильной продукции. К примеру, они могут применяться для формирования светящихся узоров или рисунков на одежде или принадлежностях.

3. Умная одежда: Оптические волокна могут быть использованы для создания «умной» одежды, которая способна изменять свой цвет или сиять в зависимости от внешних обстоятельств или состояния владельца.

4. Контроль качества: Оптоволокна могут быть применены для проверки качества изготовления текстильных изделий. Например, их могут задействовать для измерения толщины материи или установления ее плотности.

5. Одежда с контролем температуры: Оптические волокна могут быть использованы для создания одежды с терморегуляцией, которая может адаптироваться к температуре окружения и поддерживать удобный уровень тепла для носящего.

В общем, применение оптических волокон в текстильном производстве раскрывает новые возможности для создания новаторских и функциональных текстильных продуктов.

Одной из основных научно-технических задач является обеспечение использование оптического волокна с традиционными текстильными технологиями.

Наиболее распространёнными методами интеграции являются:

• вплетение волокон в основу ткани;
• включение в уточную систему;
• трикотажное формирование структур;
• машинная вышивка;
• многослойное склеивание.

Исследования показывают, что характеристики передачи света существенно зависят от радиуса изгиба волокна, плотности переплетения нитей и механических нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации.

Нами был использован метод интеграции полимерного оптического волокна в уточную систему трикотажного полотна.

Трикотаж - вязаный текстильный материал или изделие, полученное путем сцепления петель. В состав трикотажа могут входить естественные ткани (шерсть, хлопок, лён, шёлк) и синтетические (вискоза, лайкра, полиэстер и другие) волокна, которые получены благодаря различным методам обработки и типам переплетений. Разнообразные виды трикотажа

отличаются по строению и сфере применения. Если речь идёт о трикотаже как о текстиле, то это может быть ткань для детской или взрослой одежды.

Основные характеристики:

- Петельное плетение: В отличие от ткани, состоящей из сплетенных нитей основы и утка, трикотаж образуется из связанных петель.

- Эластичность и тягучесть: Благодаря петельной структуре полотно хорошо тянется, облегает тело и не стесняет движений.

- Воздухопроницаемость: Ткань превосходно пропускает воздух и впитывает влагу, что делает её комфортной для ношения.

- Нежность: Поверхности приятны на ощупь и не причиняют дискомфорта коже.

- Универсальность: Может выпускаться как из одного типа волокон (натуральных или синтетических), так и из комбинированных нитей для достижения разнообразных качеств.

Плюшевое переплетение - это вид вязаного переплетения, в результате которого получается ткань с разрезным или неразрезным ворсом. Отличительная особенность: пушистость, мягкость и бархатистая поверхность, которая формируется за счет добавочных петель ворса, вытянутых на одну сторону трикотажа.

Трикотажные полотна, в силу их универсальности, нежности и комфорта, занимают значимое место в текстильной индустрии и повседневной жизни. Широкий спектр типов трикотажа дает возможность использовать их для производства разнообразной одежды – от легких летних платьев до теплых спортивных комплектов и обыденной одежды. Комбинация натуральных и синтетических волокон в структуре трикотажа обеспечивает оптимальный баланс между уютом, прочностью и долгим сроком службы. При производстве такого трикотажа задействуются две системы нитей. Одна система образует основу полотна, а вторая – начес.

В процессе плетения особые приспособления вытягивают пуховые нити на изнаночную сторону, формируя короткие петли.

Отталкиваясь от технологии, эти петли могут оставаться целыми (как в махровом полотне) или рассекаться, создавая пушистый и нежный ворс.

Отличия от прочих переплетений. От махрового: хотя плюшевая ткань тоже содержит ворс, в этом плетении ворс формируется более толстыми и длинными петлями, которые нередко рассекают, образуя более мягкую и объёмную фактуру. От футера: в отличие от футера, где ворс возникает за счет протяжек с изнаночной стороны, плюшевое переплетение создает ворс с лицевой части полотна.

Свойства и применение. Благодаря своей структуре, плюшевый трикотаж обладает превосходными теплоизоляционными свойствами, мягкостью и комфортом. Он широко используется для создания детской одежды, игрушек (так называемых "плюшевых изделий"), домашнего текстиля (покрывал, пледов) и декоративных элементов.

Нынешнее развитие «умного» текстиля сопряжено с прорывами в области нанотехнологий, функциональных полимеров, микроэлектроники и науки о материалах. В недавние годы изыскания сфокусированы на разработке гибких датчиков, токопроводящих нитей, автономных энергетических систем и носимых электронных устройств, встраиваемых прямо в тканевые конструкции[13].

В течение ряда лет умный текстиль был быстро развивающейся технологией, и его рынок расширялся. Оптические волокна могут быть включены в эти ткани в качестве датчиков для различных целей, включая анализ положения, занятость сидений в автомобильном секторе и мониторинг конструкций в гражданском строительстве [14]. Однако в мире медицинского текстиля эти материалы представляют наибольший интерес. Умный текстиль используется в различных мониторинговых и терапевтических приложениях в области здоровья и благополучия, что позволяет включать измерение физиологических показателей в повседневную жизнь или конкретную деятельность [15]. Кроме того, эти ткани позволяют измерять поверхность кожи, не испытывая при этом боли.

Умный текстиль для измерения здоровья и благополучия может быть создан разными способами [16]. Датчики могут быть изготовлены из пьезоэлектрических или пьезорезистивных материалов [17]. Использование оптических волокон из-за их сенсорных свойств открывает новые возможности в области умного текстиля, однако ему уделяется меньше внимания, чем пьезорезистивному эффекту [18].

Одной из базовых работ в данной сфере является исследование, посвящённое интеллектуальным техническим текстильным материалам на основе волокно-оптических датчиков. Автор [19] рассматривает принципы функционирования разных типов оптических сенсоров, способы их интеграции в текстильные структуры и перспективы практического использования. Показано, что волокно-оптические технологии дают возможность создавать текстильные материалы, способные фиксировать деформации, давление, температуру и иные физические параметры. Особое внимание уделено применению волоконных брэгговских решёток и интенсивностных датчиков, обеспечивающих высокую точность измерений при сохранении гибкости текстильного изделия. Автор отмечает, что интеграция оптических волокон непосредственно в структуру ткани обеспечивает повышение надёжности измерений в сравнении с поверхностным размещением сенсорных элементов. А также авторы [20] отмечают, что развитие Smart-текстиля связано с интеграцией электронных компонентов непосредственно в структуру волокон, нитей и тканых материалов. В работе рассмотрены основные подходы к созданию текстильных сенсорных систем, включающие применение проводящих нитей, гибких электронных компонентов, оптических волокон и миниатюризированных измерительных приборов. По мнению исследователей, одним из главных требований к интеллектуальным

текстильным изделиям является обеспечение высокой гибкости, малой массы и устойчивости к механическим воздействиям. Обычные электронные датчики зачастую не соответствуют данным требованиям из-за ограниченной деформируемости и восприимчивости к изгибам. В связи с этим особый интерес вызывают волоконно-оптические технологии, позволяющие создавать сенсорные компоненты непосредственно внутри структуры текстильного материала. В обзоре авторы подчёркивают, что перспективным направлением является использование оптических волокон в качестве элементов передачи данных и чувствительных компонентов датчиковых систем. Волоконно-оптические сенсоры обладают рядом достоинств, включая устойчивость к электромагнитным помехам, возможность удалённого контроля, высокую чувствительность и безопасность эксплуатации. Эти качества делают их особенно привлекательными для применения в медицинском текстиле, спортивной одежде и средствах индивидуальной защиты.

Известно, что датчик, применяемый на теле человека, должен быть не только комфортным для длительного ношения, но и не мешать его нормальной жизнедеятельности. По мнению авторов [21], для этих целей идеально подходят волоконно-оптические полимерные сенсоры. Полимерные волоконно-оптические датчики обладают высокой гибкостью при изгибе и выдерживают высокие деформационные нагрузки. В качестве полимерных оптических волокон часто используют полидиметилсилоксан, полиметилметакрилат, мягкое стекло, полиперфторбутенилвинил и др. [22, 23]. Установлено, что полимерные оптические волокна, изготовленные из этих материалов, обладают превосходной биосовместимостью и коррозионной стойкостью, а первоначальные характеристики сохраняются даже после длительного использования. Авторы работы [24] свидетельствуют об удовлетворительном использовании полимерных оптических волокон для мониторинга сердечного ритма и кровотока. Показано, что коэффициент оптического трения ткани с ПОВ значительно ниже, чем у традиционного медицинского белья.

Существенный вклад в развитие полимерных оптических волокон внесли авторы [25], разработавшие температурный датчик на основе макроизгиба полимерного оптического волокна. В исследовании установлено, что изменение температуры приводит к изменению интенсивности передаваемого светового сигнала вследствие изменения характеристик изгиба волокна. Авторами экспериментально подтверждена возможность создания недорогих и высокочувствительных температурных сенсоров на основе полимерных оптических волокон. В отличие от кварцевых аналогов, полимерные волокна отличаются повышенной гибкостью и стойкостью к механическим воздействиям, что делает их особенно перспективными для применения в текстильных структурах. Результаты работы указывают на возможность создания интеллектуальной

одежды, способной осуществлять непрерывный мониторинг температурных параметров человека и окружающей среды.

Авторы [26] сообщили о вшитом в спортивную одежду оптоволоконном датчике, позволяющем отслеживать движение локтевого сустава человека по движению туловища. Эта неконтролируемая система мониторинга в реальном времени была протестирована для успешного отслеживания ударов в гольфе.

В работе [27] показана возможность использования полимерных волоконно-оптических датчиков для мониторинга и контроля сгибания суставов пальцев, кистей и коленей. По мнению авторов, именно этот датчик будет широко использоваться в некоторых видах спорта, лечении суставов и мониторинге тремора при болезни Паркинсона.

Авторы работы [28] сообщили об успешном использовании полимерных оптических волокон для полноценного мониторинга температуры тела, частоты сердечных сокращений и частоты дыхания. Возможность использования полимерных оптических волокон для управления температурой тела, дыханием и частотой сердечных сокращений подтверждена этими авторами в другой работе [29].

В настоящее время с помощью оптических волокон возможно контролировать ряд физиологических показателей, включая давление, частоту сердечных сокращений, пульсоксиметрию и частоту дыхания [2]. Фактически, некоторые полимерные оптические волокна (ПОВ) обладают рядом полезных качеств, таких как высокая степень гибкости, которая упрощает интеграцию в текстильные изделия [3]. ПОВ могут быть включены в текстильные изделия посредством ткачества, строчки и вышивки, как продемонстрировали несколько исследований [4]. Но лишь небольшое количество исследований [5] было посвящено включению ПОВ в трикотажные архитектуры.

Значительный практический интерес представляет работа, посвящённая внедрению волоконно-оптических датчиков в медицинский текстиль. Авторами [30] предложены конструкции текстильных изделий, содержащих интегрированные оптические сенсоры для контроля физиологических параметров человека. Исследование показало возможность регистрации дыхательных движений, изменений позы тела и других биомеханических параметров с высокой точностью и в реальном времени. В работе подчёркивается, что текстильные системы с интегрированными оптическими волокнами обладают высокой комфортностью для пользователя и могут эксплуатироваться в течение длительного времени без существенного снижения эксплуатационных свойств.

Способность ПОВ напрямую интегрироваться во время промышленной переработки, подобно тому, как это происходит с основной текстильной пряжей, является одним из наиболее важных требований, а это означает, что ПОВ должны учитывать ограничения, связанные с обработкой текстиля.

В работе авторов [31] исследована возможность интеграции полимерных оптических волокон в трикотажную структуру носка для регистрации давления и сил трения. Актуальность данного исследования обусловлена необходимостью разработки сенсорных текстильных изделий, которые сохраняют свойства традиционного трикотажа и одновременно обеспечивают получение информации о механических воздействиях при эксплуатации.

В работе [18] изучены особенности использования гибких пластиковых оптических волокон в технологии машинной вышивки для создания текстильных дисплеев. Авторы провели анализ воздействия параметров вышивки на эффективность светового излучения текстильной поверхности. Установлено, что способ закрепления волокна, плотность стежков и геометрия размещения оказывают существенное влияние на яркость и равномерность распределения светового потока. Полученные данные показали возможность формирования гибких светоизлучающих поверхностей на текстильной основе без существенного ухудшения механических характеристик материала. Исследование продемонстрировало высокий потенциал технологии машинной вышивки для создания информационных и декоративных текстильных систем нового поколения.

Одним из перспективных направлений развития интеллектуального текстиля является применение полимерных оптических волокон (Polymeric Optical Fibre, POF) для создания функциональных текстильных структур с возможностью передачи световых сигналов и реализации интерактивных свойств. Авторы [32] исследовали возможность разработки текстильных материалов на основе полимерных фотонных волокон, ориентированных на использование в интерьерных изделиях. Авторами предложена концепция интеграции ПОВ в текстильную структуру с целью формирования светящихся и интерактивных поверхностей, что расширяет функциональные возможности традиционных текстильных материалов. Особое внимание в работе уделено конструкционным особенностям формирования волоконно-текстильных композиций и обеспечению эффективного взаимодействия между оптическим волокном и текстильной основой. Полученные результаты показывают перспективность применения полимерных оптических волокон не только в декоративных материалах, но и в создании интеллектуальных текстильных систем, способных выполнять функции визуальной индикации, передачи информации и взаимодействия с пользователем. Данное направление является основой для дальнейшего развития носимых электронных устройств и умного текстиля, где оптические волокна рассматриваются как один из ключевых компонентов для интеграции сенсорных и коммуникационных функций непосредственно в структуру материала.

Дальнейшее развитие данного направления представлено в диссертации [33], посвящённой созданию новых тканых структур для интеграции полимерных оптических волокон. Автором предложены

конструктивные решения, обеспечивающие устойчивую фиксацию оптических волокон в структуре ткани при сохранении их светопроводящих свойств. Особое внимание уделено вопросам совместимости волокон с процессами ткачества, распределению механических нагрузок и предотвращению повреждений волокон в ходе эксплуатации. Результаты исследования показали, что выбор переплетения оказывает ключевое влияние на оптические характеристики текстильной системы, её гибкость и долговечность. Предложенные тканые структуры позволяют создавать функциональные текстильные материалы для медицинских, спортивных и защитных изделий, а также для систем визуальной индикации.

Существенный вклад в развитие технологий светоизлучающих текстильных материалов внесён авторами [34], осуществлён комплексный анализ существующих методов получения полимерных оптических волокон с боковым световыводом. В обзоре изучены различные технологические подходы к созданию рассеивающих поверхностей, включая механическую обработку, лазерную модификацию, химическое травление и структурное изменение оболочки волокна. Установлено, что технология бокового световывода является ключевым фактором при создании светоизлучающих текстильных систем, поскольку обеспечивает равномерное распределение света по длине волокна. Авторы отмечают, что подобные волокна находят обширное применение в сигнальной одежде, интерьерном текстиле, медицинских изделиях и элементах визуальной коммуникации.

Одним из перспективных направлений является применение трибоэлектрического эффекта для разработки текстильных сенсоров прикосновения. В работе [35] предложена конструкция проводящих нитей, покрытых фторполимерной оболочкой, которая даёт возможность использовать трибоэлектрический эффект для регистрации касаний без применения внешнего источника питания. Авторы продемонстрировали, что сочетание проводящего сердечника и фторполимерного покрытия обеспечивает высокую чувствительность сенсора, стабильность сигнала и устойчивость к повторным механическим воздействиям. Особое значение данной работы заключается в демонстрации возможности создания полностью текстильных сенсорных элементов, сохраняющих гибкость и пригодность для промышленного производства одежды. Вместе с тем исследование в основном сосредоточено на лабораторной оценке характеристик сенсоров, тогда как вопросы долговечности при длительной эксплуатации и воздействии внешних факторов требуют дальнейшего изучения.

В исследовании авторов [36] рассматривается влияние структуры гибридных тканых материалов на их электрические характеристики. Авторы анализируют взаимосвязь между параметрами строения ткани и показателями электрического сопротивления, что имеет важное значение для проектирования электропроводящих текстильных материалов с заданными функциональными свойствами. Основное внимание уделено изучению

влияния типа переплетения и количества токопроводящих нитей на поверхностное и объемное электрическое сопротивление тканей. В традиционных текстильных материалах большинство природных и синтетических волокон обладают низкой электрической проводимостью, что ограничивает их применение в электронных системах. Для придания текстилю электропроводящих свойств используются различные подходы: нанесение проводящих покрытий, введение металлических волокон, использование углеродных материалов и интеграция специальных токопроводящих нитей непосредственно в структуру ткани. Однако при создании гибридных тканей важным фактором становится не только состав материала, но и архитектура текстильной структуры, поскольку она определяет контакт между проводящими элементами и формирование электрических путей внутри полотна. Авторы показали, что электрические свойства гибридных тканей определяются совокупностью структурных факторов. Было установлено, что увеличение доли проводящих нитей способствует снижению электрического сопротивления, однако данный параметр не является единственным определяющим фактором. Существенное влияние оказывает тип переплетения ткани, который изменяет расположение проводящих элементов, площадь их контакта и качество соединения между токопроводящими участками. Таким образом, структура ткани становится одним из ключевых инструментов управления электрическими характеристиками текстильного материала. Особое значение в работе уделено исследованию поверхностного сопротивления, которое зависит от профиля поверхности ткани и контакта между проводящими нитями и измерительными электродами. Авторы отмечают, что недостаточный контакт приводит к увеличению сопротивления, тогда как улучшение контактного взаимодействия обеспечивает более стабильные электрические характеристики. Кроме того, была выявлена связь между электрическим сопротивлением и такими структурными параметрами, как коэффициент заполнения ткани, площадь поверхности проводящих волокон и длина участков перекрытия проводящих нитей в структуре переплетения. Исследование демонстрирует, что управление параметрами ткачества может быть эффективным способом регулирования функциональных свойств текстиля без значительного изменения его состава.

Фундаментальный обзор применения оптических волокон в фотонном текстиле представлен в работе [37]. Авторы рассматривают главные типы оптических волокон, способы их внедрения в текстильные структуры, а также области практического использования. Особое внимание уделено разработке фотонных текстильных систем для медицинского наблюдения, носимой электроники, коммуникационных технологий и интерактивных изделий. В работе детально разбираются особенности взаимодействия света с текстильной структурой, вопросы механической прочности волокон и перспективы формирования полностью интегрированных фотонных тканей. Авторы подчеркивают, что дальнейшее развитие этого направления связано с

улучшением технологий выпуска гибких оптических волокон и повышением их стойкости к многократным изгибам и стирке.

В обзорной статье авторов [38] рассматривается современная эволюция умного текстиля в контексте применения для улучшения процессов заживления кожи. Авторы анализируют путь развития таких материалов - от выбора исходного волокна и методов формирования текстильной структуры до создания функциональных систем, способных обеспечивать контролируемое взаимодействие с биологическими тканями. Работа отражает междисциплинарный характер современных исследований, объединяющих материаловедение, биоинженерию, медицину и технологии производства текстиля. Одним из ключевых направлений, рассмотренных в исследовании, является переход от пассивных перевязочных материалов к активным интеллектуальным системам. Традиционные текстильные покрытия для ран выполняют преимущественно барьерную функцию, предотвращая проникновение внешних загрязнений и поддерживая необходимый уровень влажности. Однако современные умные текстильные материалы обладают дополнительными возможностями: они способны контролировать параметры раневой среды, реагировать на изменения температуры, влажности и уровня биохимических показателей, а также обеспечивать локальное воздействие на процесс восстановления тканей.

Авторы подчёркивают, что функциональность умного текстиля определяется свойствами исходных волокон, архитектурой материала и методами модификации поверхности. Для создания биомедицинских текстильных систем используются различные природные и синтетические полимеры, обладающие биосовместимостью, способностью к формированию волокнистых структур и возможностью регулирования механических характеристик. Особое внимание уделяется разработке волокон и покрытий, которые обеспечивают оптимальные условия для миграции клеток, формирования новой ткани и ускорения регенерационных процессов. Важным аспектом современных исследований является интеграция сенсорных и электронных компонентов в текстильные структуры. Электропроводящие волокна, наноматериалы и гибкие электронные элементы позволяют создавать текстильные системы мониторинга, которые могут осуществлять непрерывное наблюдение за состоянием раны без необходимости снятия перевязочного материала. Такой подход способствует развитию персонализированной медицины, поскольку позволяет получать информацию о процессе заживления и своевременно корректировать терапевтическое воздействие.

Кроме сенсорных функций, значительное внимание уделяется созданию текстильных материалов с активными лечебными свойствами. В современных разработках применяются системы контролируемого высвобождения лекарственных веществ, антибактериальные покрытия и биологически активные компоненты, направленные на снижение риска инфекции и ускорение восстановления повреждённых тканей. Интеграция

таких функций в текстильную основу позволяет объединить защитные и терапевтические свойства в одном материале.

Авторы показывает, что развитие умного текстиля для заживления кожи связано не только с совершенствованием отдельных компонентов, но и с созданием комплексных «волокно-структура-функция» систем. Такой подход позволяет проектировать материалы с заранее заданными характеристиками: необходимой механической прочностью, воздухопроницаемостью, биосовместимостью и способностью реагировать на изменения биологической среды.

Несмотря на значительные достижения в данной области, авторы отмечают существующие проблемы, ограничивающие широкое применение умных текстильных медицинских систем. К ним относятся необходимость повышения стабильности функциональных компонентов, обеспечение долгосрочной безопасности материалов, снижение стоимости производства и разработка методов масштабирования технологий. Кроме того, требуется дальнейшее изучение взаимодействия интеллектуальных текстильных структур с живыми тканями для подтверждения их эффективности в клинических условиях.

Проведенное изучение выявило, что полимерные оптические нити являются перспективным классом материалов, обладающим обширными возможностями применения в современной текстильной индустрии. Анализ имеющихся разновидностей полимерных оптических нитей позволил установить, что их градация определяется используемыми полимерными субстанциями, конструктивными особенностями и служебным предназначением. Наиболее распространёнными субстанциями для их изготовления являются полиметилметакрилат, поликарбонат и фторированные полимеры, обеспечивающие необходимые оптические и механические характеристики.

Исследование технологий производства полимерных оптических волокон выявило, что улучшение процессов экструзии, вытяжки и формирования внешней оболочки благоприятствует повышению светопроводящих свойств, гибкости и износостойкости волокон. Усовершенствование методов изготовления дает возможность получать материалы с улучшенными рабочими качествами и расширяет потенциал их интеграции в текстильные изделия различного назначения.

Установлено, что интеграция полимерных оптических волокон в текстильные полотна открывает новые пути создания функциональных и "умных" тканей. Их применение обеспечивает потенциал передачи света, визуализации данных, контроля условий окружающей среды и состояния человека, а также воплощения эстетических и оформительских задумок. Особую важность подобные материалы обретают в медицинском, защитном, спортивном и специализированном текстиле.

Результаты исследования утверждают, что слияние текстильных технологий с волоконно-оптическими системами способствует созданию

нового поколения высокотехнологичных материалов, удовлетворяющих современным требованиям цифровизации и инновационного развития индустрии. Последующие исследования в сфере улучшения световых характеристик, сопротивляемости механическим нагрузкам и совершенствования методов встраивания волокон в текстильные структуры являются важным условием расширения областей практического применения полимерных оптических волокон.

Таким образом, полимерные оптические волокна считаются многообещающим материалом для развития интеллектуального текстиля и проектирования многофункциональных изделий с улучшенными эксплуатационными характеристиками, что подтверждает актуальность и научно-практическую важность дальнейших изысканий в данной сфере.

1.2 Полимерно-текстильные мембранные материалы

Развитие полимерно-текстильных мембранных материалов в умном текстиле обусловлено необходимостью создания изделий, способных одновременно обеспечивать защитные, физиолого-гигиенические и адаптивные функции. Традиционные текстильные материалы не всегда удовлетворяли требованиям по влагозащите, воздухопроницаемости, терморегуляции и устойчивости к внешним воздействиям. В связи с этим во второй половине XX века началось активное внедрение полимерных мембран в структуру текстильных материалов, что позволило существенно расширить их функциональные возможности.

Первоначально мембранные технологии использовались главным образом для создания водонепроницаемой и одновременно паропроницаемой одежды. Наиболее важным этапом стало внедрение микропористых и гидрофильных мембран на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), полиуретана (ПУ) и полиэфирных материалов. Мембранные системы гарантировали селективный перенос водяного пара при сохранении барьерных свойств по отношению к воде и загрязнителям. В дальнейшем развитие мембранных технологий привело к формированию концепции функционального и технического текстиля [39].

Переход к смарт-текстилю был сопряжён с интеграцией в мембранные структуры материалов, способных реагировать на изменение параметров внешней среды. Существенное значение приобрели термочувствительные полимеры, полимеры с памятью формы, фазопереходные материалы и стимулочувствительные покрытия. Такие системы способны изменять свою проницаемость, теплоизоляционные свойства и влагообмен в зависимости от температуры, влажности или механического влияния [40].

Современный этап развития характеризуется созданием интеллектуальных мембранных материалов, объединяющих защитные и сенсорные защиты. Мембранные слои применяются как носители для проводящих полимеров, сенсоров и электронных деталей, которые

обеспечивают отслеживание физиологических параметров человека и состояния окружающей среды. Особый акцент делается на создании многослойных мембранных структур для медицинского текстиля, спортивной одежды, военного снаряжения и средств персональной защиты. В последнее время исследования нацелены на разработку многофункциональных мембранных платформ, объединяющих воздухопроницаемость, влагорегулирование, антибактериальные свойства, умение к самовосстановлению и передачу данных. Развитие нанотехнологий и носимой электроники содействует интеграции сенсоров непосредственно в мембранные текстильные структуры. Это даёт возможность рассматривать полимерно-текстильные мембранные материалы как одно из ключевых направлений развития умного текстиля нового поколения [41].

Мембранные свойства полотна - сочетание водонепроницаемости и паропроницаемости («дышащих» качеств). Это значит, что материя оберегает от наружной влаги (дождя, снега), но в то же время дает выходить испарениям из организма (поту). Помимо этого, подобная ткань обладает такими характеристиками как, высокой прочностью и долговечностью.

Ключевые свойства мембранной ткани:

Водонепроницаемость. Мембранное полотно не дает воде (дождю, снегу) проникать внутрь, что делает его идеальным для верхней и спортивной одежды. Критерий водонепроницаемости измеряется в миллиметрах водяного столба. К примеру, 3000 мм выдерживает умеренный дождь, а 20 000 мм - сильный ливень и штормовые условия.

Паропроницаемость (способность «дышать»). Это свойство мембраны выпускать наружу пар, испаряемый телом. Так предупреждается застой влаги и перегрев, что гарантирует удобство. Паропроницаемость оценивается в объёме влаги (в граммах), который один квадратный метр полотна пропускает за сутки. Чем выше значение, тем лучше «дышит» материал.

Ветрозащита. Структура мембраны препятствует движению ветровых потоков, способствуя сохранению тепла, генерируемого телом.

Малый вес и гибкость. Нынешние мембранные материи, зависимо от вида, могут быть весьма лёгкими и податливыми, что дарует свободу перемещений.

Прочность и стойкость к износу. Многие мембраны имеют высокую сопротивляемость к трению и служат долго, что ценно для спортивной и походной одежды.

Имеется два основных вида мембран, которые определяют принцип действия:

Микропористые мембраны. Обладают микроскопическими порами, которые достаточно велики, чтобы пропускать молекулы водяного пара (испарины), но слишком мелки, чтобы пропускать капли влаги.

Беспористые мембраны (гидрофильные). Эти мембраны функционируют по-другому: они впитывают влагу (испарение) с внутренней стороны и выводят её наружу, где она испаряется.

Свойства мембран ткани нашли широкое применение в изготовлении: спортивной экипировки; снаряжения для туризма и походов; рабочей формы; детской одежды.

Мембранные материалы, со своей стороны, гарантируют влагозащиту, вентиляцию и механическую сохранность, что значительно расширяет потребительские свойства Smart-текстиля.

Акриловые эмульсии занимают ключевое место в развитии современных смарт-текстильных материалов благодаря сочетанию высокой адгезии к волокнистым субстратам, эластичности, устойчивости к атмосферным воздействиям и возможности модификации функциональными компонентами. Предпосылкой их внедрения в текстильную промышленность стала потребность в создании покрытий и связующих материалов, способных не только улучшать эксплуатационные характеристики тканей, но и обеспечивать дополнительные функциональные особенности [42].

История развития акриловых эмульсий берет начало в середине XX века с активного внедрения воднодисперсионных акриловых полимеров в лакокрасочной и текстильной промышленности. Развитие технологий эмульсионной полимеризации дало возможность получать устойчивые полимерные дисперсии с регулируемыми физико-механическими характеристиками. Значительный вклад в теорию и практику синтеза акриловых эмульсий внесли исследования, описанные в докторской диссертации M. Slawinski, посвящённой особенностям включения акриловой кислоты в эмульсионные полимеры и управлению свойствами акриловых латексов [43].

В текстильной промышленности акриловые эмульсии первоначально применялись в качестве связующих веществ при нанесении пигментных покрытий, пропиток и финишных составов. Их использование обеспечивало повышение износостойкости, устойчивости к стирке и сохранение декоративных свойств тканей. В дальнейшем возможности химической модификации акриловых полимеров позволили создавать покрытия с водоотталкивающими, антибактериальными, антистатическими и защищающими от ультрафиолета свойствами [44].

Переход к концепции умного текстиля произошёл благодаря развитию функциональных покрытий на основе акриловых эмульсий. В таких системах акриловая матрица стала применяться как носитель микрокапсул, проводящих наполнителей, фазопереходных материалов и сенсорных элементов. Акриловые связующие обеспечивали надёжную фиксацию функциональных частиц на поверхности волокон и сохраняли гибкость текстильного материала. Исследования показывают, что акриловые связующие являются одними из наиболее распространённых компонентов при создании интеллектуальных текстильных покрытий и микрокапсулированных систем [45].

Современный этап развития характеризуется применением акриловых эмульсий для создания многофункциональных покрытий в портативной

электронике и умной одежде. Акриловые полимеры используются в качестве матриц для проводящих полимеров, сенсорных элементов, систем терморегуляции и защитных мембран. Благодаря высокой технологичности и экологической безопасности водных дисперсий акриловые эмульсии считаются перспективной основой для создания гибких электронных текстильных платформ [46].

В работе [47] исследовано влияние акрилового покрытия на поверхностные и физические свойства тканых материалов с различными структурными параметрами. Авторы рассматривают акриловое покрытие как способ целенаправленной модификации текстильных материалов, позволяющий улучшить их эксплуатационные и эстетические характеристики. Основное внимание в исследовании уделено изменению шероховатости поверхности, коэффициента трения, воздухопроницаемости, паропроницаемости, теплового сопротивления и показателей грифа ткани после нанесения акрилового покрытия.

Проведенные исследования показали, что нанесение акрилового покрытия оказывает существенное влияние на состояние поверхности ткани. После обработки наблюдалось общее снижение параметров поверхностной шероховатости и коэффициента трения. При этом степень изменения данных показателей зависела от структуры исходной ткани и ее конструктивных параметров. Это свидетельствует о том, что свойства готового полимерно-текстильного материала определяются не только характеристиками используемого покрытия, но и строением текстильной основы. Одновременно было установлено, что акриловое покрытие изменяет проницаемостные характеристики материалов. В частности, после нанесения покрытия отмечалось снижение воздухопроницаемости и паропроницаемости. Авторами также выявлено уменьшение показателя теплового сопротивления. Полученные результаты имеют важное значение при разработке функциональных текстильных материалов, поскольку проницаемость определяет способность материала обеспечивать перенос воздуха и водяного пара, а следовательно, влияет на комфорт изделия при эксплуатации. Значительные изменения были выявлены и в показателях грифа ткани. После акрилового покрытия увеличивалась жесткость при изгибе, тогда как угол восстановления после смятия уменьшался. Таким образом, полимерное покрытие способствует формированию более жесткой структуры материала и изменяет его деформационные характеристики. Данный эффект необходимо учитывать при выборе текстильной основы и параметров покрытия для материалов, предназначенных для изделий, где важны гибкость и тактильный комфорт. Особый интерес результаты данной работы представляют для разработки влагопроницаемых и защитных полимерно-текстильных материалов. С одной стороны, акриловое покрытие позволяет получить более гладкую поверхность с меньшим коэффициентом трения, а с другой - может снижать воздухопроницаемость и паропроницаемость ткани. Поэтому при создании функциональных

материалов необходимо находить оптимальное соотношение между защитными свойствами покрытия и сохранением физиолого-гигиенических характеристик текстильной основы.

Важным результатом исследования является подтверждение зависимости эксплуатационных свойств покрытого материала от структурных параметров исходной ткани. Авторы отмечают, что при выборе основы для акрилового покрытия необходимо учитывать ее строение и предполагаемую область применения готового материала. Такой подход позволяет рационально подбирать текстильную основу и параметры покрытия с учетом требуемых показателей проницаемости, поверхностных характеристик и грифа ткани. Авторы [47] показали, что акриловая обработка является эффективным способом изменения комплекса поверхностных и физических свойств тканых материалов. Полученные результаты подтверждают перспективность применения акриловых полимеров при создании функциональных текстильных материалов, однако одновременно указывают на необходимость оптимизации состава и параметров покрытия для сохранения требуемой воздухопроницаемости, паропроницаемости и комфортности материала. Исследование может служить основой для дальнейшей разработки акриловых полимерно-текстильных материалов с заданными эксплуатационными и защитными характеристиками.

Таким образом, эволюция акриловых эмульсий в текстильной отрасли прошла путь от традиционных связующих и отделочных материалов до многофункциональных полимерных платформ, обеспечивающих реализацию сенсорных, защитных и адаптивных функций в составе умного текстиля. Современные направления связаны с разработкой экологически безопасных водных акриловых составов, интеграцией наноматериалов и созданием умных покрытий нового поколения [42].

Акриловая эмульсия - водный раствор акриловых полимеров, представляющий собой непрозрачную жидкость молочно-белого оттенка. Она применяется как субстрат для многих промышленных и потребительских товаров, включая краски, связующие вещества и уплотнители.

Акриловая эмульсия включает следующие составные части:

- акриловый мономер: исходный материал, что подвергается полимеризации (например, метилметакрилат или бутил акрилат);
- вода: служит в роли растворителя;
- инициатор: пускает в ход процесс полимеризации;
- эмульгатор: гарантирует устойчивость сочетания полимера и воды;
- стабилизатор: вводится для улучшения надёжности;

Акриловая эмульсия - это ключевой элемент, который применяется для создания акриловой краски. Различие состоит в следующем:

- акриловая эмульсия: это заготовка, связующее вещество, применяемое для изготовления других изделий. По высыхании она формирует крепкую, влагостойкую пленку;

- акриловая краска: финальный продукт, в который, помимо акриловой эмульсии, введены пигменты и прочие добавки. Эмульсия в краске функционирует как связующее, скрепляющее частицы пигмента.

Благодаря своим качествам, акриловая эмульсия имеет обширное применение:

- строительство: для создания водоотталкивающих смесей, склеивающих составов, герметиков и наполнителей;

- краски и покрытия: в качестве связующего для водно-дисперсионных красок для внутренних и фасадных работ.

- текстильная отрасль: для наделения тканей водоотталкивающими свойствами.

- бумага и тара: для улучшения параметров бумаги, например, стойкости к воде.

- автомобильные покрытия: как составляющая лакокрасочных материалов для машин.

Функциональные водонепроницаемые мембранные материалы с хорошей воздухо- и паропроницаемостью стали неотъемлемой частью текстильного производства. Водонепроницаемые материалы имеют широкое применение в производстве повседневной, спортивной, защитной одежды, так и для промышленных или технических целей. Дышащие материалы, которые одновременно обеспечивает водонепроницаемость и комфорт при эксплуатации, используются для создания специальной одежды [48]. Интеллектуальные микропористые мембраны с превосходной водостойкостью и влагоприницаемостью имеют огромный рыночный спрос из-за широкого применения в средствах индивидуальной защиты, наружном оборудовании, носимой электронике, медицине [49, 50]. Однако, имеются некоторые сложности в технологии изготовления таких материалов, что ограничивает их производство [51, 52]. Разработка простого способа изготовления мембранных материалов, особенно без фтора, представляет актуальную проблему отрасли [53]. В литературе показано, что водонепроницаемость материала можно регулировать его плотностью и толщиной [54]. Однако повышение плотности материала приводит к увеличению массы изделия, к несомненному уменьшения воздухопроницаемости и паропроницаемости, что приводит к удержанию жидкого пота на поверхности кожи и в итоге создает дискомфорт пользователю. Проблема решается путем разработки двухслойных материалов, один из слоев которого составляет его основу и служит для впитывания влаги, другой - выполняет функцию мембраны, т.е. не пропускает жидкую воду, но хорошо пропускает воздух и водяных паров. В этом случае достигается компромисс между плотностью, влагопоглощением, водоупорностью и воздухо- и паропроницаемостью материала.

Основной характеристикой водоотталкивающих тканей является устойчивость к проникновению воды [55]. Механизм удерживания жидкости и пропускания паров зависит от типа материала. Известны следующие типы

водонепроницаемых материалов: плотные тканы, ткани с микропористой гидрофобной мембраной и покрытием, ткани с изоляционным гидрофильным покрытием. Имеется ряд функциональных характеристик, которые предъявляются к «дышащим» тканям [56].

Водонепроницаемая и воздухопроницаемая нановолоконная мембрана является основой водонепроницаемого и воздухопроницаемого текстиля [57]. Благодаря своей микроструктуре и поверхностным свойствам, нановолоконная мембрана без фтора демонстрирует превосходную гидрофобность, желаемую структуру пор и механическую прочность [53]. Предлагается безопасная, эффективная технология изготовления прозрачных, водонепроницаемых и воздухопроницаемых мембран с помощью электропрядения с использованием этанола в качестве растворителя и термического отверждения. Парафиновое покрытие на поверхности полиамидных и полиизоцианатных нановолокон придает мембране исключительную водонепроницаемость [58]. Нановолокна полиэтиленоксида на тонкой вспененной ткани регенерированных целлюлозных волокон улучшают воздухопроницаемость, экологическую устойчивость материала [59].

При разработке мембранных материалов, например для медицинского постельного белья лежачих больных, особое внимание уделяется улучшению влагопоглощения [56]. Для поддержания нормального кожного микроклимата требуется постельное белье, которое поглощает, но не пропускает большое количество воды, при этом имеет хорошую воздухо- и паропроницаемость [60, 61]. Показатель влагопоглощения улучшается при введении в мембрану гидрофильного полимера, например поливинилпирролидона или поливинилового спирта [62]. Добавление неорганических солей и формирование нановолокнистой структуры мембраны может улучшить скорость поглощения влаги [63]. Гидрофильность волокнистой мембраны из полиуретана регулируется порошком природного белка - фиброина шелка, соотношение натурального и синтетического полимера существенно влияет на структуру, морфологию и свойства смеси волокон [64]. Другой природный белок коллаген кожи также увеличивает гидрофильность, а также придает огнезащитные свойства полимерно-текстильным материалам. В свою очередь модификация гидрофобным силаном бамбукового волокна уменьшает растворимость композита хитозан/гидроксипропил метилцеллюлоза/поливиниловый спирт на его основе и способствует повышению водонерпоницаемости пленки [65].

В мембранных текстильных материалах для защитной одежды особое внимание уделяется на дышащую способность полотна. Микропористая мембрана с более высокой скоростью пропускания водяного пара получена путем смешивания пухового порошка и полиуретана методом литья из раствора [66]. Нанесение полиакрилонитрильных нановолокон на поверхность полиэфирных тканей делает ее водонепроницаемой. Эти ткани быстро отводят влагу и обладают хорошей теплоизоляцией [67].

Водонепроницаемыми и дышащими характеристиками обладают ткани из смеси полиуретана, полиакрилонитрила и полиэфира [68]. Включение гидрофобного силикагеля в полиуретан улучшает механические свойства, водонепроницаемость и воздухопроницаемость [69]. Особое значение имеют материалы, способные диффундировать пары, как вверх, так и вниз по поверхности испарения [70].

Водонепроницаемые дышащие ткани были разработаны для различных целей, в том числе медицины. Основные принципы, механизмы и характеристики пропускания водяного пара зависят исключительно от типа дышащей ткани [71]. Все большее внимание привлекают многоразовые медицинские текстильные материалы, способные инактивировать патогены и снижать заболеваемость и передачу инфекции. Защитные текстильные изделия, такие как хирургические маски, шапочки, халаты и т. д., а также больничное белье необходимы для обеспечения антимикробной безопасности [72]. Водонепроницаемые дышащие слои можно разделить на две большие группы: гидрофильные непористые и гидрофобные пористые слои. Эти слои (например, ткани, пленки, мембраны и сетки) могут быть получены различными непрерывными и непостоянными процессами, такими как нанесение покрытия, ламинирование, растяжение пленки, литье и т. д. Трехслойная ламинированная полиолефиновая композитная ткань, состоящая из микроволокнистых полотен из полипропилена и волокнистых полотен из полипропилена/полиэтилена, была изготовлена методом термического склеивания композиционных материалов [73]. Основная проблема при производстве этих слоев состоит в том, чтобы найти компромисс между водонепроницаемостью и воздухопроницаемостью с противоположным характером [74].

Современные подходы к созданию мембран с регулируемым переносом влаги продемонстрированы в работе авторов [75], где предложен воздухопроницаемый янус-материал с фототермическими свойствами для двустороннего получения воды с использованием солнечной энергии. Полученные результаты подтверждают перспективность применения градиентных поверхностей для интенсификации процессов испарения и конденсации влаги.

Фундаментальные аспекты проектирования водонепроницаемых и одновременно воздухопроницаемых материалов подробно рассмотрены в обзорной работе. Автором [76] систематизированы механизмы переноса водяного пара через мембраны, основные типы пористых и непористых покрытий, а также факторы, определяющие комфортность и эксплуатационные характеристики защитных текстильных материалов.

Важное направление исследований связано с модификацией полимерных мембран для повышения их гидрофильности. Авторы [77] исследовали методы гидрофилизации высокопрочных поливинилиденфторидных полых волокон, что позволило улучшить

водопроницаемость и расширить возможности их применения в процессах разделения и фильтрации.

Активное развитие получают нановолокнистые материалы, получаемые методом электроформования. Авторы [78] разработали облегчённые нановолокнистые мембраны с улучшенными сорбционными характеристиками для осушающих систем. Аналогично авторы [79] изготовили волокнистые мембраны на основе смеси шелкового фиброина и полиуретана, продемонстрировав возможность сочетания высокой прочности и биосовместимости

Особый интерес представляют гидрогелевые нановолокнистые структуры. В обзорной работе [80] рассмотрены методы синтеза, свойства и области применения электроформованных гидрогелевых нановолокон. Авторы отмечают их высокую влагоёмкость, развитую удельную поверхность и перспективность использования в биомедицине, фильтрации и интеллектуальных текстильных системах. Развитие данного направления отражено в исследовании [81], где полиэфирные волокна были модифицированы полиакриламидным гидрогелем посредством УФ-инициированной прививки, что позволило существенно повысить гидрофильность и влагоудерживающую способность материала.

Отдельную группу исследований составляют работы, направленные на улучшение комфортных свойств текстильных материалов. Авторы [82] показали, что нанесение нановолоконных покрытий из термопластичного полиуретана на трикотажные полотна способствует повышению ветростойкости при сохранении удовлетворительных показателей теплового комфорта. Дальнейшее развитие данная концепция получила в работе [83], где для улучшения терморегуляции использованы нановолокна термопластичного полиуретана и ацетата целлюлозы, содержащие материалы с фазовым переходом. Разработанные структуры обеспечивают эффективное аккумулирование и высвобождение тепловой энергии, что способствует стабилизации микроклимата под одеждой.

С точки зрения повышения прочностных характеристик текстильных материалов интерес представляет исследование [84], в котором изучено влияние коллагенового аппрета на микроструктуру и прочность хлопчатобумажной пряжи. Полученные результаты подтверждают возможность использования биополимерных композиций для улучшения эксплуатационных свойств текстильных изделий.

Несмотря на имеющийся большой ассортимент разнообразных водоупорных «дышащих» мембранных текстильных материалов, вопросы технологии их получения, уравновешивания водонепроницаемости с поглощением воды, пропусканием воздуха и паров воды, улучшения функциональных характеристик все еще остаются проблемными. Ранее проведены исследования по разработке простого и удобного способа получения воздухопроницаемого и паропроницаемого полимерно-текстильного материала, который поглощает, но не пропускает большое

количество воды. В качестве текстильного полотна использована только махровая ткань с односторонним ворсом. Возможность применения полотен из различного сырья и различного переплетения для разработки водопоглощающего и гидроизоляционного материала остается открытым.

Проведенное исследование полимерно-текстильных мембранных материалов позволило определить их значительную роль в развитии современных высокофункциональных текстильных изделий. Исследование научных и технологических аспектов формирования мембранных структур выявило, что комбинация полимерных мембран с текстильными основами позволяет создавать материалы с уникальным набором пользовательских свойств, таких как водонепроницаемость, паропроницаемость, химическая стойкость и высокая механическая прочность.

Изучение характеристик структуры и методов производства полимерно-текстильных мембранных материалов показало, что результативность их работы зависит как от свойств используемого полимера, так и от методики создания мембранного слоя и его скрепления с текстильным каркасом. Использование передовых способов ламинирования, нанесения покрытий и изменения поверхности помогает повысить эксплуатационные качества материалов и расширить сферы их использования.

Определено, что применение мембранных технологий дает возможность получать материалы с настраиваемыми транспортными характеристиками, гарантирующими действенный тепло- и влагообмен при сохранении защитных свойств. Это обстоятельство имеет значительную важность для выпуска особой, спортивной, медицинской и защитной одежды, где удобство и безопасность потребителя выступают первоочередными требованиями.

Результаты исследования говорят о том, что развитие полимерно-текстильных мембранных материалов представляет собой одно из перспективных направлений улучшений технического и функционального текстиля. Современные тренды связаны с созданием многофункциональных мембран, обладающих повышенной прочностью, экологической безопасностью, устойчивостью к внешним воздействиям и возможностью адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации.

В итоге, полимерно-текстильные мембранные материалы являются действенной основой для создания передовых текстильных изделий грядущего поколения. Достигнутые итоги подтверждают научную и практическую ценность дальнейших изысканий, ориентированных на улучшения строения, методов изготовления и функциональных характеристик мембранных систем с целью увеличения областей их использования в разнообразных сферах промышленности и общественной жизни.

Вывод по литературному обзору

Проведенный анализ научной литературы, патентных источников и современных технологических разработок показал, что Smart-текстиль представляет собой одно из наиболее перспективных направлений развития текстильной промышленности, основанное на интеграции достижений материаловедения, полимерной химии, фотоники, микроэлектроники и информационных технологий. Современные интеллектуальные текстильные материалы характеризуются расширенным набором функциональных свойств, обеспечивающих возможность регистрации, передачи и обработки информации, а также адаптации изделий к изменяющимся условиям эксплуатации.

Анализ существующих подходов к созданию Smart-текстиля свидетельствует о том, что основой формирования его функциональных свойств являются новые текстильные материалы, включающие токопроводящие элементы, сенсорные устройства и полимерные оптические волокна, а также полимерные покрытия, мембранные структуры. Рассмотрение современных видов полимерных оптических волокон показало, что благодаря высокой гибкости, малой массе, устойчивости к многократным изгибам и технологической совместимости с текстильными процессами они являются перспективным материалом для создания светотехнических и сенсорных текстильных систем. Одновременно установлено, что дальнейшее совершенствование технологий их производства направлено на снижение оптических потерь, повышение механической прочности и обеспечение стабильности характеристик в процессе эксплуатации. Исследование полимерно-текстильных мембранных материалов позволило установить их важную роль в формировании комплекса защитных и эксплуатационных свойств интеллектуальных изделий. Использование мембран обеспечивает сочетание водонепроницаемости, паропроницаемости, ветрозащитных свойств особенно важно при разработке функциональной одежды и технического текстиля.

Несмотря на значительные достижения в области разработки интеллектуального текстиля, анализ опубликованных исследований показал наличие ряда нерешённых научных и технологических задач. В настоящее время недостаточно изучены закономерности взаимодействия полимерных оптических волокон с текстильными структурами различных видов, отсутствуют единые подходы к проектированию текстильных материалов, обеспечивающих сохранение механических, оптических и эргономических характеристик изделий. Требуют дальнейшего исследования вопросы повышения долговечности интеллектуальных текстильных материалов, устойчивости их функциональных свойств к многократным механическим нагрузкам, воздействию влаги, температуры и эксплуатационных факторов.

Таким образом, результаты проведённого анализа свидетельствуют о том, что дальнейшее развитие Smart-текстиля связано с разработкой новых текстильных структур, основанных на использование полимерных

мембранных материалов и полимерных оптических волокон. Научное решение данной задачи позволит создать интеллектуальные текстильные материалы с улучшенными функциональными характеристиками, расширить области их практического применения и повысить эффективность современных технологий производства.

Полученные результаты литературного обзора послужили основанием для выбора направления настоящего исследования, целью которого является в разработке технологии Smart-текстиля с использованием полимерного оптического волокна и мембранного слоя. Для решения выше указанной цели были поставлены следующие задачи:

- аналитический анализ современного состояния исследований и технологии в области Smart текстиля с использованием ПОВ, полимерно-мембранным слоев;
- выбор и обоснования способов формирования и исследования трикотажного полотна с ПОВ;
- обоснования и исследования метода получения ПТМ с мембранными свойствами;
- разработка технологии формирования полимерно-мембранных слоев;
- математического планирования второго порядка (план Бокса Хантера) для прогнозирования водоупорности и водопоглощения ПТМ.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОВ И ПТМ SMART ТЕКСТИЛЕ

2.1 Характеристика материалов и реагентов

Для формирования трикотажного полотна использована хлопковая пряжа с линейной плотностью 20 текс и полимерное оптическое волокно (ПОВ).

Были рассмотрены четыре различных ПОВ:

ПОВ 1: построен из перфторированного полимера [85], с оболочкой длиной 490 м и диаметром активной зоны 50 м. По данным производителя, этот ПОВ выдерживает максимальную растягивающую нагрузку 7 Н.

ПОВ 2: циклоолефин/фторированный полимер.

ПОВ 3: полимер, изготовленный из полимера Geniomer 100.

ПОВ 4: мононить диаметром 0,25 мм из полиметилметакрилата.

Их различные характеристики были документированы в более ранних исследованиях [86].

Для получения полимерно-текстильных материалов с мембранными свойствами в качестве основы использованы шесть образцов текстильных полотен:

Образец № 1. Суровая хлопчатобумажная ткань саржевого переплетения 1/3 с поверхностной плотностью 224±3 г/м^2, относительно эластичная и нежная ткань, предназначенная для простыни.

Образец № 2. Полиэфирная ткань полотняного переплетения типа тафта с поверхностной плотностью 72±2 г/м^2.

Образец № 3. Полубархатная ткань с коротким (1-1.5мм) вертикальным ворсом из нитей утка на лицевой стороне с поверхностной плотностью 202±3 г/м^2. Грунтовые нити основы изготовлены из хлопчатобумажных волокон, уточные нити с ворсом – из ацетатных волокон.

Образец № 4. Хлопчатобумажная махровая ткань с одной системой основных и двумя системами уточных нитей, с поверхностной плотностью 300±5 г/м^2, предназначенная для изготовления полотенца. Ворсовые петли образованы с двух сторон из уточных нитей.

Образец № 5. Хлопчатобумажная махровая ткань с двумя системами основных нитей, и одной системой уточных, поверхностной плотностью 210±3 г/м^2. На лицевой поверхности полотна были образованы петли из уточной нити, изнаночная сторона – без ворса. Переплетение образовано на основание полотняного переплетения 2/1-репс. При этом, на поверхности расположены петли, образующие ворс. Число крутки основы ворса 600 в 1 метре, плотность нити 11,2 в 1 см.

Образец № 6. Велюровое хлопчатобумажное трикотажное полотно с продольным ворсом с одной стороны, с поверхностной плотностью 228±5 г/м^2.

В качестве гидроизоляционного полимерного слоя использована акриловая эмульсия - 40%-ная водная эмульсия полиметилакрилата (ПМА)

белого или светло молочного цвета, производства АО «Навоиазот» (Республика Узбекистан).

2.2 Методы формирования трикотажного полотна с полимерным оптическим волокном

Для достижения цели получены три варианта полотен с полимерным оптическим волокном:

1. Оптическое волокно внедряется в структуру трикотажного переплетения в виде уточной нити (рисунок 2.1a).
2. Оптическое волокно участвует в петлеобразовании полотна в простом переплетении (рисунок 2.1b).
3. Оптическое волокно участвует в петлеобразовании полотна плюшевого переплетения (рисунок 2.1c).

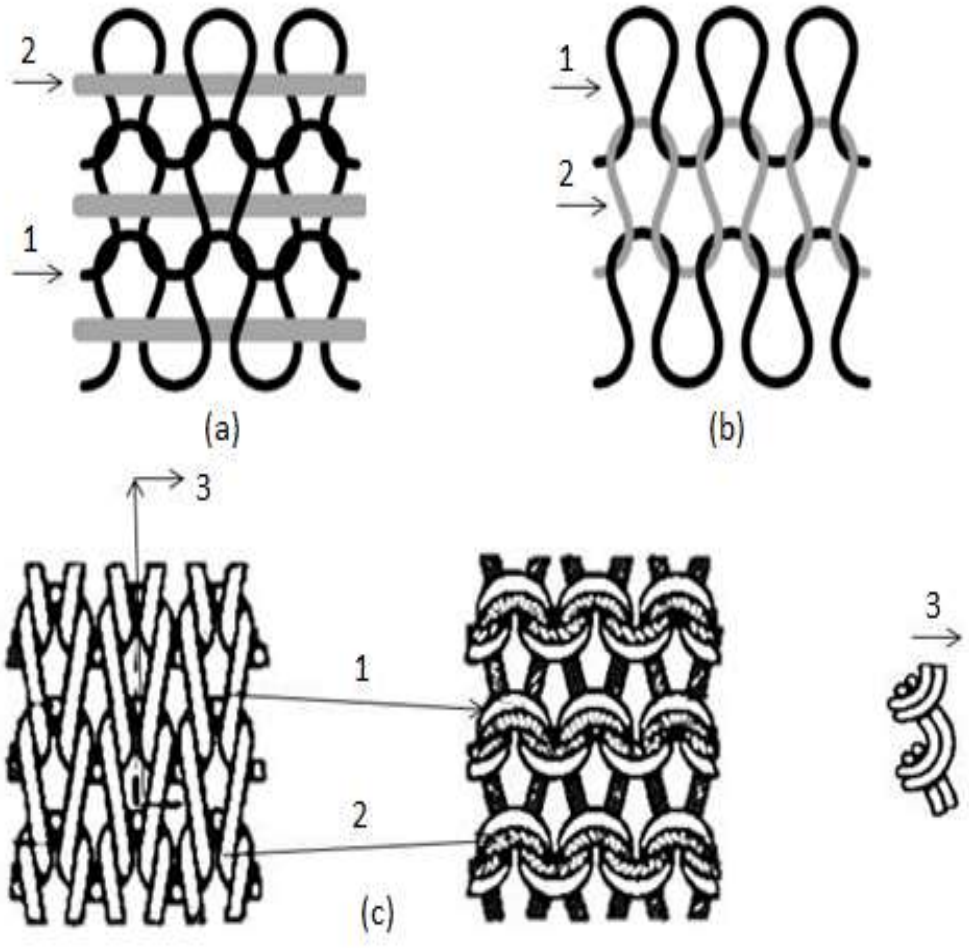


Рисунок 2.1 - Примеры вязаной структуры: (a) простое переплетение с оптическим волокном в качестве уточной нити (1 - хлопковая пряжа, 2 - оптическое волокно); (b) оптическое волокно участвует в простом переплетении (1 - хлопковая пряжа, 2 - оптическое волокно); (c) оптическое волокно участвует в плющевом переплетении (1 - оптическое волокно, 2 - хлопковая пряжа, 3 - плюшевый узел)

В процессе вязания пряжа подвергается растяжению в результате тяги, изгиба и трения о металлические элементы машины [87]. Пряжа резко скручивается, образуя петлю на вязаном полотне. Длина стежка и толщина иглы определяют кривизну, которой подвергается пряжа во время работы. Однако при использовании оптического волокна необходимо избегать значительной кривизны, чтобы предотвратить потерю светового сигнала. ПОВ необходимо было вставить в ткань, чтобы предотвратить ее искривление при использовании по назначению. Это означало, что его нельзя было ввязать прямо в ткань, чтобы получилась петля; вместо этого он должен был находиться внутри структуры ткани настолько прямо, насколько это возможно. Было принято решение вставить в конструкцию инкрустирующую нить. Этот подход широко используется с эластичной пряжей, например, используемой в текстиле.

Еще одним преимуществом инкрустации является то, что во время процесса инкрустационная пряжа подвергается меньшему напряжению и трению, чем грунтованная пряжа.

Модуль Юнга E и момент инерции поперечного сечения I определяют гибкость ПОВ или малую жесткость на изгиб B, которая для круглого волокна выглядит следующим образом:

$$B = EI = E\frac{\pi d^4}{64} \quad (1)$$

где, B - изгибная жёсткость материала, Н м^2; E - модуль упругости материала, Па; I - осевой момент инерции поперечного сечения, м^4; d - диаметр круглого волокна или нити, м; π - математическая постоянная, π≈3,1416.

ПОВ также должен быть эластичным, то есть после сгибания он должен восстановить свою целостность.

Для испытаний на растяжение использовалась машина для растяжения со специальной системой крепления, чтобы предотвратить скольжение и разрушение захватов.

Затем были изучены характеристики изгиба волокон. Оптическое волокно, использованное для этих испытаний, имело длину 30 см и переменный радиус кривизны (R варьировался от 0,5 мм до 2,5 мм). Это соответствует типичному напряжению, которому подвергается пряжа во время вязания.

2.3 Метод получения полимерно-текстильного материала с мембранными свойствами

Перед использованием акриловую эмульсию разбавили водой в два раза и получили 20%-ную эмульсию. Текстильные полотна подвесили вертикально, на изнаночную поверхность с расстояния 20-25 см напылили 20%-ную акриловую эмульсию. Полимерный слой высушивали в течение 10±1 минут, продувая потоком теплого воздуха, затем напылили второй слой

полимера. Были получены образцы с напылением двух и четырех слоев акриловой эмульсии.

В таблице 2.1 представлены сведения о массовом составе полученных мембранных полимерно-текстильных материалов.

Таблица 2.1 - Состав мембранных текстильных материалов

Номер образца	Вид ткани	Количество слоев полимера	Состав мембранного материала, %	
			Текстиль	Полимер
1А	Суровая х/б ткань	2	92±1	8±1
1Б		4	86±2	14±2
2А	Полиэфир	2	95±1	5±1
2Б		4	91±2	9±2
3А	Полубархат	2	90±1	10±1
3Б		4	84±2	16±2
4А	Двухсторонняя махровая х/б ткань	2	85±2	15±2
4Б		4	77±3	23±3
5А	Односторонняя махровая х/б ткань	2	91±1	9±1
5Б		4	86±2	14±2
6А	Велюровый трикотаж	2	89±1	11±1
6Б		4	84±2	16±2

Как видно из данных таблицы 2.1, массовая доля полимера увеличивается в соответствии с увеличением количества слоев акрилового полимера. По видам ткани самое высокое значение массовой доли полимера обнаружено в образце с двухсторонней махровой тканью, самое низкое значение в образце полиэфирной ткани. Видимо, ворсовая поверхность двухсторонней махровой ткани впитывает большее количество полимерной эмульсии, тогда как малополярные связи полиэфирных волокон уменьшают диффузию водной эмульсии акрилового полимера. В остальных образцах примерно одинаковая массовая доля полимерного слоя – 9-10 % при двухслойном нанесении и примерно 14-16 % при четырехслойном нанесении акриловой эмульсии.

2.4 Исследование физико-механических свойств трикотажного полотна с полимерным оптическим волокном

Трибометр, модифицированный для измерения проходящего света, использовался для количественной оценки сжатия и трения. Чтобы применить требуемую нормальную нагрузку, изменяется вертикальное положение фиксированного рычага, используемого для приложения нормальной нагрузки. На рисунке 2.2 показано лабораторное оборудование.



Рисунок 2.2 Установка для испытаний на трение и сжатие.

Слайдер, используемый в этом исслеовании, имеет прямоугольную подошву площадью 1,5 $см^2$ и покрыт материалом с фрикционными свойствами, подобными человеческой коже [88]. Кроме того, чтобы добиться такой же твердости, как и у настоящей кожи, под трикотаж вставлялась синтетическая кожа. Эксперименты по трению и сжатию проводились при четырех настройках для создания давлений в диапазоне от 3 до 120 кПа [89].

Оптическое волокно использовалось для передачи света для измерения освещенности, а фотодиод регистрировал и преобразовывал излучение в напряжение. Регистратор импульсных данных был связан с сигналом фотодиода.

Предыдущие исследования показали, что источник света и стабильность связи можно считать само собой разумеющимися константами [90]. Таким образом, единственным фактором, влияющим на пропускание света, является деформация волокна в результате давления и трения. Абсолютная освещенность не одинакова, поскольку волокно не следует по

точному маршруту от одного образца к другому. Следовательно, для всех результатов будет учитываться относительная освещенность и, более конкретно, потери освещенности Irradiance loss (i) (Потери излучения(i)):

$$\text{Irradiance loss } (i) = \frac{Irrad_{max} - Irrad_i}{Irrad_{max}} \quad (2)$$

где $Irrad_i$ - мгновенное излучение; $Irrad_{max}$ - максимальная освещенность волокна во время теста.

Потери излучения варьируются от нуля до 100%.

Исследования физико-механических свойств полученных материалов проведены в сертификационном центре «CENTEXUZ» Ташкентского института текстильной и легкой промышленности, температура в помещении – 20±3°C, относительная влажность воздуха – 65±5%.

Испытания устойчивости тканей к истиранию проводились на специальном приборе МТ-194. Пробу ткани в виде кружка диаметром (85±2) мм помещают между абразивными дисками прибора под давлением из расчета 1 кгс/см. В плоскости касания пробы с абразивом они совершают планетарное движение. При появлении дыры на поверхности образца прибор автоматически остановиться, снимают показания счетчика количеством циклов на истирание.

Определение разрывной нагрузки и относительного удлинения образцов проводили на приборе AG -1, предназначенном для измерения разрывных характеристик тканей, нитей и других текстильных изделий. При испытании тканей образцы по основе и утку режут в виде полос размером 300×50 мм.

Увеличенные изображения образцов полотен сняты цифрового usb микроскопа “Optika mikroscopes B-150”.

Морфология поперечного сечения трикотажного полотна с ПОВ исследована с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490 LV (Япония).

2.5 Исследование свойств мембранных полимерно-текстильных материалов

Физико-механические и гигиенические свойства полученных материалов были изучены в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ 10524-2014 «Ткани и штучные изделия льняные и полульняные махровые. Общие технические условия». Исследования проводились в сертификационном центре «CENTEXUZ» Ташкентского института текстильной и легкой промышленности, температура в помещении - (20±3)°C, относительная влажность - (65±5)%. Все измерительные приборы сертификационного центра были изготовлены в Японии. Чтобы уменьшить степень погрешности, результат каждого теста был взят за среднее значение

по меньшей мере из трех образцов, значение которых не превышало 5% от среднего значения.

Поверхностную плотность (г/м^2) определяли в соответствии с ГОСТ 3811-72 (ISO 3801-77) с использованием специальных весов “GX-400”, размеры образца 50×50 мм.

Прочность на разрыв (N) определяли в соответствии с ГОСТ 3813-72 (ISO 5082-82) на машине для испытания на растяжение AG-1, размеры образца 300×50 мм.

Стойкость к истиранию (циклы) определяли в соответствии со стандартом ГОСТ 9913-90 на приборе для определения стойкости тканей к истиранию М 235/3, скорость вращения абразивов составляла 47,5±2,5 об/мин, образец представлял собой круг диаметром 50 мм.

Водопоглощение (%) материала определяли в соответствии с ГОСТ 3816-81 (ISO 811-81) по количеству поглощенной воды в процентах от сухого веса образца. На элементарном образце размером 30×70 мм проводят линию на высоте 35 мм, образец подвешивают на крюк с грузом и погружают в сосуд с дистиллированной водой. Пузырьки воздуха, образовавшиеся на элементарном образце, сбивают стеклянной палочкой и следят за тем, чтобы он полностью погрузился в воду. Время погружения - 60±1 мин. Затем крючок с элементарным образцом вынимают из сосуда и подвешивают на перекладине для отвода лишней влаги. Через 30±5 секунд нижнюю половину элементарного образца отрезают ножницами по отмеченной линии, а оставшуюся часть помещают в чашу для взвешивания, закрывают, взвешивают (m_2). Затем высушивают в открытых чашках до постоянной массы при температуре (107±2)°С. Чашки закрывают, выдерживают для охлаждения в эксикаторе с безводным хлоридом кальция и снова взвешивают (m_1). Водопоглощение (W) рассчитывают по формуле:

$$W = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\% \qquad (3)$$

где, W – водопоглощение образца, %; m_1 - первоначальная масса образца, г; m_2 - масса образца после обработки, г; m_2-m_1 - изменение массы образца, г.

Сопротивление материала пропусканию воды определяли в соответствии со стандартом ГОСТ 3816-81 (ISO 811-81) с использованием прибора WR-1600E по двум показателям: водостойкость и водопроницаемость, размеры образца 160×160 мм. Водонепроницаемость образца определяется по максимальному уровню давления (высота водяного столба, мм), при котором на внешней поверхности элементарного образца не обнаруживается капель воды. После появления капель воды на внешней поверхности образца измеряют показатель водопроницаемости. Проницаемость образца определяется объемом воды (мл), который проходит через него без давления в течение 60 минут.

Воздухопроницаемость определяли в соответствии с ГОСТ 29298-2005 с использованием измерителя электропроводности воздуха «АП-360СМ», размеры образца 160×160 мм.

Паропроницаемость образцов определяли в соответствии с ГОСТ 938.17-70. Для определения паропроницаемости четыре стакана высотой 45 мм и диаметром 55 мм наполняли дистиллированной водой на высоту 30±1 мм. На выступы каждого стакана надевали резиновую прокладку и помещали на нее образец материала. На образец надевали металлическое кольцо и завинчивали сквозной колпачок. Стаканы помещали на подставку в эксикатор, содержали 1 дм^3 концентрированной серной кислоты и выдерживали в термостате при температуре (20±3)°С в течение 18±0,5 часов, после чего каждый стакан взвешивали. После взвешивания стаканы помещали в тот же эксикатор и выдерживали в тех же условиях в течение 6±0,2 часов. Затем каждый стакан взвешивали еще раз. Паропроницаемость (А) в г/(м^2*ч) рассчитывают по формуле:

$$A = \frac{m}{t \cdot \pi r^2} \quad (4)$$

где, m - масса водяного пара, прошедшего через исследуемый образец, г; t - время, ч; πr^2 - площадь рабочей части образца, м^2.

Термические свойства образцов исследовали методами термогравиметрии (ТГА) и дифференциально-термического анализа (ДТА). Исследования проведены на приборе Netzsch Simultaneous Analyzer 409 PG (Germany), оснащенных термопарами К-типа и алюминиевыми тиглями. Все измерения проведены в инертной атмосфере азота, в диапазоне 0-600^{0}С, со скоростью нагрева 10 К/мин. Масса образцов 20-30 мг, измерительная система калибрована на бором стандартных веществ KNO_3, In, Bi, Sn, Zn, $CsCl$.

Морфология поверхности и поперечного сечения полимерно-текстильных материалов были исследованы с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6490 LV (Япония) и сканирующего электронного микроскопа SEM–EVO MA 10 (Carl Zeiss, Германия).

Промывку образцов для определения усадки, а также повторную промывку образцов проводили в соответствии со стандартом ГОСТ 8710-84 в растворе, содержащем моющие средства: 40±1 г хозяйственного мыла (60-72%) и 10±0,2 г соды; размеры образцов 300×300 мм.

Вывод ко второй главе

В настоящей главе рассмотрены и обоснованы методы получения, формирования и исследования свойств полимерных оптических волокон и полимерно-текстильных мембранных материалов, используемых при создании изделий Smart-текстиля. Выбранный комплекс экспериментальных методов обеспечивает всестороннюю оценку структуры материалов, их физико-механических, оптических и эксплуатационных характеристик, а также технологических параметров изготовления и функциональные свойствами разрабатываемых композиционных систем.

Показано, что при исследовании полимерных оптических волокон необходимо учитывать не только показатели светопропускания и коэффициент оптических потерь, но и их механическую прочность, гибкость, устойчивость к циклическим нагрузкам и способность сохранять рабочие характеристики после интеграции в текстильную структуру. Комплексная оценка перечисленных свойств позволяет объективно определить возможность использования волокон в составе интеллектуальных текстильных материалов различного назначения.

Установлено, что исследование полимерно-текстильных мембранных материалов требует применения взаимодополняющих методов оценки их структуры, водонепроницаемости, паропроницаемости, воздухопроницаемости. Совокупность полученных данных позволяет оценить влияние конструктивных особенностей мембранных композиций на эксплуатационные свойства готовых изделий и определить наиболее эффективные технологические решения для их производства.

Обоснованный выбор методов исследования обеспечивает возможность анализа процессов полимерных оптических волокон, мембранных материалов в текстильной основе. Такой подход создает необходимые условия для выявления закономерностей формирования функциональных свойств Smart-текстиля и объективной оценки эффективности предлагаемых конструктивно-технологических решений.

Таким образом, сформированная методическая база является достаточной для проведения последующих экспериментальных исследований, направленных на разработку композиционных текстильных материалов с интегрированными полимерными оптическими волокнами, мембранными элементами. Использование выбранных методов позволит установить влияние технологических параметров изготовления на структуру и свойства разработанных материалов, определить рациональные режимы их получения и экспериментально подтвердить возможность создания Smart-текстиля с заданными эксплуатационными и функциональными характеристиками.

ГЛАВА 3 ПОЛУЧЕНИЕ, СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА ТРИКОТАЖНЫХ ПОЛОТЕН С ПОЛИМЕРНЫМ ОПТИЧЕСКИМ ВОЛОКНОМ

Несколько лет назад начали производить электронный текстиль, часто известный как «умный текстиль», и некоторые из них предлагаются в настоящее время. Благодаря своим небольшим размерам и цилиндрической форме оптические волокна, используемые в качестве датчиков в этой отрасли, обладают рядом преимуществ [91].

Тремя основными применениями оптических волокон являются передача данных, излучение света и зондирование. Оптические волокна представляют собой световоды, которые могут передавать световые сигналы на длину от нескольких сантиметров до многих километров. Используемое волокно зависит от применения; должен быть баланс оптических и механических свойств, что является предметом наших исследований оптических волокон в качестве датчиков [91-94]. Однако в зависимости от используемого основного полимера ПОВ могут быть в некоторой степени гибкими и податливыми [95].

Свет, проходящий через ядро ПОВ, подвержен деформациям, которые изменяют оптические характеристики материала и увеличивают потери света [96]. Освещенность, мера количества света, присутствующего как до, так и после деформации, связана с видом напряжения. Эти датчики могут использоваться как механические датчики (например, датчики давления или трения) и отслеживать деформации в зависимости от свойств волокна [97–99].

Когда дело доходит до умного текстиля и более точного мониторинга тела, размещение ПОВ в трикотажных тканях позволяет достичь зоны измерения деформации, максимально приближенной к коже. Это достижимо, поскольку трикотажные материалы созданы с учетом особенностей тела. Однако чем ближе оно к коже, тем труднее обнаружить деформации, которые испытывает сенсорное волокно.

Целью исследования [100] было изучение того, как полимерные оптические волокна (ПОВ) могут быть включены в текстильные изделия для обнаружения и распознавания сжатия и изгиба как можно ближе к коже. Было тщательно исследовано влияние каждого отдельного элементарного механического напряжения на оптический сигнал, создаваемый ПОВ. На начальном этапе необходимо было независимо охарактеризовать ПОВ каждого датчика в соответствии с четырьмя основными сценариями стресса. После этого рассчитывалась чувствительность к ситуации нагрузки. ПОВ был безразличен к растяжению и кручению, но был чрезвычайно чувствителен к изгибу и сжатию. В результате был создан способ внедрения датчика ПОВ в структуру ткани с одновременным регулированием маршрута ПОВ. Для определения интегрированной трикотажной структуры ПОВ

использовались сжатие и изгиб. Для оценки сжатия и изгиба можно использовать «умный» текстиль с большей чувствительностью.

3.1 Оценка жесткости на изгиб и восстановление его при изгибе

ПОВ после изгиба, чтобы выбрать ПОВ, наиболее подходящий для включения в трикотажный каркас. На рисунке 3.1 показаны кривые нагрузки и деформации для трех ПОВ. ПОВ 2 определенно имеет самые низкие показатели прочности на растяжение. Сердцевина волокна ПОВ 1 разрушилась во время испытания на растяжение, в то время как оболочка продемонстрировала более высокую способность к растяжению и более медленный разрыв. ПОВ1 и ПОВ3 разделились со значительным удлинением. В результате представленные здесь кривые завышают фактическую деформацию при разрыве для этого материала.

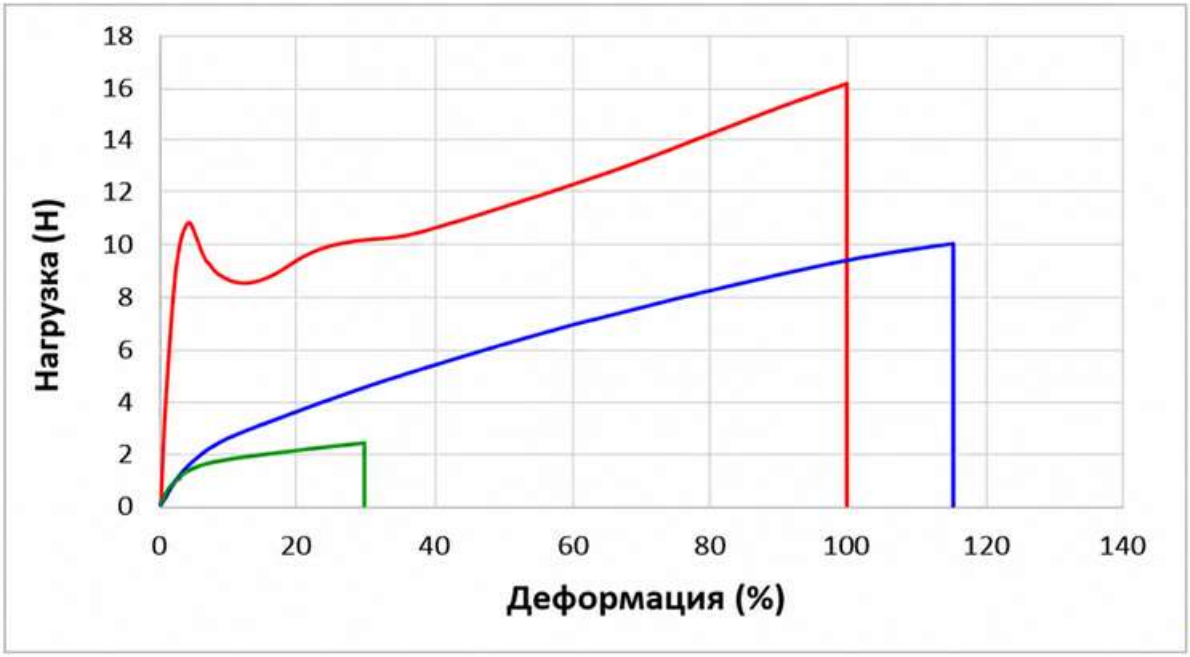


Рисунок 3.1 - Кривая нагрузки-деформации: ПОВ 1 (красная); ПОВ 2 (зеленая); ПОВ 3 (синяя).

ПОВ 3 допускал высокие уровни удлинения, подходящие для текстильного применения. Показатели качества ПОВ приведены в таблице 3.1. Несмотря на большой диаметр, ПОВ 3, как видно, наименее жесткий. Согласно расчетам изгибной жесткости, приведенным в таблице 3.1, ПОВ 3 является наиболее гибким.

Таблица 3.1 - Показатели качества ПОВ

Показатели качества	ПОВ1	ПОВ2	ПОВ3
Модуль Юнга, ГПа	2.2	4.6	0.2
Жесткость на изгиб, 10^{-9} Н·м^2	45	95	1.9

Волокно сгибали под напряжением в течение 30 секунд, а затем снимали нагрузку для испытания на восстановление при изгибе. Волокно фотографировали как сразу после снятия напряжения, так и еще раз через две минуты.

Анализируя данные, приведенные в таблице 3.1 и на рисунке 3.1, можно сделать вывод, что ПОВ3 имеет наилучшие показатели качества и, как следствие, может быть рекомендован для дальнейших исследований. Тем не менее, как уже упоминалось, три трикотажные конструкции были успешно вставлены с помощью оптического волокна с использованием техники инкрустации.

В таблице 3.2 указаны длины стежков для каждого вида вязания согласно NF EN 14970.

Таблица 3.2 - Длина стежка по стандарту NF EN 14970

Тип вязания	Длина стежка, см/п
Одинарный трикотаж	0.75
1×1 резинка	0.90
1×1 интерлок	0.87

Анализируя приведенные данные, можно сделать вывод, что самая длинная стяжка - для резинки 1x1, а самая короткая - для одинарного трикотажа.

3.2 Испытание образцов на сжатие

Целью этого раздела является поиск идеальной конструкции для измерения компрессии. На рисунке 3.2 показаны значения повторяемости и воспроизводимости измерения трикотажной структуры при напряжении 3 Н. На рисунке 3.2 a и b показаны значения изменения сжимающей нагрузки, а на рисунке 3.2 c и d - потери излучения при испытании на сжатие. Средняя кривая показана черной линией, а серая область показывает стандартное отклонение.

Каждый образец был подвергнут пяти последовательным циклам сжатия в идентичных условиях испытаний, чтобы обеспечить воспроизводимость результатов измерений. Для всех пяти измерений использовался один и тот же образец.

Методика оценки повторяемости требует измерения нормальной нагрузки и потерь излучения для сжатого образца. Опыт проводился для каждого образца и нормальной нагрузки для каждой конструкции.

Эта ошибка повторяемости возникает из-за ПОВ с несовершенно плоским поперечным сечением и несовершенным соединением, возможно, из-за неравномерности ПОВ.

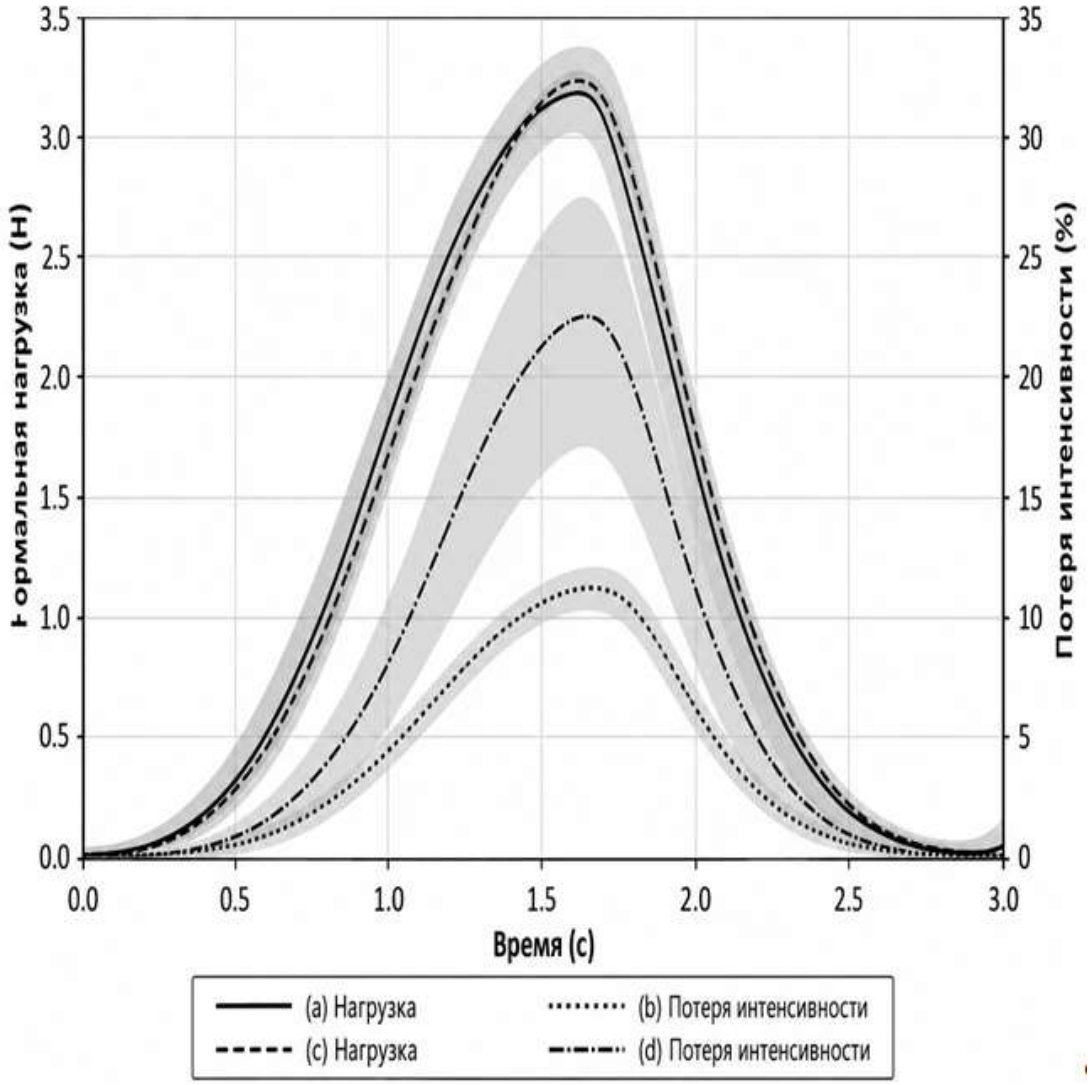


Рисунок 3.2 - Повторяемость и воспроизводимость измерения. Средняя кривая показана черной линией, а стандартное отклонение показано серой областью.

Результаты показывают, что измерения являются повторяемыми, с CV% менее 9% для каждой вязаной структуры и образца. Более того, результаты показывают, что ПОВ необходимо откалибровать, прежде чем его можно будет использовать в коммерческих целях. Среднее значение CV% максимальной потери излучения во всех испытаниях составляет 35%, что оценивается путем объединения CV% для каждой нормальной силы и трикотажной структуры.

Для идентификации подходящей конструкции оценивалась чувствительность всего датчика, изготовленного из трикотажного полотна с инкрустацией ПОВ, при сжатии.

На рисунке 3.3 показано изменение средних потерь излучения в зависимости от напряжения сжатия оптического волокна для трех протестированных трикотажных топологий.

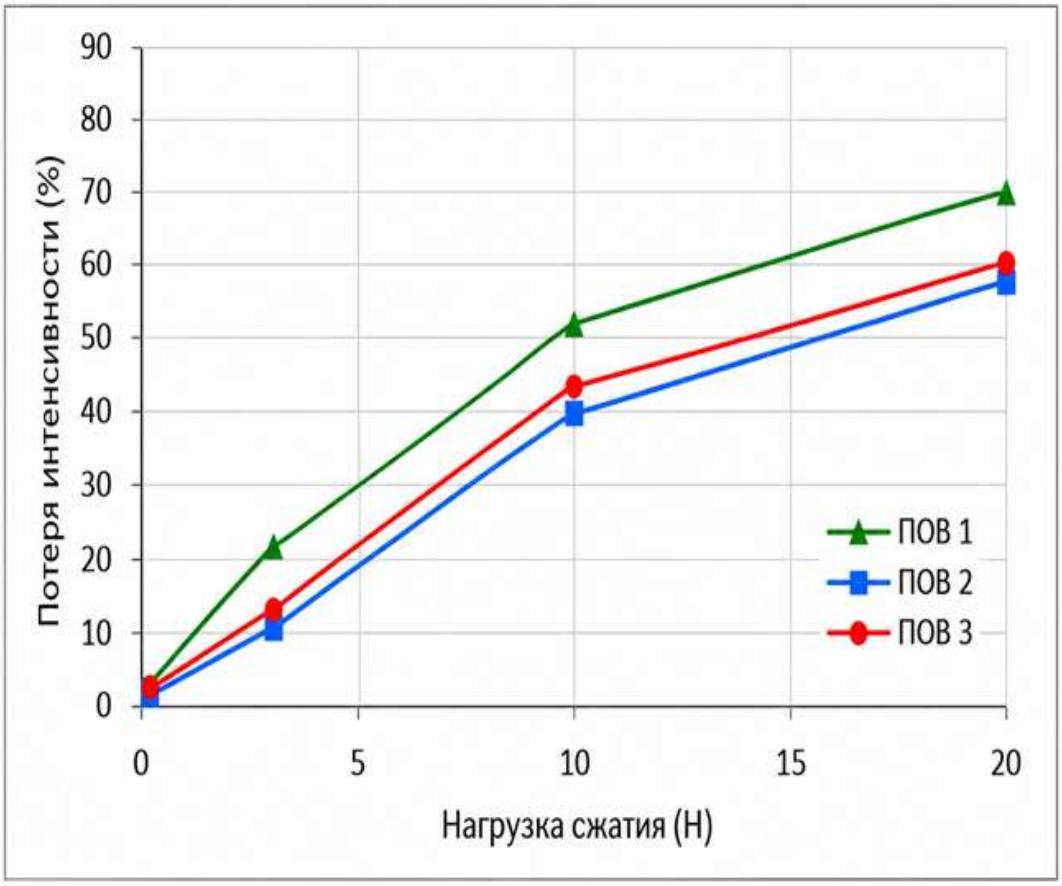


Рисунок 3.3 - Эволюция потери излучения в зависимости от приложенной силы сжатия, при этом столбики погрешностей обозначают стандартное отклонение. Аппроксимационные кривые второго порядка показаны пунктирными линиями.

Для аппроксимации кривых можно использовать полином второго порядка (таблица 3.3).

Таблица 3.3 - Коэффициенты полиномиальных уравнений $y = ax^2 + bx + c$

Тип вязания	Коэффициент	Чувствитель-ность к сжатию	Чувствительность к трению	
			Нормальная сила	Тангенциальная сила
Одинарный трикотаж	A	-0.16	-0.15	-0.87
	B	6.87	6.66	16.24
	C	1.11	10.06	4.91
1×1 резинка	A	-0.05	-0.07	-0.40
	B	4.61	5.35	11.57
	C	-1.56	1.42	-2.38
1×1 интерлок	A	-0.13	-0.12	-0.72
	B	5.76	5.66	13.66
	C	-1.47	15.97	11.94

Потери излучения растут полиномиально по мере увеличения нагрузки сжатия, и существует связь между потерями излучения и нагрузкой сжатия,

также известная как деформация волокна. Одинарный трикотаж наиболее уязвим из-за самых высоких значений потерь излучения. Это может быть связано с дефектом самой тонкой конструкции.

3.3 Испытание образцов на трение

На рисунке 3.4 показана повторяемость и воспроизводимость измерений с использованием результатов для одного трикотажного полотна. Среднее значение CV% для максимальной потери излучения во всех испытаниях составило 21%, что указывает на хорошую степень повторяемости.

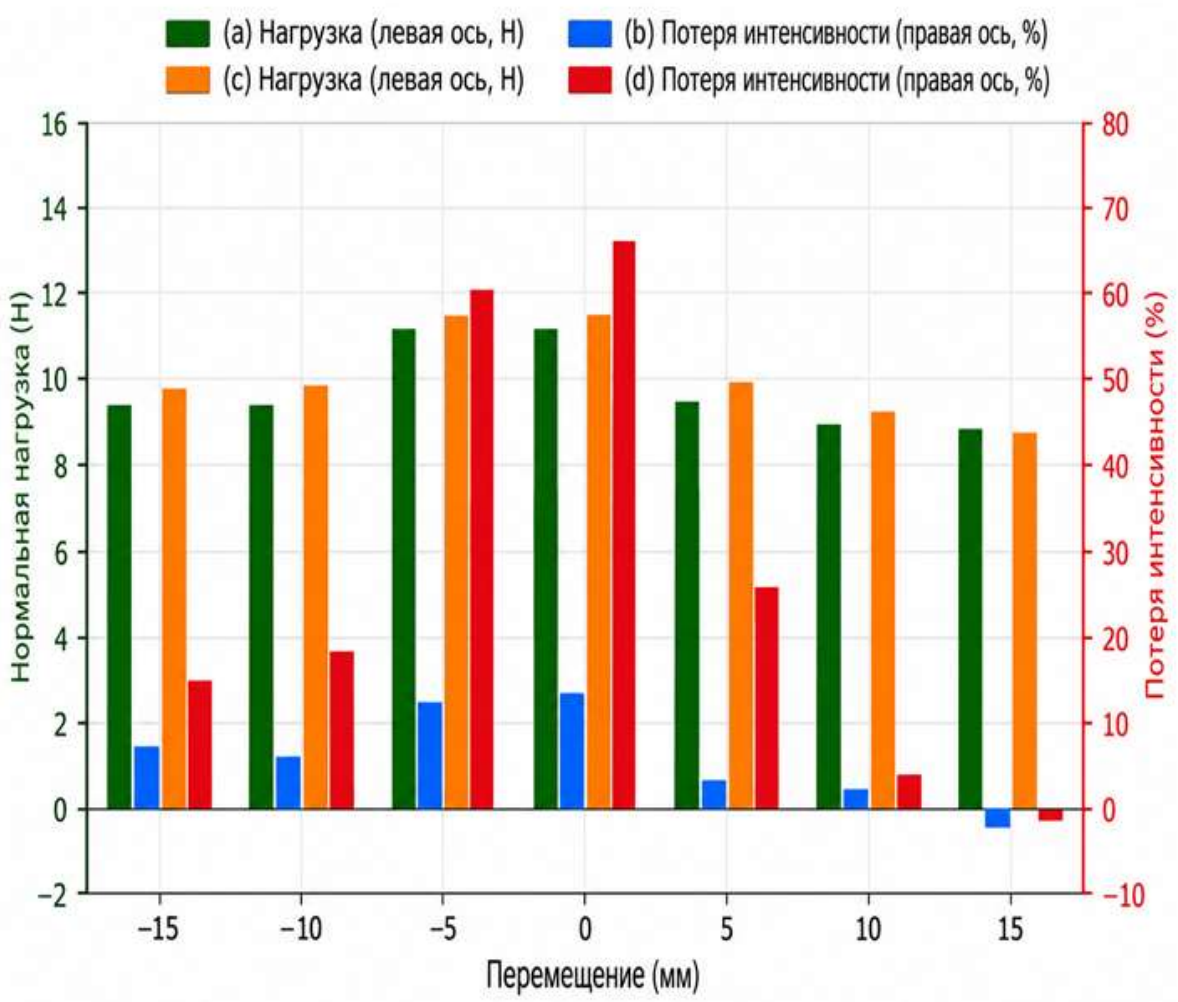


Рисунок 3.4 - Повторяемость и воспроизводимость измерения.

На рисунке 3.4 показаны результаты для трикотажного материала в условиях трения с нагрузкой 10 Н. Пять образцов были использованы для оценки последовательности измерений и поведения оптических волокон. Два компонента сигналов нормальной силы и потерь излучения, которые отображают прямые и обратные циклы, не совпадают, поскольку трикотаж не прикреплен к искусственной коже, а оптическое волокно проходит через структуру. Эта закономерность также видна при потере излучения. Как

можно показать, воспроизводимость для пяти различных образцов весьма превосходна. В действительности, средний CV% максимальных потерь излучения для всех нормальных сил и трикотажных структур получается путем усреднения CV% каждой нормальной силы и трикотажной структуры.

Чувствительность трех тканей, оснащенных инструментами, измерялась с помощью трения. На рисунке 3.5 показана эволюция потерь излучения в зависимости от смещения, а также необработанные сигналы для нормальной нагрузки, тангенциальной нагрузки и коэффициента трения, рассчитанные на основе двух предшествующих кривых. Как видно, обычная нагрузка дает больший результат при различных значениях смещения, когда ползунок находится над оптическим волокном.

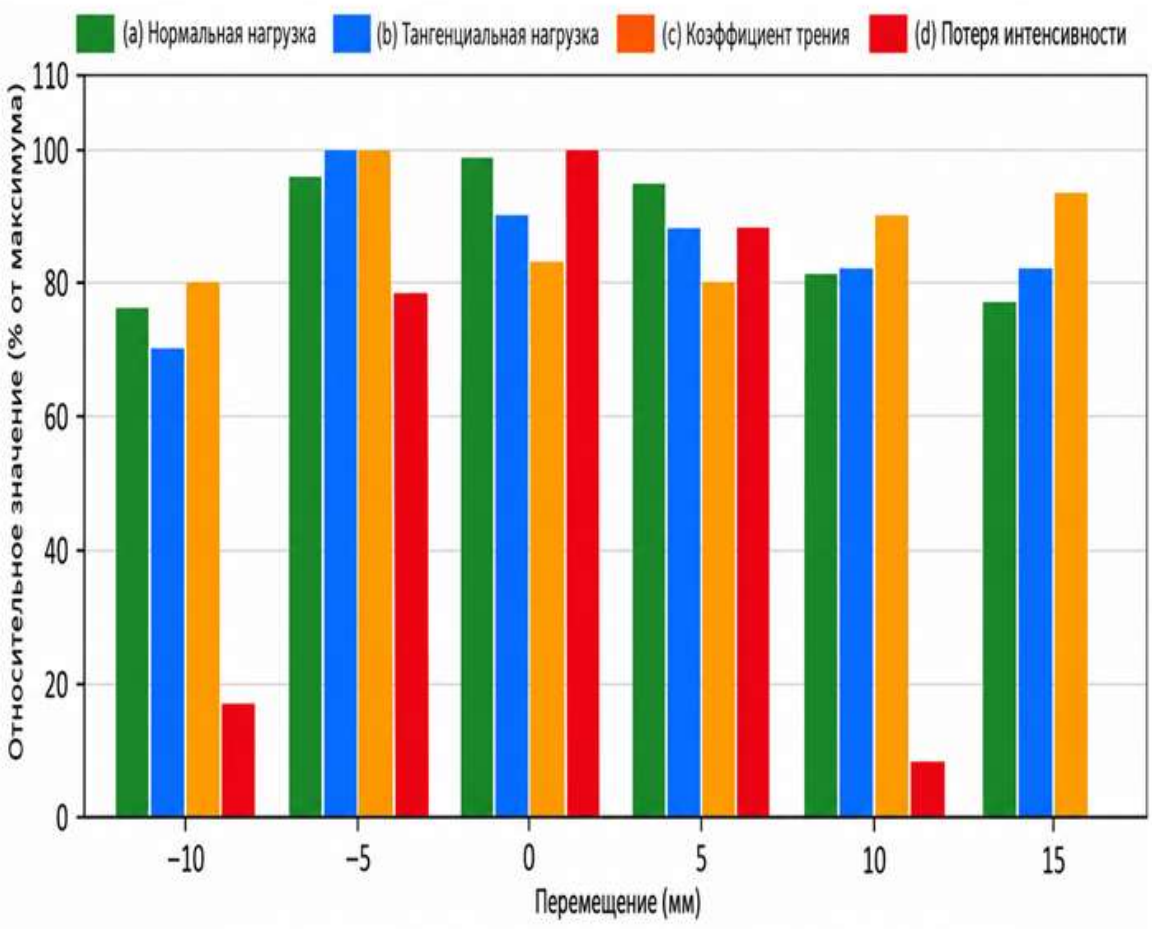


Рисунок 3.5 Эволюция нормальной нагрузки, тангенциальной нагрузки, коэффициента трения и потери освещенности одинарного трикотажного изделия в зависимости от смещения при условной нагрузке 10 Н.

Потеря излучения происходит, когда нормальная нагрузка достигает своего пика, а это означает, что виновато трение между ползунком и оптическими волокнами. На основе этих измерений уравнение 125 степеней свободы использовалось для расчета нормальной нагрузки, тангенциальной

нагрузки и потерь излучения при смещении оптического волокна, вызванном трением.

На рисунке 3.6 показано, как потери излучения изменяются в зависимости от нормальной приложенной нагрузки и тангенциальной нагрузки. Для аппроксимации экспериментальных данных использовались уравнения аппроксимационной кривой и полиномиальная линия тренда второго порядка.

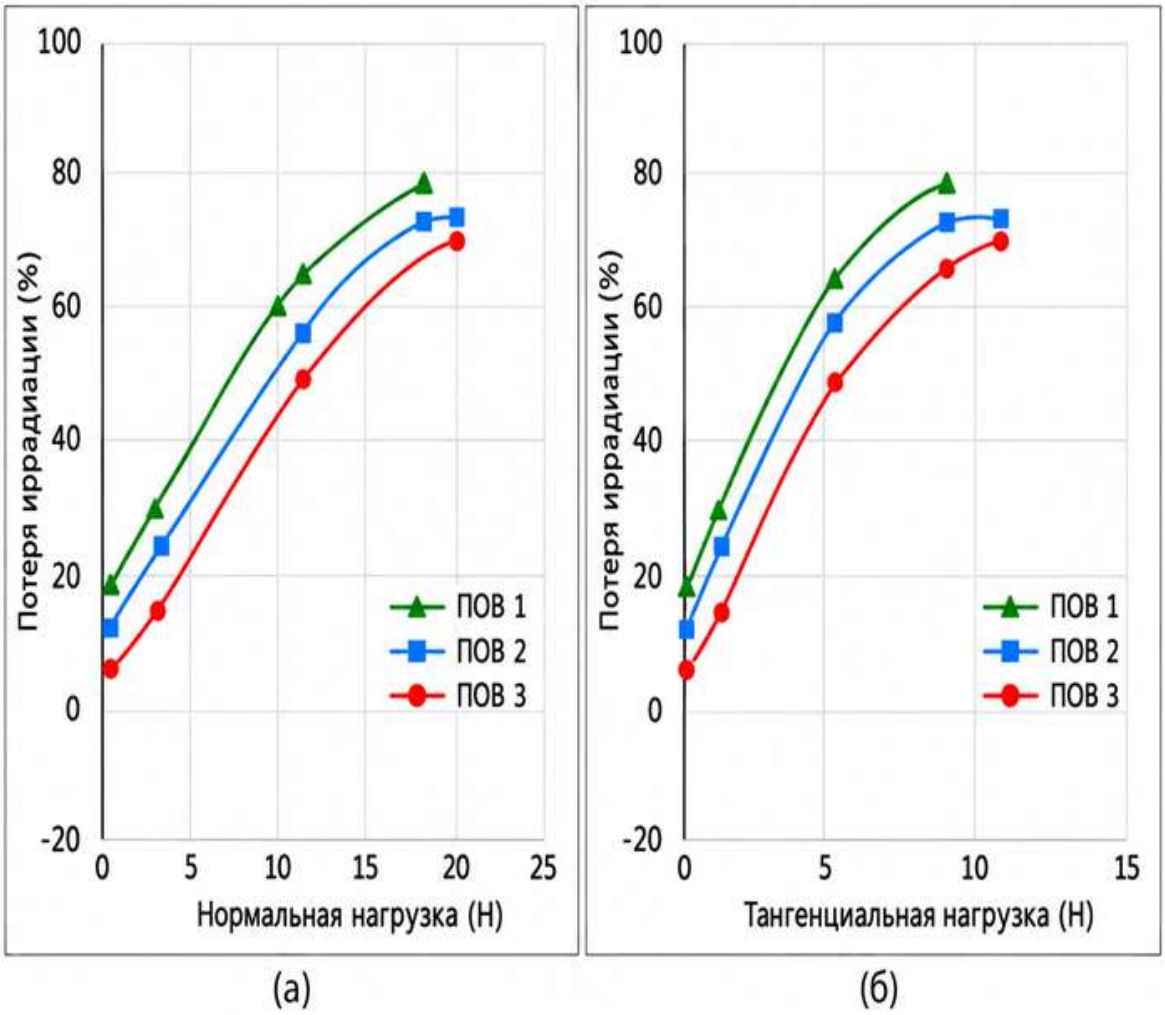


Рисунок 3.6 - Столбики показывают стандартное отклонение как потери излучения для трех трикотажных изделий, измененные в зависимости от (a) приложенной нормальной нагрузки и (b) тангенциальной нагрузки.

Как нормальные, так и тангенциальные нагрузки увеличивают потери излучения. В этом сценарии как конструкция из одиночного трикотажа, так и конструкция с блокировкой реагируют одинаково, но структура с ребрами имеет наименьшую чувствительность и потери излучения. Согласно исследованиям сжатия и трения, конструкция из одинарного трикотажа обеспечивает наибольшую чувствительность.

Сжатия и трения, обусловленные перемещением ползунка во время испытаний на трение, вызывают множество проблем в оптических волокнах. Поскольку трикотажные изделия не прикреплены к искусственной коже, оптическое волокно на поверхности ткани имеет тенденцию двигаться и изгибаться во время испытаний. Это вызывает потерю освещенности из-за изменения пути света внутри оптического провода. Подвижность оптического волокна внутри конструкции сведена к минимуму, поскольку оптические волокна лучше закреплены в тканях из одинарного трикотажа и интерлока. Эту информацию можно использовать для характеристики заболеваемости при различных размерах трикотажных структур. Оптическое волокно перемещается вместе с нитью.

Поскольку между двумя последующими рядами ребер меньше переплетающихся зазоров, оптическое волокно внутри конструкции имеет меньшую поддержку и меньше перемещается во время трения, чем трикотажное полотно. Значения отклонения ПОВ в задней части ползуна для различных конструкций подтверждают это (рисунок 3.7). Ткань в рубчик менее прогибается, чем ткань интерлок и одинарный джерси.

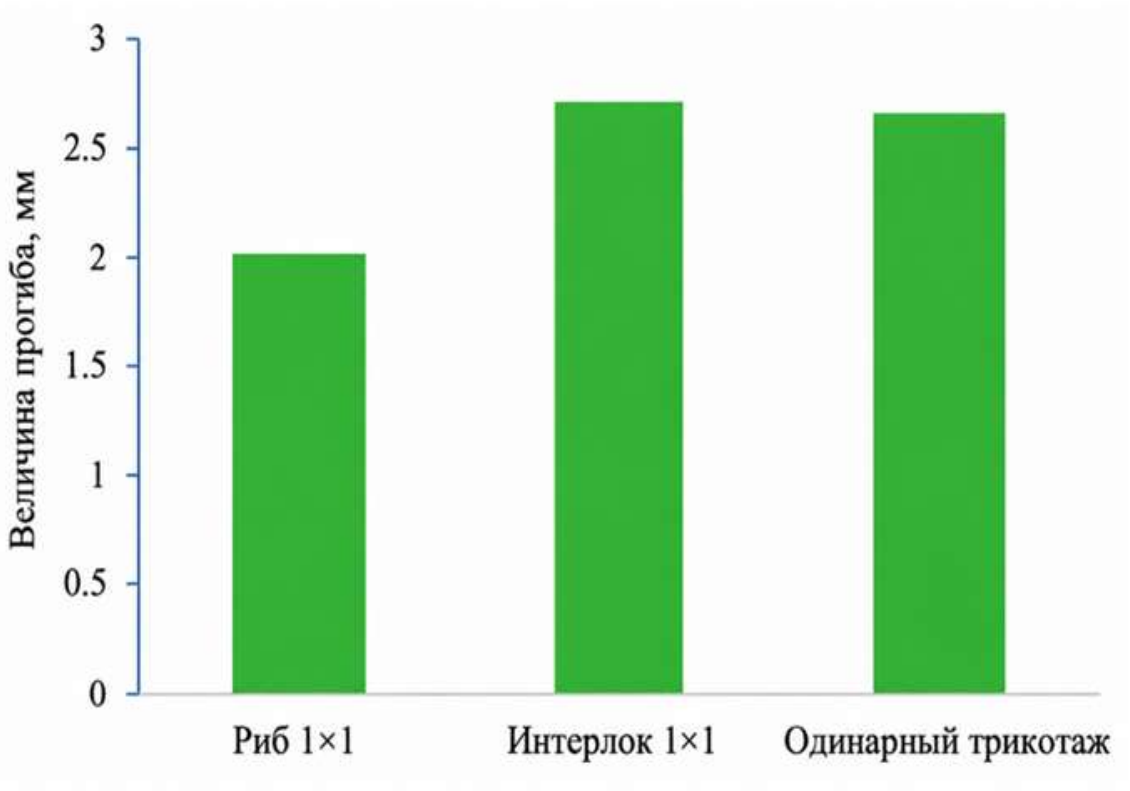


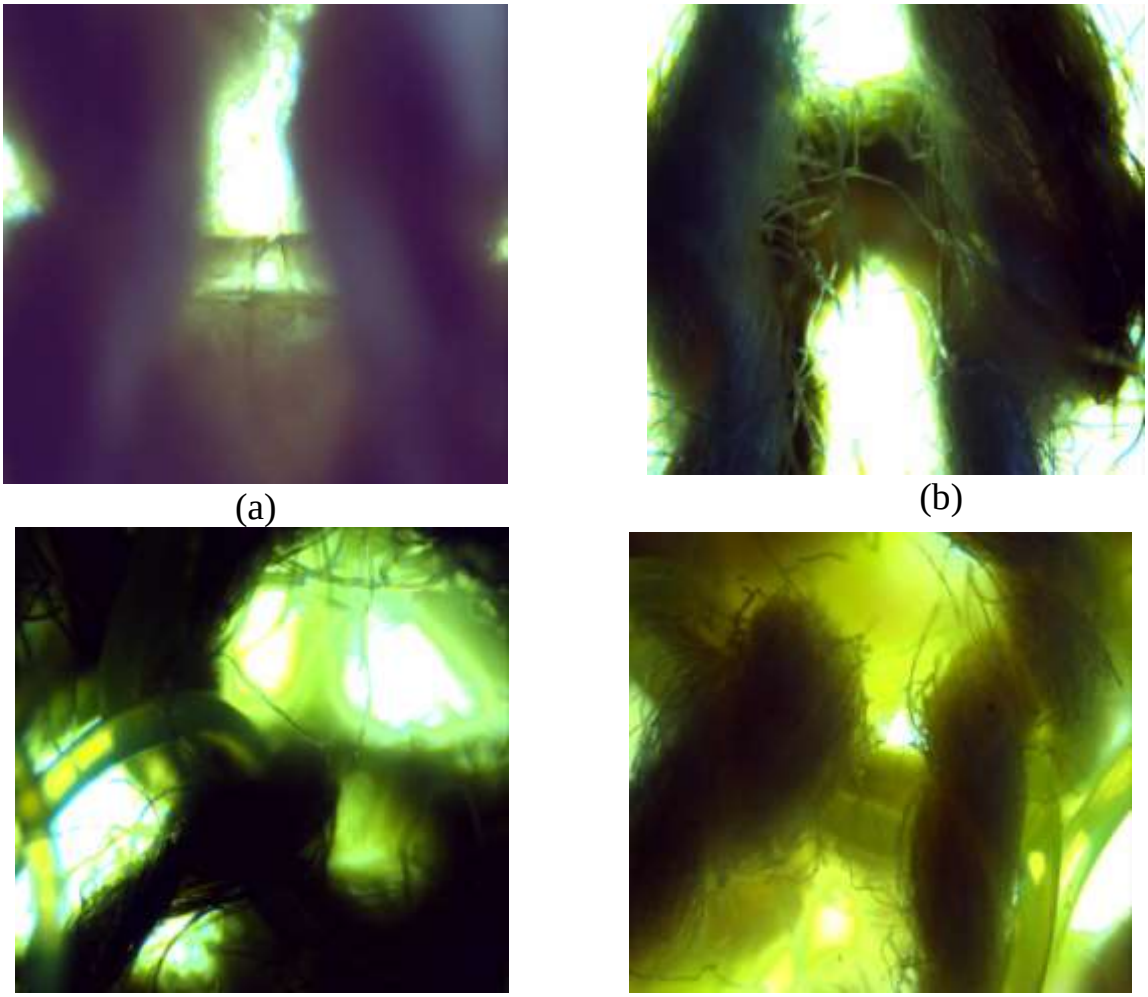
Рисунок 3.7 - Значения отклонения трех тканей для ПОВ в задней части ползунка.

Подводя итог, можно сказать, что одинарный трикотаж представляет собой конструкцию с наибольшей чувствительностью при испытаниях на сжатие и трение.

3.4 Светоотражающие свойства

В одном из вариантов модифицированного трикотажного полотна петлеобразующая основа изготовлена только из хлопчатобумажной пряжи. Оптическое волокно представляет собой мононить диаметром 0,25 мм с гладкой поверхностью. Оптическая нить в качестве уточной нити размещается между петельными рядами. Уточная нить может подаваться в каждый петельный ряд или через определенный промежуток в соответствии с заданной программой.

Внедрение ПОВ в качестве петлеобразующего элемента вызывает некоторые затруднения (рисунок 3.8 b и c).



(a) (b) (c)

Рисунок 3.8 - Увеличенные изображения полотен: (a) простое переплетение с оптическим волокном в качестве уточной нити; (б) оптическое волокно участвует в простом переплетении; (c) оптическое волокно участвует в плющевом переплетении.

По структуре и толщине ПОВ резко отличает от хлопковой пряжи (рисунок 3.9). Хлопковая пряжа состоит из пучка целлюлозных волокон, тогда как, ПОВ представляет очень толстую монолитную нить.

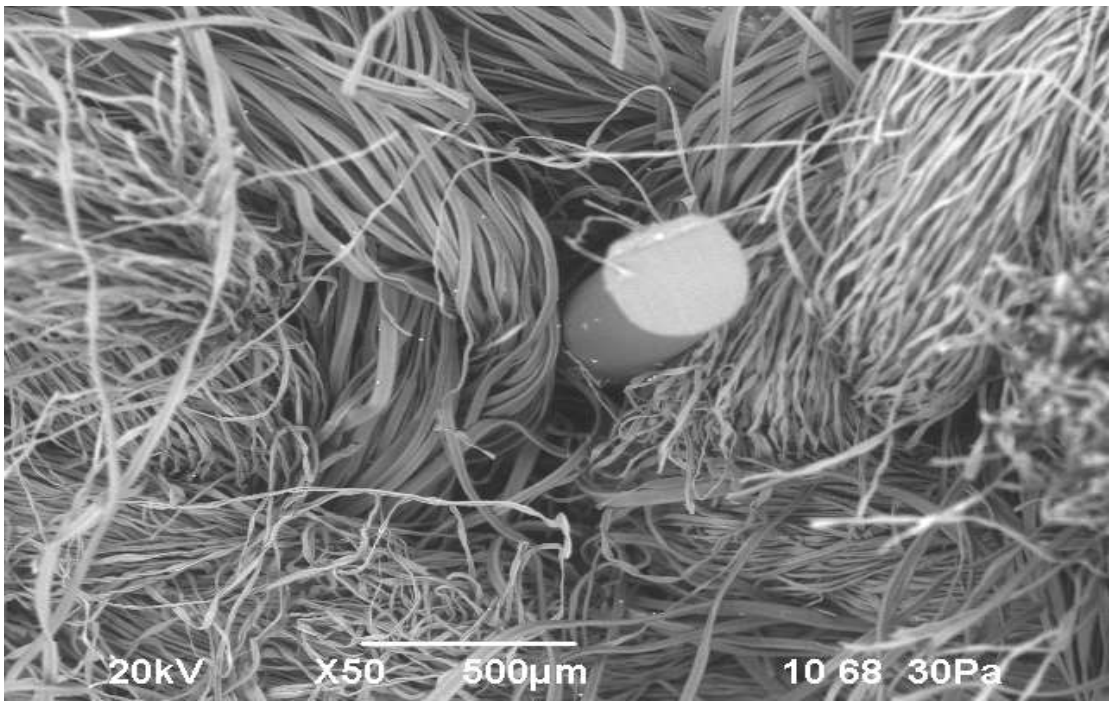


Рисунок 3.9 - Морфология поперечного сечения трикотажного полотна с полимерным оптическим волокном.

Как видно из рисунка 3.9, нить хлопковой пряжи имеет диаметр примерно 400-500 мкм и состоит из множества целлюлозных волокон диаметром 14-18 мкм. В процессе вязания пряжа претерпевает растяжение вследствие тяги, изгиба и трения о металлические части машины [31]. Пряжа резко скручивается, создавая петлю на вязаном полотне. Длина стежка и толщина иглы определяют кривизну, которой подвергается пряжа в ходе работы. Но применение оптического волокна требует особого подхода к выбору иглы и способа вязания. ПОВ, будучи объемным и малоупругим, затрудняет процесс формирования полотна. Поэтому первый вариант является более приемлемым по технологии изготовления трикотажного полотна. Еще одним плюсом полотна с уточной нитью является то, что во время процесса вязания нить испытывает меньшее напряжение и трение, нежели основная петлеобразующая пряжа. А по физико-механическим свойствам он уступает двум другим образцам (таблица 3.4).

Как видно из данных таблицы, все полотна с ПОВ имеют относительно высокие физико-механические свойства по сравнению с полотном без ПОВ. В случае внедрения ПОВ в качестве уточной нити оно размещается между петельными рядами почти прямолинейно вдоль ширины полотна. Отсюда прочность по ширине этого образца намного больше, чем по длине. ПОВ в виде уточной нити не оказывает влияние на разрывную прочность по длине. Как и ожидалось, когда ПОВ участвует в петлеобразовании как в случае простого, так и плющевого переплетения, прочность полотна многократно возрастает и по длине, и по ширине. Эти полотна не разрываются до предельной нагрузки разрывной машины.

Таблица 3.4 - Физико-механические свойства трикотажных тканей с ПОВ 4

Образцы	Прочность к истиранию	Разрывная сила, Н		Удлинение, %	
		По ширине	По длине	По ширине	По длине
Полотно без ПОВ	16800	381	240	156	354
Полотно с ПОВ в качестве уточной нити	28500	более 1000	255	125	370
Полотно простого переплетения с ПОВ	более 35000	более 1000	более 1000	113	420
Полотно плюшевого переплитения с ПОВ	более 35000	более 1000	более 1000	85	550

Во всех вариантах с ПОВ относительное удлинение по ширине возрастает по сравнению с самим трикотажным полотном. Такой же показатель по ширине, наоборот снижается, но остается высоким, что характерно для трикотажных полотен.

Прочность к истиранию полотна с уточной нитью ПОВ в 1,7 раза больше, а в двух других вариантах в несколько раз больше, чем самого трикотажного полотна. Этого следовало ожидать, т.к. толстые нити синтетического полимера очень устойчивы к истиранию. Таким образом, достигнуто существенное увеличение механической прочности и прочности к истиранию с введением ПОВ в структуру трикотажного полотна.

Несколько лет назад начали производить электронный текстиль, часто известный как «умный текстиль», и некоторые из них предлагаются в настоящее время. Благодаря своим небольшим размерам и цилиндрической форме оптические волокна, применяемые в качестве датчиков в этой отрасли, обладают рядом преимуществ [91].

Тремя главными применениями оптических волокон являются передача данных, излучение света и зондирование. Оптические волокна представляют собой световоды, которые могут передавать световые сигналы на протяженности от нескольких сантиметров до многих километров. Используемое волокно зависит от применения; должен быть баланс оптических и механических свойств, что является предметом наших исследований оптических волокон в качестве датчиков [91-94]. Однако в зависимости от используемого основного полимера ПОВ могут быть в известной степени гибкими и податливыми [95].

В данной работе исследовано светоотражающее свойство ПОВ. На рисунке 3.10 видно отражение света при освещении трикотажного полотна с ПОВ в темное время сутки. Отражающим элементов является именно ПОВ, которое имеет светлооранжевый цвет.



a)



b)



c)

Рисунок 3.10 - Эффект светоотражения трикотажного полотна с ПОВ (a), (b), (c)

При освещении в ночное время полученный материал высвечивается, поэтому можно использовать как защитный элемент специальной одежды. Получены трикотажные полотна с включением ПОВ в виде мононити из ПММА. Технологически удобным способом введения полимерной нити в структуру полотна является закладывание его в петельные ряды в качестве уточной нити.

Вывод к третьей главе

В результате выполненных исследований разработаны технологические подходы к получению трикотажных полотен с интегрированным полимерным оптическим волокном и проведена комплексная оценка их строения и свойств. Полученные результаты подтвердили возможность использования полимерного оптического волокна в качестве функционального элемента трикотажных структур без нарушения целостности процесса вязания и формирования полотна.

Установлено, что особенности строения трикотажа с полимерным оптическим волокном определяются конструкцией переплетения, параметрами петлеобразования, линейной плотностью применяемых нитей и способом введения оптического волокна в структуру полотна. Изменение указанных факторов оказывает существенное влияние на распределение волокна в трикотажной структуре, равномерность его закрепления, стабильность геометрических параметров полотна и характер формирования светового потока.

Исследование физико-механических характеристик показало, что интеграция полимерного оптического волокна изменяет показатели растяжимости, деформационной способности и прочности трикотажных полотен. При этом рациональный выбор структуры переплетения и технологических режимов изготовления обеспечивает сохранение эксплуатационных свойств материала при одновременном выполнении им оптических функций.

Анализ светотехнических характеристик разработанных трикотажных полотен подтвердил, что эффективность светораспределения определяется условиями размещения полимерного оптического волокна в структуре материала, степенью его изгиба, плотностью трикотажа и особенностями взаимодействия оптического волокна с окружающими текстильными нитями. Полученные результаты свидетельствуют о возможности целенаправленного регулирования световых характеристик изделий путем изменения конструктивных параметров трикотажного полотна.

Проведенные исследования показали, что разработанные трикотажные структуры обладают комплексом свойств, необходимым для использования в изделиях интеллектуального текстиля. Сочетание достаточной гибкости, технологичности изготовления, механической устойчивости и способности к передаче и рассеянию светового потока позволяет рассматривать их в качестве основы для создания функциональной одежды, медицинских изделий, элементов световой индикации и других систем Smart-текстиля.

Полученные экспериментальные данные позволили установить взаимосвязь между технологическими параметрами изготовления, структурой трикотажного полотна и его эксплуатационными характеристиками. Выявленные закономерности могут служить научной основой для проектирования трикотажных материалов с заранее заданными физико-механическими и светотехническими свойствами.

Результаты исследований подтвердили эффективность предложенного подхода к созданию трикотажных полотен с полимерным оптическим волокном и обосновали возможность их практического применения при разработке изделий Smart-текстиля. Полученные закономерности являются основой для дальнейшего совершенствования конструкций интеллектуальных текстильных материалов, разработки новых технологических решений их производства и расширения областей их использования.

ГЛАВА 4 ПОЛУЧЕНИЕ, СТРОЕНИЕ, СВОЙСТВА МЕМБРАННЫХ ПОЛИМЕРНО-ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

4.1 Функциональные свойства

К основным функциональным свойствам мембранных полимерно-текстильных материалов относятся водоупорность, водопоглощение и «дышащая» способность, т.е. воздухопроницаемость и паропроницаемость. Функциональные свойства полученных образцов мембранных полимерно-текстильных материалов представлены в рисунках 4.1 и 4.2. Рисунок 4.1 показывает изменение водопоглощения и водоупорности материалов в зависимости от природы волокон и количества слоев полимера.

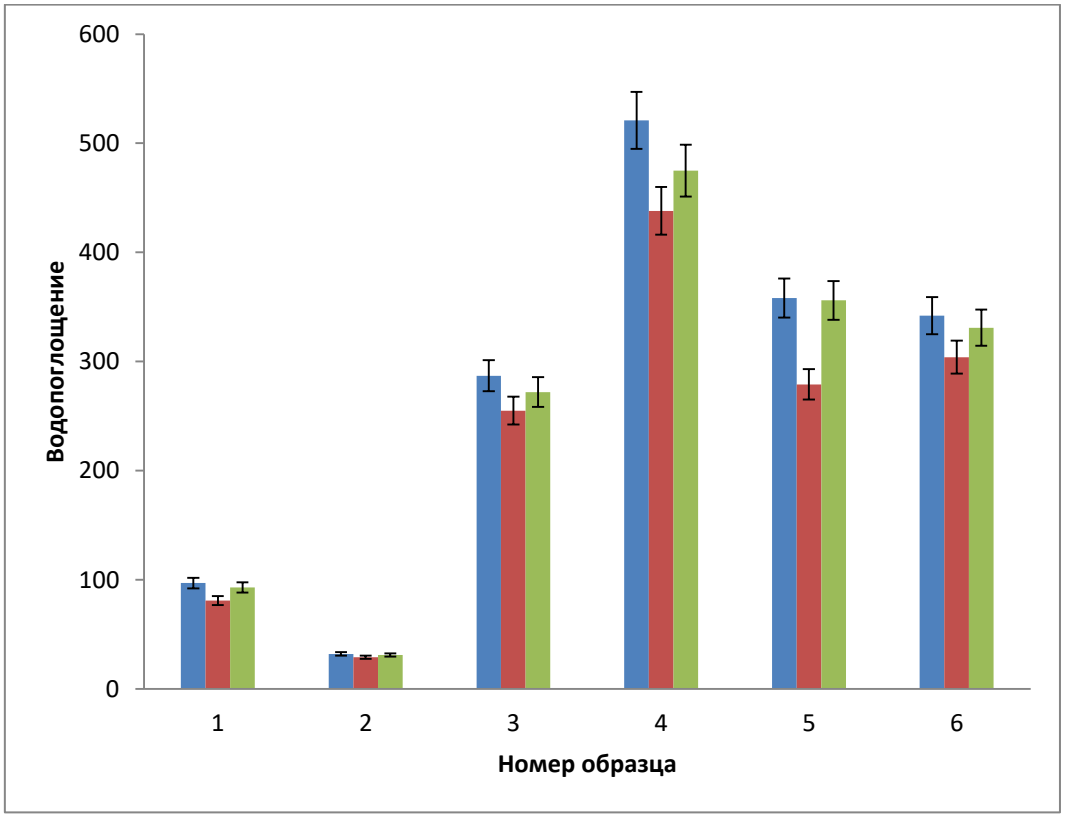


Рисунок 4.1 - Зависимость водопоглощения мембранных материалов от вида текстильного полотна (номер образца и вид полотна по таблице 2.1) и количества слоев полимера: без полимера (1 столбик, синий), два слоя (2 столбик, красный) и четыре слоя (тритий столбик, зеленый) полимера

Как видно из данных рисунка 4.1, махровые текстильные полотна с ворсом имеют самые высокие показатели водопоглощения. Как и ожидалось, полиэфирное полотно из наименее гидрофильных волокон имеет самые низкие показатели водопоглощения. Сам полимерный слой и его количество не оказывают существенного влияния на показатель водопоглощения. В то же время полимерный слой существенно влияет на водоупорность материала.

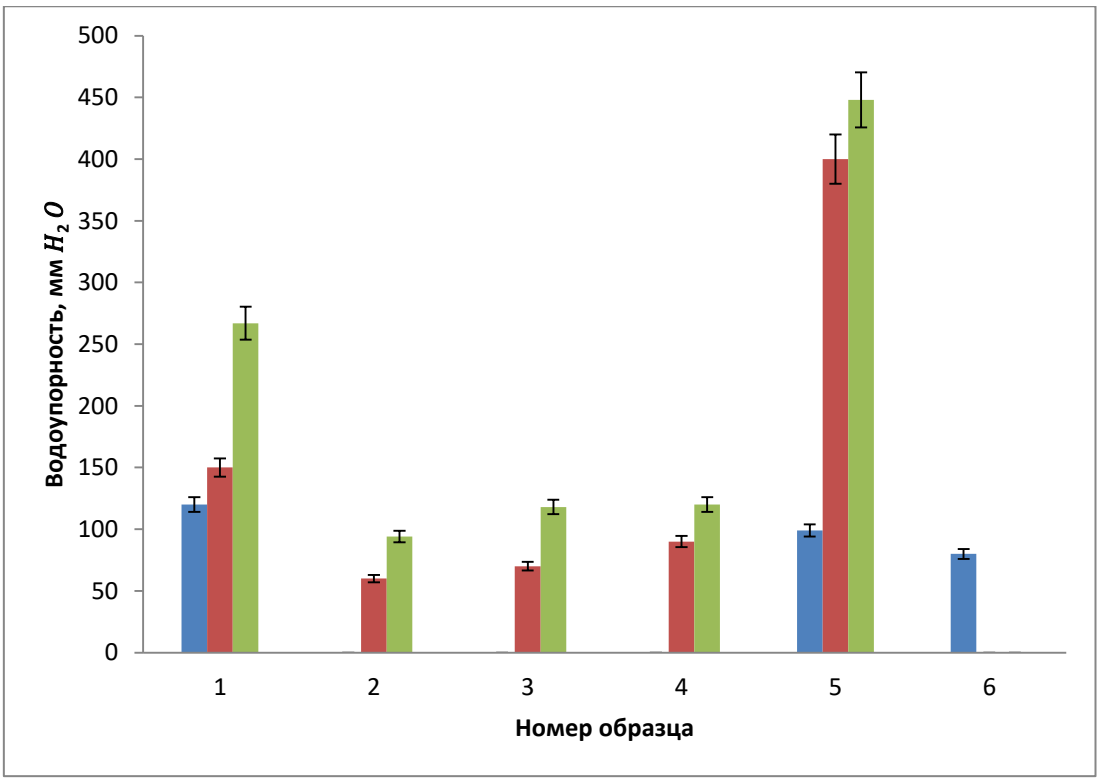


Рисунок 4.2 - Зависимость водоупорности мембранных материалов от вида текстильного полотна (номер образца и вид полотна по таблице 2.1) и количества слоев полимера: без полимера (1 столбик, синий), два слоя (2 столбик, красный) и четыре слоя (тритий столбик, зеленый) полимера

По водоупорности были получены очень интересные результаты. Среди исходных полотен самое высокое гидроизоляционное свойство имеет суровая хлопчатобумажная ткань (образец №1), водоупорность которого составляет 120±12 мм H_2O. Водоупорность махровой х/б ткани с односторонним ворсом (образец №5) составляет 105±10 мм H_2O, велюрового трикотажного полотна (образец №6) – 80±8 мм H_2O.

Исходные образцы №2, №3 и №4 не оказали никого сопротивления водяному столбцу, их водоупорность равна 0+(5-7) мм H_2O. После нанесения полимерного слоя в этих образцах появляется водоупорность, причем, с увеличением количества слоев полимера водоупорность растет. Обычно сплошная гидрофобная полимерная плёнка, в отличие от сетчатой или пористой, не пропускает воду, воздух и водяной пар [57, 58, 7, 101]. Видимо полимерный слой на поверхности этих волокон образует микропористую структуру, размер пор которых меньше, чем диаметр просачивающихся водяных капель.

После нанесения полимерного слоя в образце 6 совсем исчезает водоупорность. Видимо, ПМА склеивает волокна трикотажа в более плотную нить, а размер пор между ними увеличивается; и материал не оказывает сопротивления водяному столбцу. Очень высокую водоупорность проявляет образец 5, материал на основе махрового хлопкового полотна с

односторонним ворсом. Несмотря на высокие гидроизоляционные свойства, материал сохраняет воздухопроницаемость и паропроницаемость (рисунок 4.3).

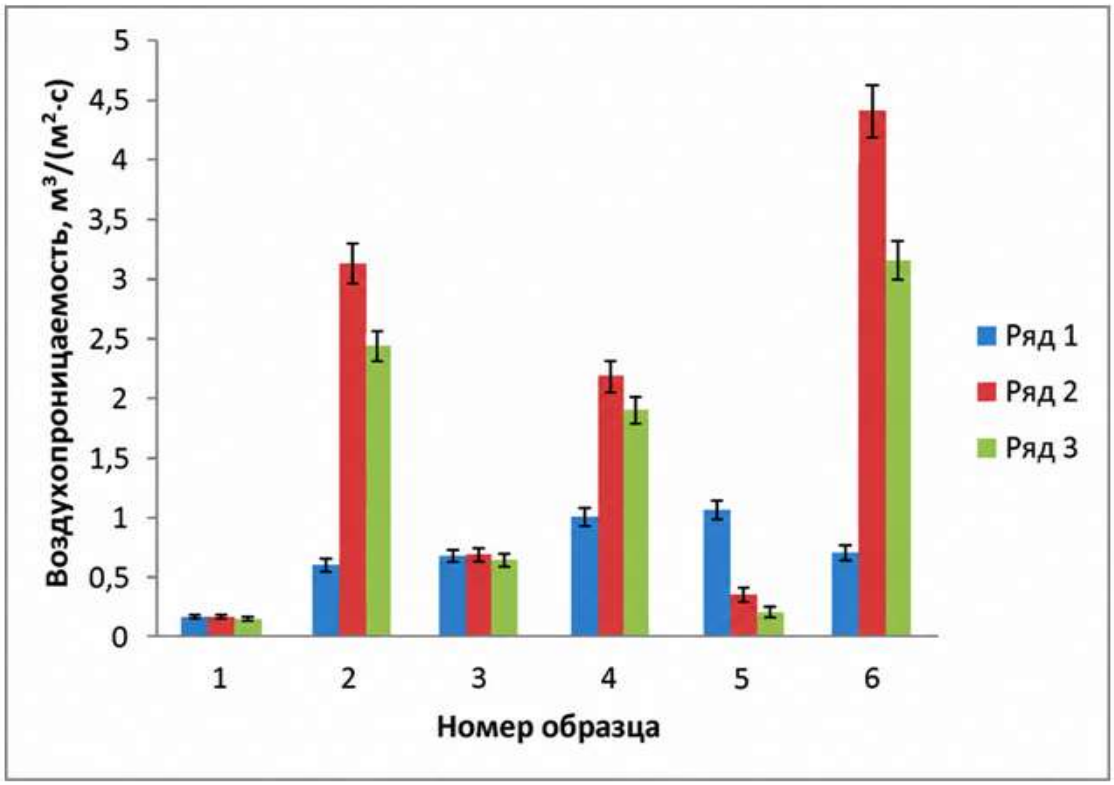


Рисунок 4.3 - Зависимость воздухопроницаемости (мембранных материалов от вида текстильного полотна (номер образца и вид полотна по таблице 2.1) и количества слоев полимера: без полимера (Ряд 1), два слоя (Ряд 2) и четыре слоя (Ряд 3) полимера.

Как и ожидалось образцы с низкой водоупорностью имеют высокие показатели воздухо- и паропроницаемости. Очень высоко воздухопроницемость образца №6, который имеет нулевое значение водоупорности. Примечательно, что в отличие от материала на основе суровой ткани, махровая ткань с полимерным слоем (образец №5) имеет нормальную воздухопроницаемость и особенно парапроницаемость (рисунок 4.4).

Образец 4, изготовленный из махровой хлопчатобумажной ткани с двусторонним ворсом, продемонстрировал сочетание высокой водопоглощаемости, умеренной водостойкости и существенной воздухо- и паропроницаемости. Среди всех образцов образец 5, изготовленный из односторонней махровой хлопчатобумажной ткани, продемонстрировал оптимальный баланс свойств, сочетая высокую водостойкость с достаточной водопоглощаемостью и сохранением воздухопроницаемости. Это делает его перспективным кандидатом для использования в качестве воздухопроницаемого водонепроницаемого материала.

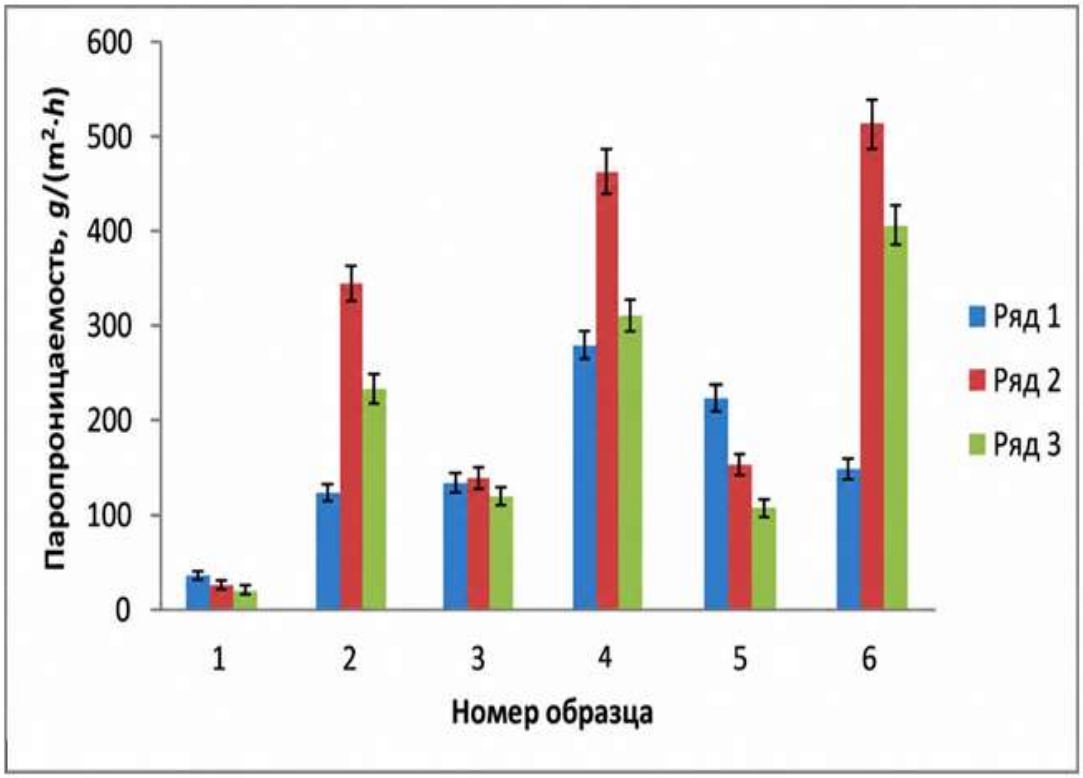


Рисунок 4.4 - Зависимость паропроницаемости мембранных материалов от вида текстильного полотна (номер образца и вид полотна по таблице 2.1) и количества слоев полимера: без полимера (Ряд 1), два слоя (Ряд 2) и четыре слоя (Ряд 3) полимера.

Принцип работы полимерного слоя материала на основе махровой ткани показан на рисунке 4.5.

Как видно из рисунка 4.5, ПМА на поверхности волокон образует микропористую структуру с размерами пор от нескольких до десятки микрон. Наличие в макромолекулах целлюлозных волокон сильнополярных гидрофильных групп создает значительное силовое поле, которое притягивает и удерживает молекулы воды в махровой стороне. Микропористый гидрофобный полимерный слой препятствует прохождению воды в ту или другую сторону, так как размер капель воды (200-2500 микрон) намного больше, чем размер пор. Молекулы воздуха и паров воды (размер до 0.0004 микрон) свободно проходят через микропоры полимерного слоя.

Краевой угол смачивания капли воды на поверхности без полимерного слоя составляет 35-40^{o}. Причем, буквально через 3-4 секунду вода полностью впитывается в полотно. Краевой угол смачивания капли воды на поверхности полимерного слоя составляет 135-140^{o}, что сопоставим с показателями (130-145^{o}) многих образцов гидрофобных поверхностей [53, 58, 62, 63, 65]. К тому же капля воды на поверхности полимерного слоя длительное время сохраняется и не изменяет форму.

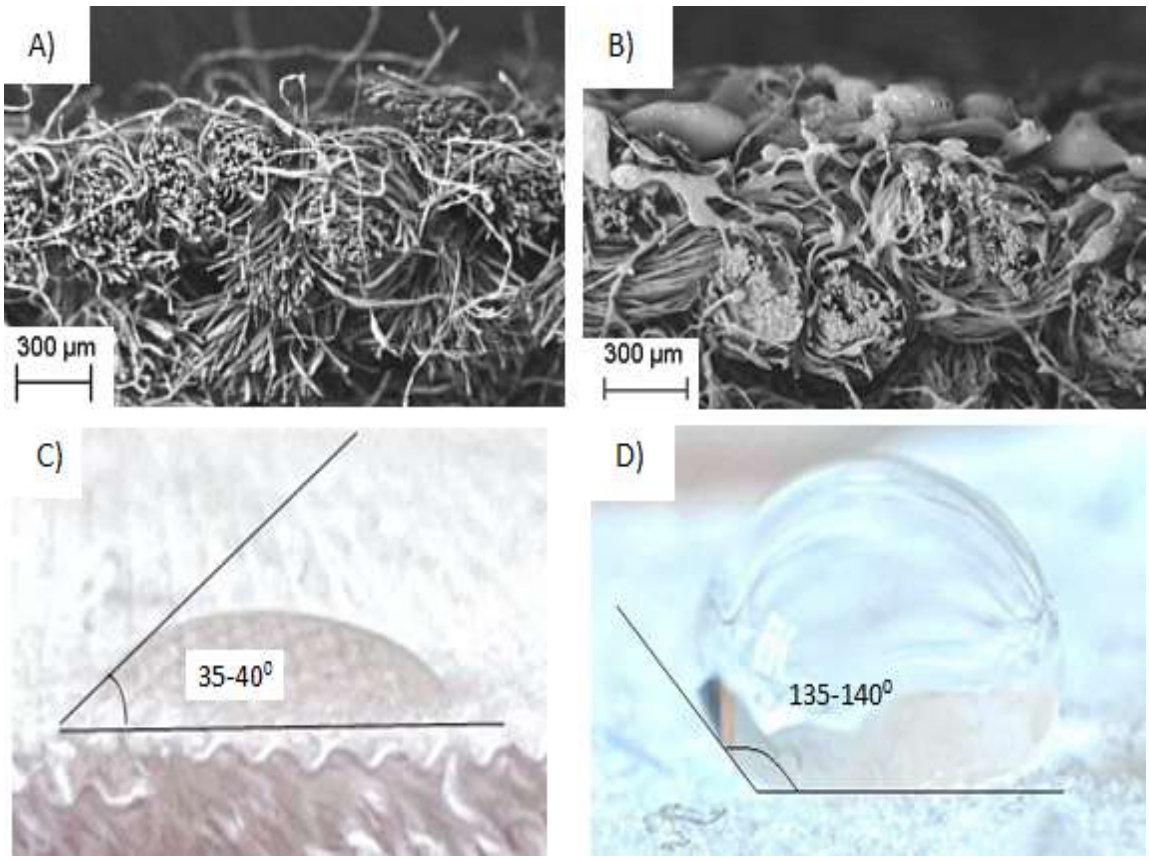


Рисунок 4.5 - Изнаночная поверхность махровой ткани без полимерного слоя (A), с полимерной слоем (B) и капля воды на поверхности без полимера (C), с полимером (D)

Рассмотрим показатели аналогичного двухслойного материала “Proneem anti-aceriens 100% D’actifs naturels” фирмы “Tex home” (Франция), ворсовая ткань которой состоит 75% из хлопка и 25% из полиэфира, а полимерная пленка материала изготовлена из полиуретана [50]. Показатель водопоглощения аналогичного материала (248%) хуже, чем эксериментальных образцов на основе махровой ткани; ее водоупорность (405 мм H_2O) уступает только экспериментальному образцу №5. При этом известный материал не имеет воздухопроницаемости (0), а паропроницаемость имеет низкую величину (31 $\frac{g}{m^2 \cdot h}$). Двухслойный материал на основе плотной мембраны из ацетата целлюлозы и текстильной основы [53] также имеет низкую паропронициамость - 16.7 $\frac{g}{m^2 \cdot h}$.

Водоупорность некоторых полимерных мембранных материалов значительно больше, чем полученного в данной работе материала, но паропроницемость и воздухопроницаемость ниже, а водопоглощение даже не рассматривается. Мембрана на основе полиэтилентерефталата с двойной структурой [2] имеет очень высокую водоупорность 90.3 кПа (1 кПа = 102 мм H_2O), но она не имеет водопоглощаюшей способности, и паропроницаемость (213 $\frac{g}{m^2 \cdot h}$) низкая, а воздухопроницаемость (0.00182 м/с) очень низкая.

Нанофиброзные мембраны на основе полимерного композита имеют высокую водоупорность в пределах 58-110 кПа [51, 52, 60, 65], но относительно низкую паропроницаемость в пределах 200-220 $\frac{g}{m^2 \cdot h}$.

4.2 Термогравиметрический и дифференциальный термический анализ полученных образцов материала

Для определения характера взаимодействия между волокнами текстильного материала и ПМА акриловой эмульсии проведены термические исследования образцов материалов. Метод ДТА дает информацию о термических свойствах, о тепловых эффектах процесса термического разложения образцов. Вместе с тем можно получить информацию о характере взаимодействия компонентов в сложных системах. Анализ результатов начинаем с образца на основе махровой хлопчатобумажной ткани №5, который имеет самую высокую водоупорность. На рисунке 4.6 предствлены кривые ТГА и ДТА полимера акриловой эмульсии - ПМА, махровой ткани (образец 5) и мембранного материала “махровая ткань – акриловая эмульсия” (образец 5Б). А в таблице 4.1 приводятся экстримальные температуры процессов разложения образцов. До 300^{o}C в ПМА наблюдается незначительное потеря массы (примерно 4%), связанное с улетучиванием низкомолекулярных побочных веществ. Интенсивная потеря массы наблюдается после 310^{o}C и до 430^{o}C, с эндотермическим тепловым эффектом величиной 620.15 Дж/г, пик которой приходится на 402.66^{o}C. В этом интервале температуры образец полимера полностью разлагается в результате деполимеризации и выделения мономера. Вместе с тем на кривой ДТА можно заметить незначительные шероховатости в интервале 220-240^{o}C, связанные видимо, с теплотой плавления полиметилакрилата. Интенсивное термическое разложение образца махровой ткани начинается с температуры 275^{o}C и продолжается до 397^{o}C. При этом теряется около 85% массы образца, на кривой ДТА обнаружен эндотермический тепловой эффект процесса разложения целлюлозы при пике 374.46^{o}C и величиной 434.78 Дж/г.

Характер кривых ТГА и ДТА образца материала “махровая ткань–ПМА” соответствует кривым однофазного и однокомпонентного материала, т.е. имеет явно выраженную одну фазу разложения в интервале 260-390^{o}C с эндотермическим эффектом величиной 529.18 Дж/г. При этом снижается как начало интенсивного термического разложения, так и температурный пик теплового эффекта, величина которого больше, чем целлюлозы махровой ткани, но меньше, чем ПМА акриловой эмульсии. Такое поведение обусловлено рядом химико-физических факторов.

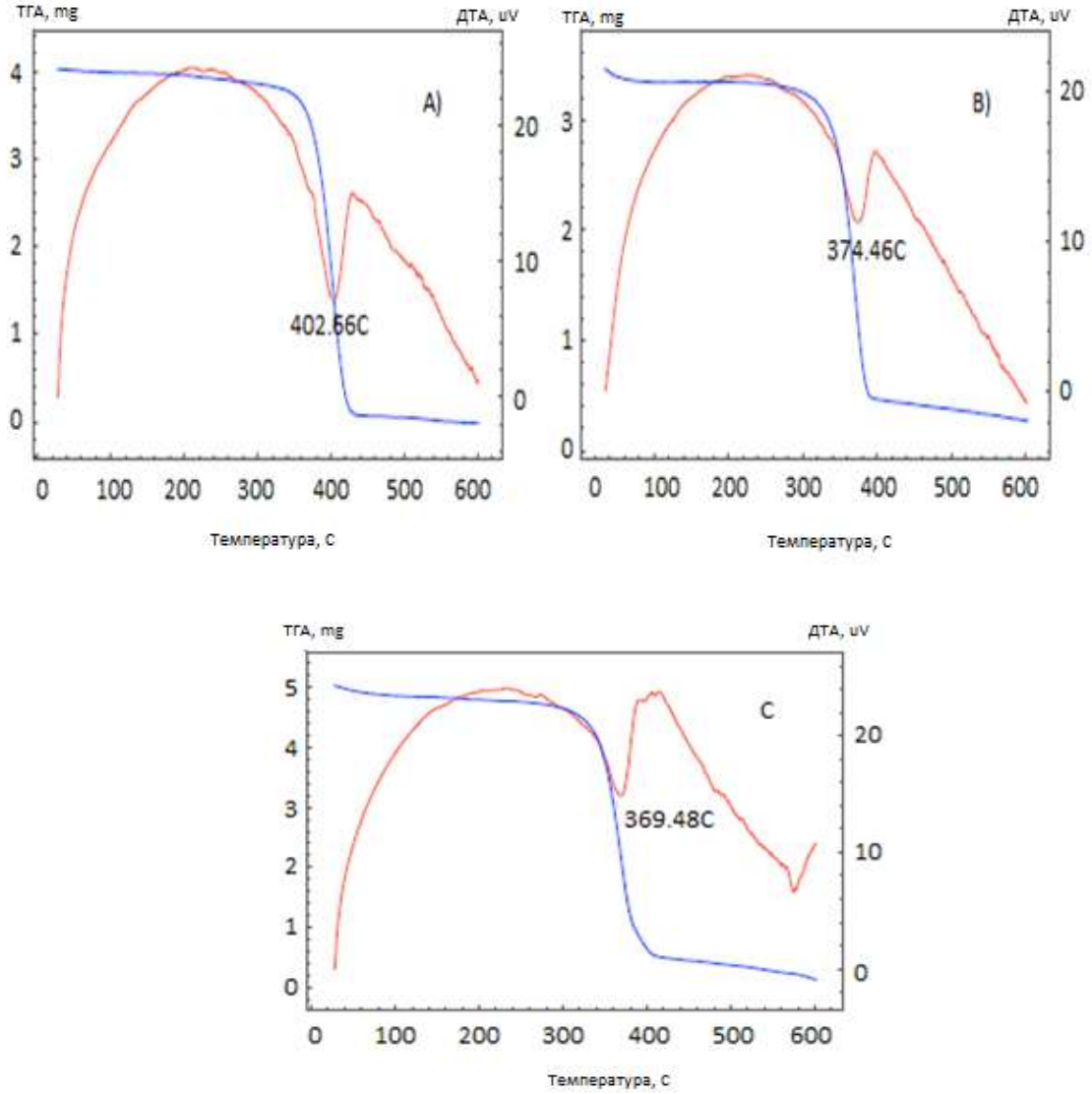


Рисунок 4.6 - Кривые ТГА (синяя) и ДТА (красная) ПМА (А), махровой х/б ткани (В) и мембранного материала «Махровая ткань-ПМА» (С)

Макромолекулы ПМА в процессе модификации равномерно проникают в пористую структуру хлопковых волокон и образуют устойчивую сеть межмолекулярных взаимодействий с целлюлозой. Межмолекулярное взаимодействие включает множественные водородные связи между кислородом сложноэфирных групп ПМА и водородом гидроксильных групп целлюлозы, а также ван-дер-ваальсовы взаимодействия и частичное физическое закрепление полимера в микрофибриллярной структуре волокна. В результате формируется квазигомогенная интерполимерная система, в которой термическая деструкция обоих компонентов протекает не независимо, а как единый кооперативный процесс. В присутствии ПМА происходит частичное разупорядочение кристаллитов целлюлозы, снижение степени её внутримолекулярной и межмолекулярной связности. Деструкционные продукты ПМА способны оказывать

радикальное каталитическое действие, ускоряя начальные стадии дегидратации и деполимеризации целлюлозы. Эти процессы приводят к снижению энергии активации и, соответственно, к более раннему началу термического разложения, а также к смещению температурного пика разложения в область меньших температур по сравнению с индивидуальными компонентами.

Таблица 4.1 - Экстремальные точки процессов разложения на кривых ТГА и ДТА

Точки процесса	ТГА			Точки процесса	ДТА
ПМА					
Начало, °С	27.39	300.31		Начало, °С	310.09
Конец, °С	300.31	601.76		Пик, °С	402.66
Потеря массы, %	-4.228	-95.245		Конец, °С	429.79
	-99.473			Тепловой эффект, Дж/г	-620.15
Махровая х/б ткань (образец №5)					
Начало, °С	33.90	275.48	397.30	Начало, °С	275.39
Конец, °С	275.48	397.30	601.09	Пик, °С	374.46
Потеря массы, %	-4.790	-81.669	-5.803	Конец, °С	397.27
	-92.262			Тепловой эффект, Дж/г	-434.78
Мембранный материал “махровая ткань-ПМА (образец №5Б)					
Начало, °С	28.88	258.98	418.40	Начало, °С	273.94
Конец, °С	258.98	418.40	601.29	Пик, °С	369.48
Потеря массы, %	-5.458	-84.323	-7.371	Конец, °С	391.05
	-97.152			Тепловой эффект, Дж/г	-529.18

Температурные интервалы пиролиза целлюлозы и ПМА существенно перекрываются. В условиях тесного молекулярного контакта между компонентами промежуточные радикалы ПМА и целлюлозы могут инициировать взаимную деполимеризацию и облегчать фрагментацию соседних макромолекул. Вследствие этого разложение системы идёт не по двум отдельным механизмам, а по общему интегрированному радикальному пути, что и приводит к появлению единственной широкой стадии разложения, характерной для однокомпонентных материалов. Энтальпия процесса разложения смеси (-529.19 Дж/г) занимает промежуточное значение между тепловыми эффектами ПМА (больший) и хлопка (меньший), эффект не является простой аддитивной суммой. Это объясняется тем, что

разложение ПМА в тесном контакте с хлопковым компонентом требует меньших энергетических затрат. Процессы дегидратации и деструкции облегчаются под действием фрагментов разложения, часть элементарных актов разложения обоих компонентов становится общей и протекает с меньшими энтальпийными затратами. Величина теплового эффекта отражает энергетически кооперативное поведение системы, а не механическое суммирование эффектов разложения отдельных полимеров.

Теперь сравним результаты анализов материалов с хлопковыми и полиэфирными волокнами. На рисунке 4.7 и таблице 4.2 представлены результаты термического анализа хлопчатобумажной (образец 1) и полиэфирной (образец 2) тканей, а также мембранных материалов на их основе (образцы 1Б и 2Б).

Нагревание хлопковой ткани сопровождается тремя основными этапами: до ~220°С наблюдается потеря массы 4-5 %, обусловленная удалением свободной и связанной влаги; в интервале 300-450°С происходит основная потеря массы (≈70-75 %), связанная с термическим разложением целлюлозы; при температурах выше 450°С отмечается дальнейшая деградация углеродсодержащего остатка. Из-за того, что процесс нагревания происходит в инертной среде, на кривой ДТА фиксируется одиночный эндотермический пик при 342.85°С, соответствующий основному этапу пиролитической деструкции целлюлозной макромолекулы без окисления. При термическом разложении происходит дегидратация, разрыв 1,4-β-гликозидных связей целлюлозы с образованием низкомолекулярных летучих фрагментов и твердых углеродистых остатков. После пропитки АЭ характер термического поведения изменяется. Температурный интервал низкотемпературной потери массы практически не смещается, однако суммарная потеря массы к 600°С возрастает до 80-90%, что связано с дополнительным вкладом акриловой полимерной фазы. Эндотермический пик смещается в область более высоких температур (360-370°С) и существенно возрастает по энтальпии, что свидетельствует о наложении процессов термической деструкции целлюлозы и акрилового связующего. Это указывает на формирование композиционного материала, в котором разложение отдельных компонентов происходит в перекрывающихся температурных интервалах.

На кривой ДТА полиэфирной ткани три эндотермических тепловых эффектов. Первый величиной ΔH = 36.97 Дж/г с пиком при 60.85°С и с потерей массы менее 4%, который не связан с разрушением полимера и соответствует удалению влаги и летучих примесей. Второй величиной 25.07 Дж/г с пиком при 257.12°С и без потери массы, который соответствует фазовым переходам - плавлению кристаллических областей полиэтилентерефталата. Третий, самый большой, величиной 500.79 Дж/г с пиком при 431.07°С и с потерей массы примерно 70%, который является основным этапом термического разрушения полиэфира с разрывом сложноэфирных связей и деполимеризации. Наблюдаемые эндотермические

тепловые эффекты при нагревании полиэфирной ткани соответствуют последовательному протеканию физически обусловленных процессов (десорбция влаги и плавление кристаллической фазы) и последующей глубокой термической деструкции полимерной матрицы, сопровождающейся значительной потерей массы.

Пропитка полиэфирной ткани акриловой эмульсией приводит к исчезновению низкотемпературного пика, что свидетельствует о снижении влагосодержания и формировании полимерного покрытия. Основной эндотермический эффект деструкции смещается в область более низких температур (~400-410°C) и сопровождается увеличением энтальпии и суммарной потери массы, что обусловлено совмещённым разложением полиэфирной и акриловой фаз.

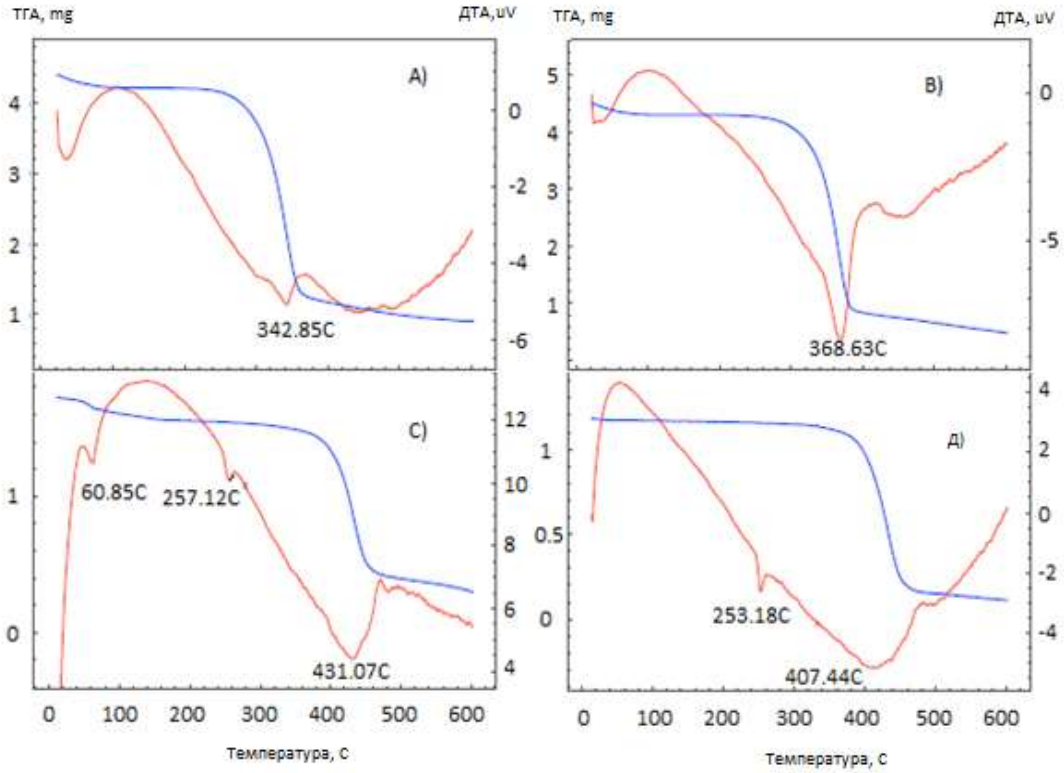


Рисунок 4.7 - Кривые ТГА (синяя) и ДТА (красная): х/б ткань (А), х/б ткань-ПМА (Б), полиэфирная ткань (С) и «полиэфирная ткань-ПМА» (Д)

Теперь приступаем к анализу смесевых хлопко-полиэфирных тканей, результаты ТГА и ДТА которых представлены на рисунке 4.8 и в таблице 4.3. Полубархатная ткань соткана из хлопковой пряжи (основа) и полиэфирной нити (уток), а велюровый трикотаж вязан из хлопко-полиэфирной пряжи. До 360°C полубархатная ткань теряет всего ~1% массы, затем примерно до 450°C происходит интенсивная потеря массы. На кривой ДТА этой ткани обнаружены три эндотермических пиков: при 256.83°C величиной 47.46 Дж/г

(плавление полиэфира), при 393.28°С величиной 32.32 Дж/г (разложение целлюлозы) и при 425.17°С величиной 71.90 Дж/г (разложение полиэфира).

Таблица 4.2 - Экстремальные точки процессов разложения на кривых ТГА и ДТА

Точки процесса	ТГА			Точки процесса	ДТА		
Х/б ткань (образец №1)							
Начало, °С	22.17	218.5	437.48	Начало, °С	315.1		
Конец, °С	218.5	437.48	601.78	Пик, °С	342.85		
Потеря массы, %	-4.629	-70.479	-4.538	Конец, °С	360.67		
	-79.646			Тепловой эффект, Дж/г	-20.45		
Мембранный материал “х/б ткань-ПМА (образец №1Б)							
Начало, °С	21.33	234.9		Начало, °С	292.01		
Конец, °С	234.9	601.8		Пик, °С	368.63		
Потеря массы, %	-4.833	-84.571		Конец, °С	404.14		
	-89.404			Тепловой эффект, Дж/г	-269.8		
Полиэфирная ткань							
Начало, °С	11.44	294.36		Начало, °С	48.3	242.13	364.89
Конец, °С	294.36	601.68		Пик, °С	60.85	257.12	431.07
Потеря массы, %	-11.574	-71.47		Конец, °С	72.43	269.44	469.89
	-83.044			Тепловой эффект, Дж/г	-36.97	-25.07	-500.79
Мембранный материал “полиэфирная ткань-ПМА (образец №2Б)							
Начало, °С	13.78	301.68		Начало, °С	242.51	335.22	
Конец, °С	301.68	601.72		Пик, °С	253.18	404.77	
Потеря массы, %	-3.048	-87.892		Конец, °С	265.49	482.34	
	-90.94			Тепловой эффект, Дж/г	-42.87	-833.01	

В случае трикотажной ткани интенсивное разложение начинается раньше при температурах выше 309°С и также до 450°С. На кривой ДТА обнаружены два эндотермических пика: при 256.95°С величиной 41,8 Дж/г (плавление полиэфира) и при 424.27°С величиной 187,7 Дж/г (совместное разложение единой смесевой пряжи хлопка и полиэфира). Пропитка акриловой эмульсией приводит к снижению начальной потери массы; сглаживанию или слиянию промежуточных эндотермических эффектов;

увеличению энтальпии высокотемпературного пика вследствие наложения процессов разложения акриловой, хлопковой и полиэфирной фаз.

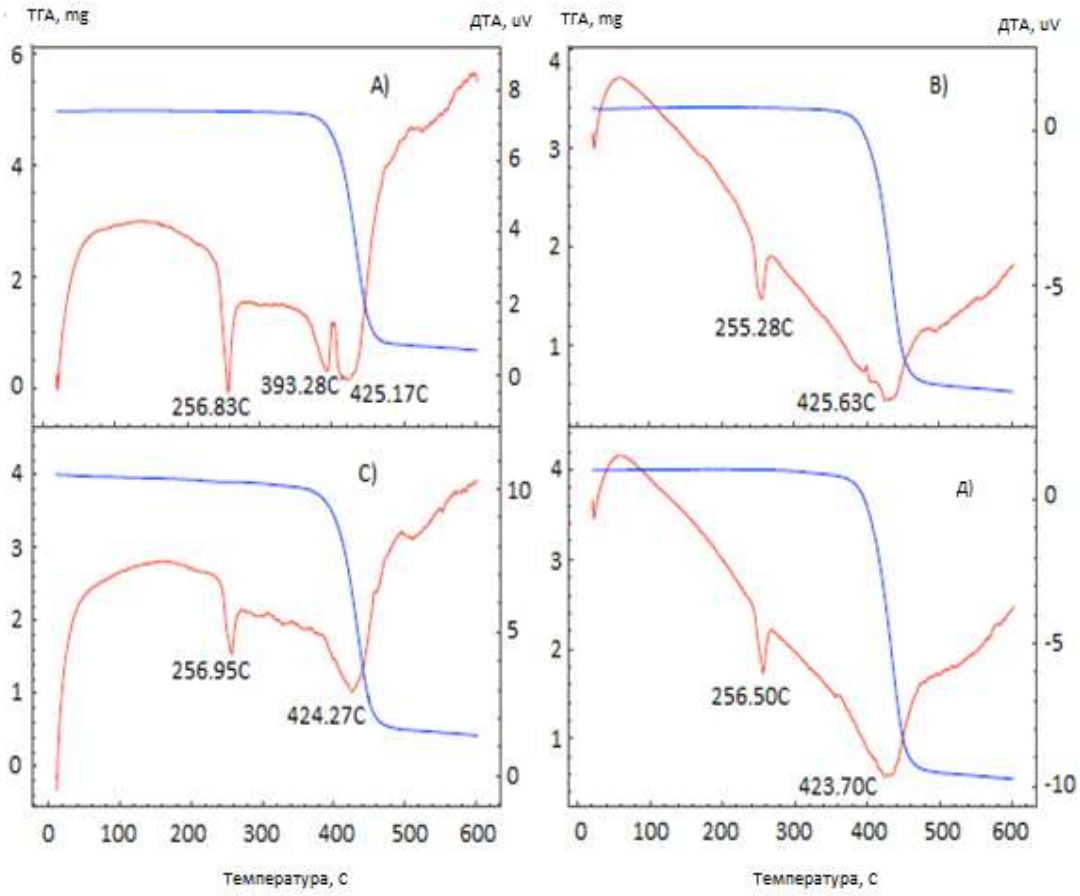


Рисунок 4.8 - Кривые ТГА (синяя) и ДТА (красная): полубархатная ткань (А), полубархат-ПМА (В), велюровый трикотаж (С) и «велюровый трикотаж-ПМА» (D)

Таким образом, характер взаимодействия исследованных тканей и ПМА в большей степени зависит от природы волокон текстильной основы. Сильнополярная среда (вода) акриловой эмульсии способствует проникновению ее в микропоры волокон хлопкового материала. Полученные данные свидетельствуют о том, что модифицированный хлопок с ПМА представляет собой физико-химическую взаимодействующую интерполимерную систему, которая при нагревании демонстрирует единый механизм термического разложения, характеризующийся снижением температуры начала деструкции, смещением максимума теплового эффекта и формированием одной интегральной стадии термического разложения. Такие особенности подтверждают существование значимых межфазных взаимодействий между целлюлозой и ПМА и позволяют рассматривать материал как квазигомогенную полимерную композицию с модифицированными термическими свойствами.

Таблица 4.3 - Экстремальные точки процессов разложения на кривых ТГА и ДТА

Точки процесса	ТГА		Точки процесса	ДТА		
Полубархатная ткань (образец №3)						
Начало, °С	18.97	360.86	Начало, °С	235.20	363.22	404.32
Конец, °С	360.86	600.39	Пик, °С	256.83	393.28	425.17
Потеря массы, %	-1.188	-85.467	Конец, °С	272.64	401.44	446.46
	-86.655		Тепловой эффект, Дж/г	-47.46	-32.32	-71.90
Мембранный материал “полубархать-ПМА” (образец №3Б)						
Начало, °С	21.92	309.17	Начало, °С	235.70		399.31
Конец, °С	309.17	601.74	Пик, °С	255.28		425.63
Потеря массы, %	-0.206	-84.439	Конец, °С	266.70		457.15
	-84.645		Тепловой эффект, Дж/г	-44.06		-83.82
Велюровый трикотаж (образец №6)						
Начало, °С	11.49	301.33	Начало, °С	237.63		383.35
Конец, °С	301.33	601.80	Пик, °С	256.95		424.27
Потеря массы, %	-3.075	-86.375	Конец, °С	271.61		456.87
	-89.45		Тепловой эффект, Дж/г	-41.75		-187.65
Мембранный материал “велюровый трикотаж-ПМА” (образец 6Б)						
Начало, °С	20.62	306.77	Начало, °С	238.63		362.39
Конец, °С	306.77	601.80	Пик, °С	256.50		423.70
Потеря массы, %	-0.351	-86.090	Конец, °С	269.44		473.35
	-86.441		Тепловой эффект, Дж/г	-35.03		-281.77

Акриловая эмульсия не оказывает существенного влияния на температуру плавления полиэфирной фазы, но изменяет механизм высокотемпературной деструкции тканей. Пропитка снижает низкотемпературные потери массы, связанные с влагой, за счёт формирования полимерного покрытия. Во всех случаях наблюдается увеличение суммарной потери массы при высоких температурах, обусловленное дополнительным вкладом акриловой матрицы. Для хлопко-полиэфирных тканей характерно двухстадийное термическое поведение, отражающее независимые переходы полиэфирной и целлюлозной фаз. Полученные данные подтверждают формирование композиционного материала с модифицированными термическими характеристиками.

4.3 Морфология поверхности и межслойного сечения полимерно-текстильных материалов

Для визуализации мембранного материала с самой высокой водоупорностью исследована морфология ее изнаночной и лицевой поверхности, а также поперечного сечения. Как видно из рисунка 4.9 изнаночная сторона махрового полотна не имеет ворса, основные и уточные нити изготовлены из одинаковой хлопковой пряжи, основная часть хлопковых волокон расположены вдоль пряжи. После напыления акриловая эмульсия не образует сплошную полимерную пленку, она сорбирована на поверхности отдельных волокон, каждое волокно покрыта слоем ПМА (особенно наглядно видно при 1000 кратном увеличении на рисунке 4.9). Гидрофобный ПМА препятствует сорбции воды на поверхность волокон. Размер водяных капель намного больше, чем межволоконные микропоры, следовательно, вода не может проходить через изнаночную поверхность материала. А вот наноразмерные молекулы воздуха и пары воды свободно просачиваются через этот поверхность.

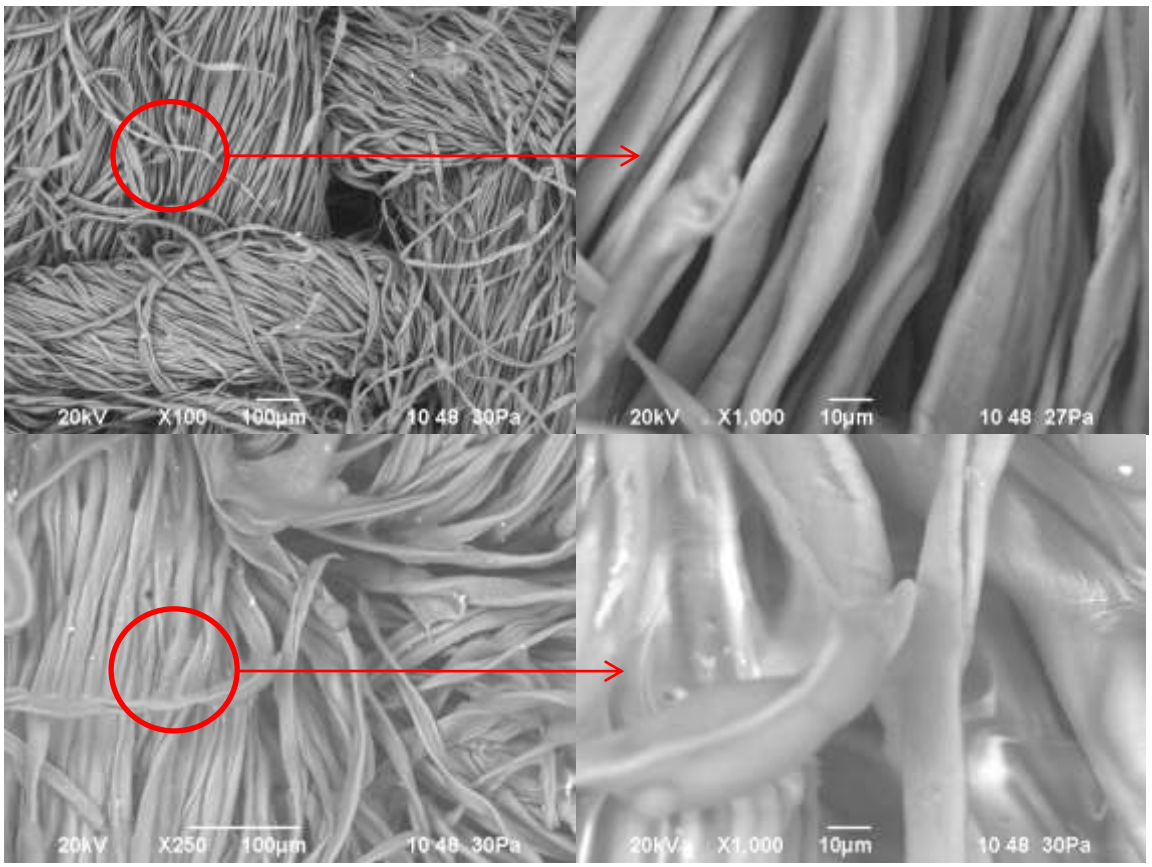


Рисунок 4.9 - СЭМ изображения безворсовой изнаночной стороны махровой хлопковой ткани до нанесения (сверху) и после нанесения акриловой эмульсии (снизу)

Махровый эффект на внутренней поверхности полотна создается системой петлеобразного ворса (рисунок 4.10). Морфология внутренней поверхности материала остается без изменения после нанесения акриловой

эмульсии, нет даже следов эмульсии. Гидрофильные хлопковые волокна объемной махровой поверхности мембаранного материала поглощают большое количество воды, которая удерживается внутри из-за микропористо-гидрофобной структуры обратной стороны.

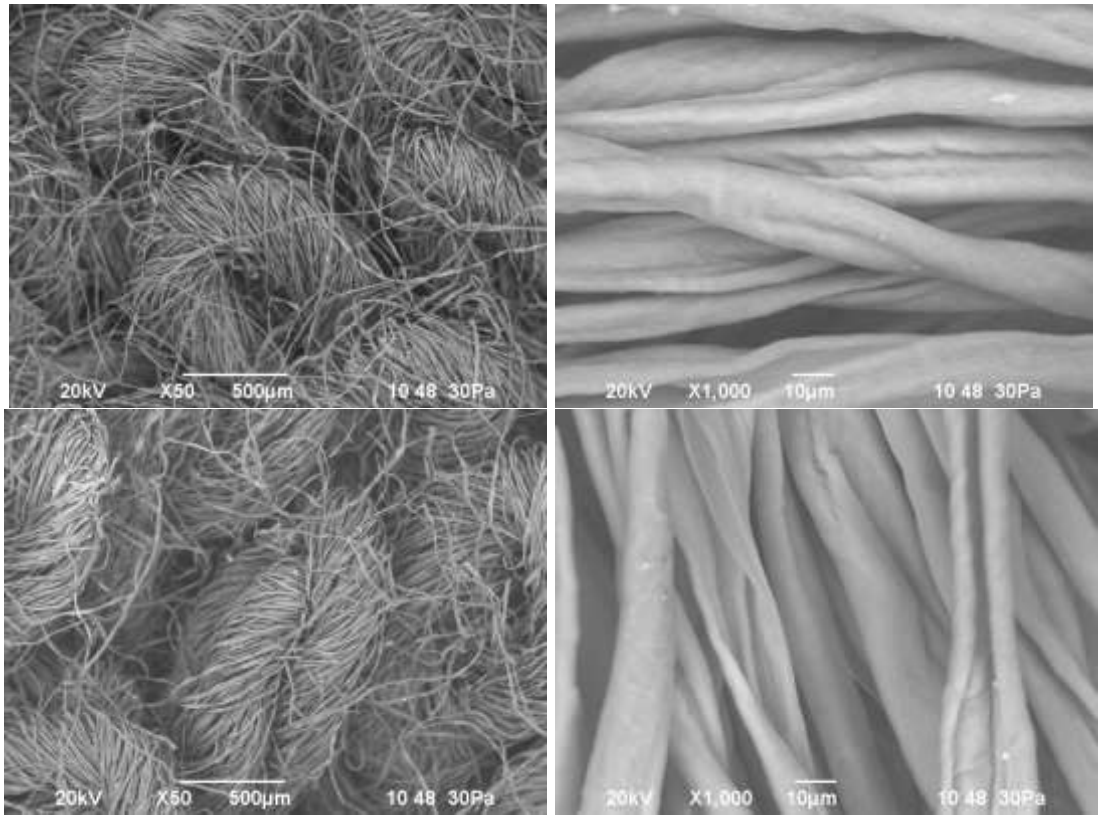
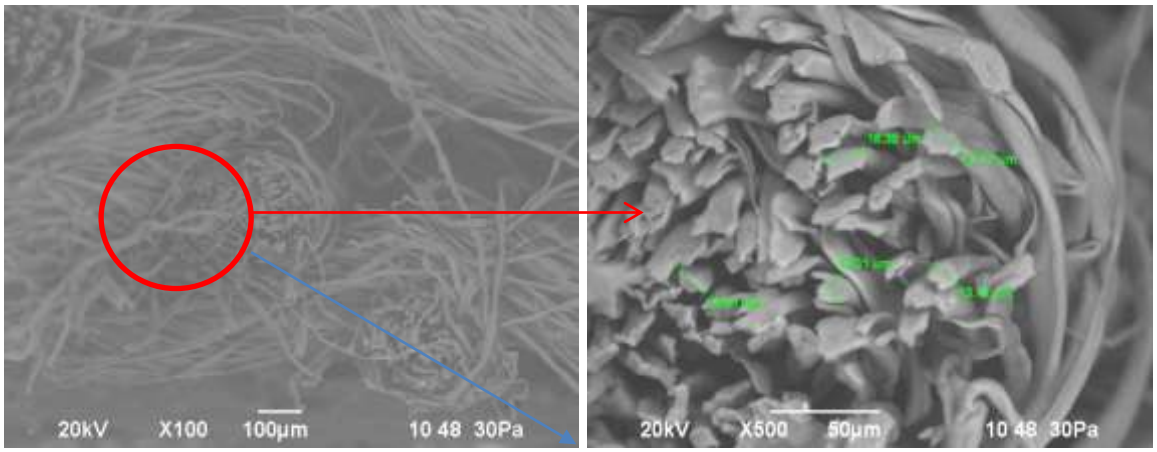


Рисунок 4.10 - СЭМ изображения ворсовой внутренней стороны махровой хлопковой ткани до нанесения (сверху) и после нанесения акриловой эмульсии (снизу)

На СЭМ изображениях поперечного слоя мембарнного материала отчетливо видно поверхность, на которой размещен полимер акриловой эмульсии (рисунок 4.11).



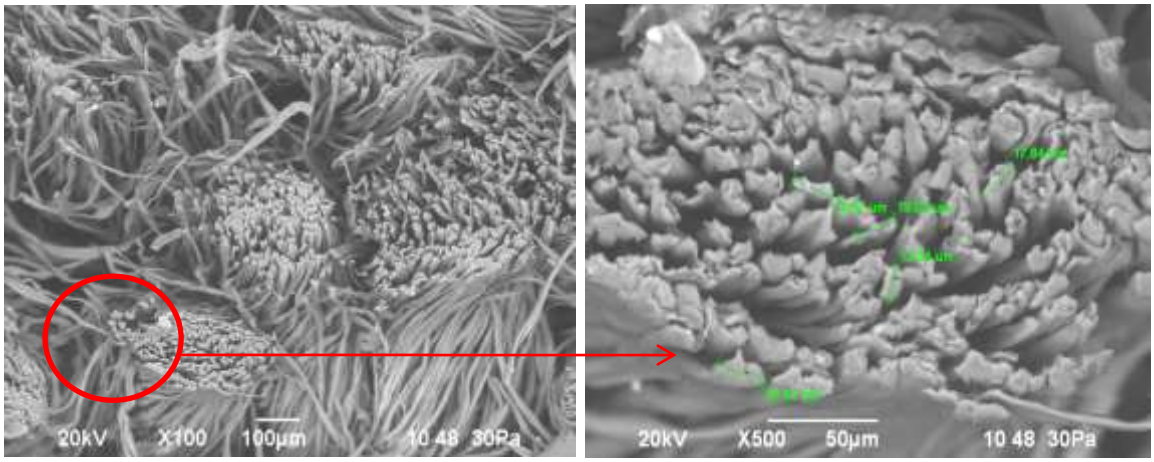


Рисунок 4.11 - СЭМ изображения поперечного среза махровой хлопковой ткани до нанесения (сверху) и после нанесения акриловой эмульсии (снизу)

Как видно из рисунка 4.11 на граничных волокнах хлопковой пряжи, которая находится на поверхности обратной стороны, заметно наличие полимерного слоя. Из предыдущего раздала известно, что ДТА анализ продемонстрировал хорошую совместимость целлюлозных волокон с водной суспензией АЭ, несмотря на это эмульсия впитывается только на самые приграничные волокна. Волокна, расположенные внутри пряжи и внутри материала остаются без изменений, обеспечив ожидаемую функциональность мембранного материала.

На изнаночной стороне этого материала формируется микропористая структура, что было обнаружена по снимкам СЭМ (рисунки 4.12, 4.13).

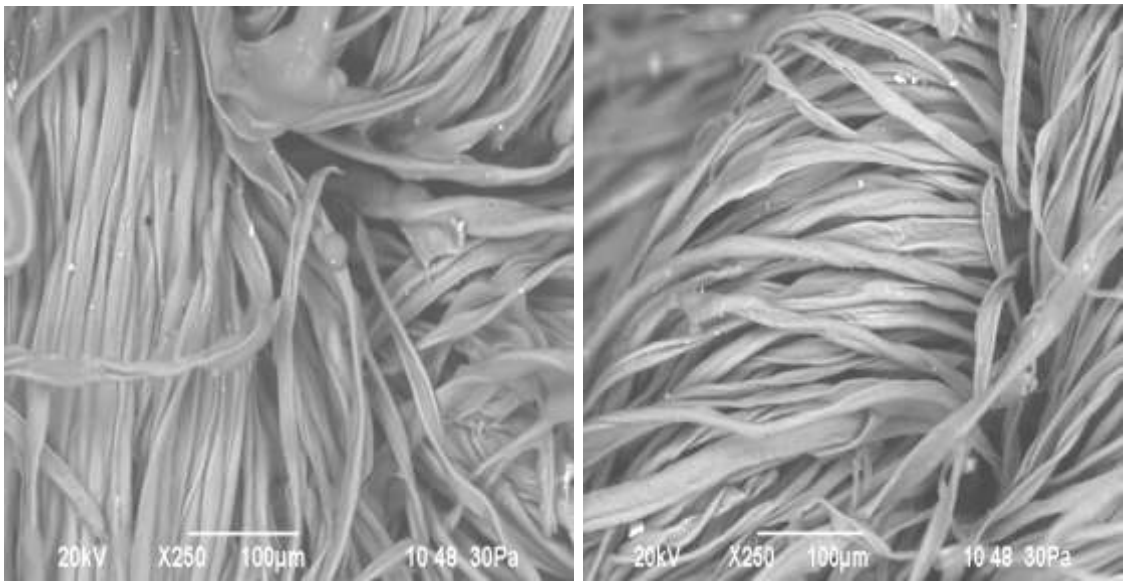


Рисунок 4.12 - Морфология изнаночной (слева) и лицевой (справа) поверхности образца №4

Как видно из рисунка 4.12, лицевая поверхность материала сохраняет первоначальную морфологию с микропорами между волокнами. На изнаночной поверхности образца махровой ткани полимерный слой не образует сплошной пленки, располагается на поверхности волокон и склеивает их. Будучи гидрофобным полимером полиметилакрилат оказывает некоторое сопротивление прохождению воды и водоупорность материала растет. После нанесения акриловой эмульсии поверхность волокон становится более гладким, при этом сохраняется пористость материала, и поэтому возрастает воздухопроницаемость и паропроницаемость.

На безворсовой поверхности образца №5 махровой ткани можно увидеть несколько другую морфологию полимерного покрытия (рисунок 4.13).

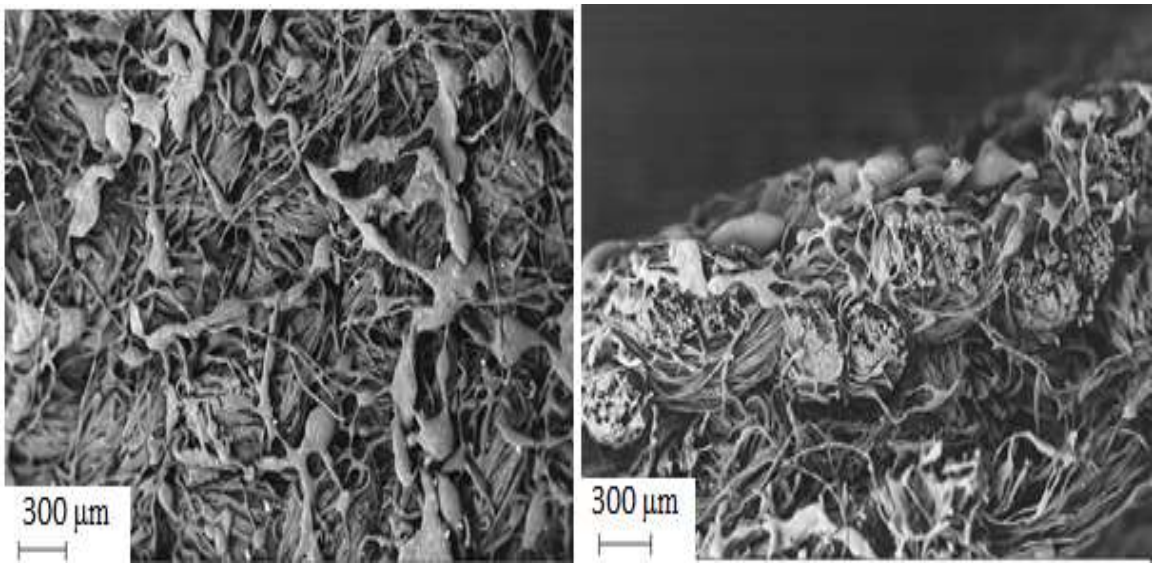


Рисунок 4.13 - Морфология полимерного слоя на поверхности (слева) и на поперечном сечении образца №5

На изнаночной поверхности и на изображениях поперечного сечения образца №5 можно заметить наличие полимера акриловой эмульсии. Здесь, как и в образце №4, полиметилакрилат не образует сплошную пленку, а находится на отдельных волокнах. Полимерный слой образует комочки размером до 100 микрон в ширину и до 500 микрон в длину на волокнах поверхности полотна, сплошная полимерная пленка отсутствует. Способность полимерно-текстильных материалов проявлять свойства поглощения и проницаемости воды обусловлены строением, прежде всего капиллярно-пористой структурой, которая имеет сложную систему пор и капилляров. Поглощение веществ структурой текстильных материалов представляет собой весьма сложный процесс. Наличие в макромолекулах целлюлозных волокон сильнополярных гидрофильных групп создает значительное силовое поле, которое притягивает и удерживает молекул воды. В махровой ткани очень большая удельная поверхность целлюлозных волокон, которые поглощают большое количество воды. В то же время целлюлозные волокна обладают большей способностью проницаемости

водяных паров, чем синтетические. Проницаемость паров влаги в мембранных тканях осуществляется через поры мембран. Размер каплей воды находится в пределах 200-2500 микрон, а размер молекул воздуха и паров воды до 0.0004 микрон. В образцах №4 и №5 имеются микропоры размерами от нескольких микрон до нескольких десятков микрон. Полиметилакрилат акриловой эмульсии является неполярным полимером, капли воды не проходят через поры материала. При этом размеры пор позволяют прохождению частиц воздуха и паров воды. В результате полимерно-текстильный материал образца №4, и особенно образца №5 имеет отличные мембранные свойства.

4.4 Физико-механические свойства полученных образцов

Физико-механические свойства полученных образцов мембранных полимерно-текстильных материалов представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 - Физико-механические свойства мембранных полимерно-текстильных материалов. Числитель - исходное полотно, знаменатель - мембранный материал

Номер образца	Поверхностная плотность, г/м^2	Устойчивость к истиранию, цикл	Разрывная сила, Н	
			По основе	По утку
1А	224 / 244	10500 / 9600	671 / 630	370 / 293
1Б	224 / 261	10500 / 10300	671 / 645	370 / 335
2А	72 / 76	11000 / 9400	322 / 403	93 / 160
2Б	72 / 79	11000 / 10000	322 / 420	93 / 185
3А	202 / 224	14000 / 15500	460 / 438	105 / 301
3Б	202 / 241	14000 / 16000	460 / 472	105 / 334
4А	300 / 353	10900 / 9800	412 / 370	269 / 258
4Б	300 / 389	10900 / 11000	412 / 394	269 / 288
5А	210 / 231	10000 / 10500	310 / 350	330 / 355
5Б	210 / 244	10000 / 11000	310 / 387	330 / 395
6А	228 / 256	15000 / 16800	306 / 281	96 / 140
6Б	228 / 271	15000 / 17000	306 / 311	96 / 148

Как и ожидалось нанесение полимерного слоя способствует увеличению поверхностной плотности, т.е. массы материала площадью 1 м^2.

При этом полимерный слой не всегда приводит к повышению механической прочности материала. Устойчивость к истиранию зависит как от прочности межмолекулярного взаимодействия в структуре волокон материала, так и от коэффициента скольжения абразива на поверхности этого материала. В зависимости от природы и вида переплетения волокон изменяется соотношение между этими показателями. Отсюда в некоторых случаях после нанесения полимерного слоя устойчивость к истиранию образцов 1, 2 и 4 уменьшается, а образцов 3, 4 и 6 увеличивется.

Обнаружено неодназначное изменение прочности материала, т.е разрывной силы по основе и по утку после нанесения полимерного слоя. Наблюдается общая тенденция: если сам материал имеет высокое значение разрывной силы, то разрывная силе полимерно-текстильного материала несколько снижается (разрывная сила по основе и утку образца 1, разрывная сила только по основе образцов 3, 4 и 6); если материал имеет низкое значение разрывной силы, то разрывня сила полимерно-текстильного материала повышается (разрывная сила по основе и утку материалов 2 и 5, разрывная сила по утку материалов 3 и 6). Еще одна тенденция: повышение устойчивости к истиранию и разрывной силы с увеличением количества полимерного слоя.

4.5 Влияние многократной водной обработке (стирки) на свойства полученных материалов

Следующие исследования проведены с целью определения степени изменения свойств полимерно-текстильных материалов образца №4 и №5 после пятикратной стирки. На рисунке 4.14 изображена зависимость разрывной силы по основе и по утку двух образцов полимерно-текстильных материалов от числа стирок.

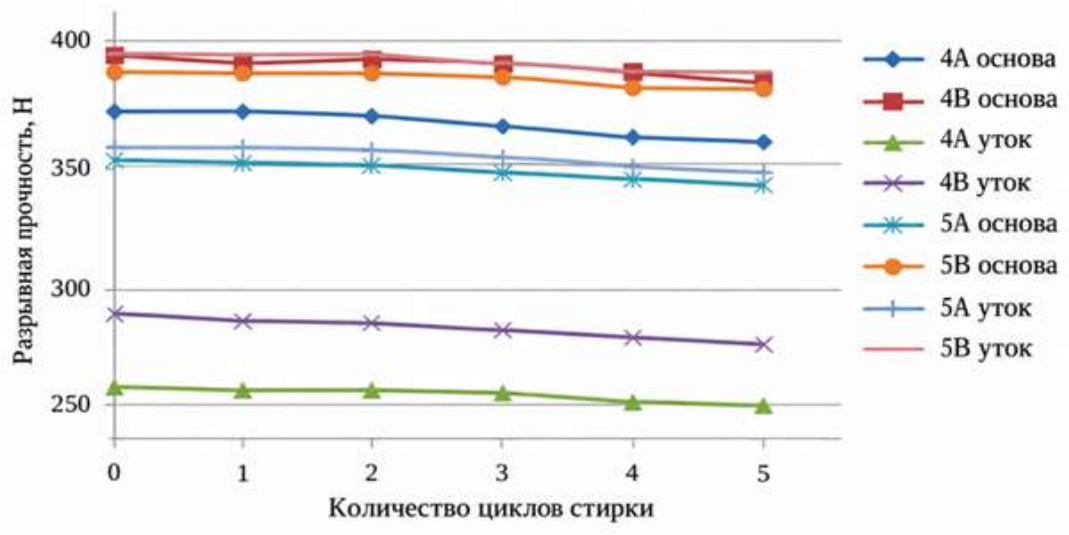


Рисунок 4.14 - Зависимость разрывной силы образцов полимерно-текстильных материалов №4 и №5 от числа стирок

Как видно из рисунка 4.14 каждая стирка приводит к некоторому уменьшению прочности материала, как по основе, так и по утку. Уменьшение незначительное, в пределах 2.0-4.5 %. В большей степени изменяется устойчивость к истиранию образцов (рисунок 4.15).

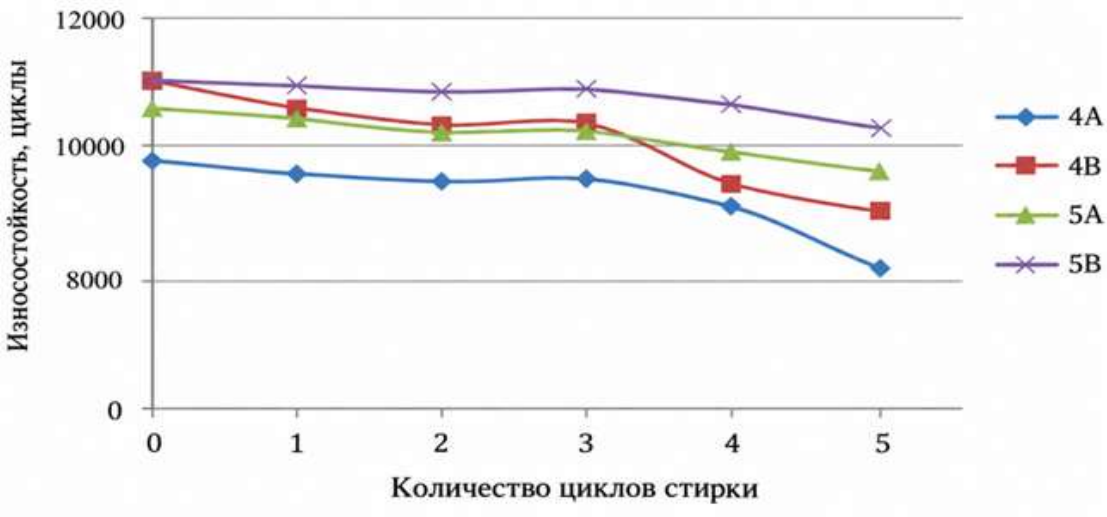


Рисунок 4.15 - Зависимость устойчивости к истиранию образцов полимерно-текстильных материалов №4 и №5 от числа стирок

Как видно из рисунка 4.15 после пятикратной стирки устойчивость к истиранию образца №4 уменьшается на 19.4-24.5 %, образца №5 - на 9.5-10.9 %. Видимо, ворс махрового полотна подвержен деструкции при мыльно-содовой стирке. Поскольку в образце №4 обе стороны покрыты ворсом, соответственно устойчивость к истиранию уменьшается в большей степени.

Показатели водопоглощения (рисунок 4.16) и водоупорности (рисунок 4.17) имеют ключевое значение для мембранных материалов. В процессе стирок эти показатели также уменьшаются.

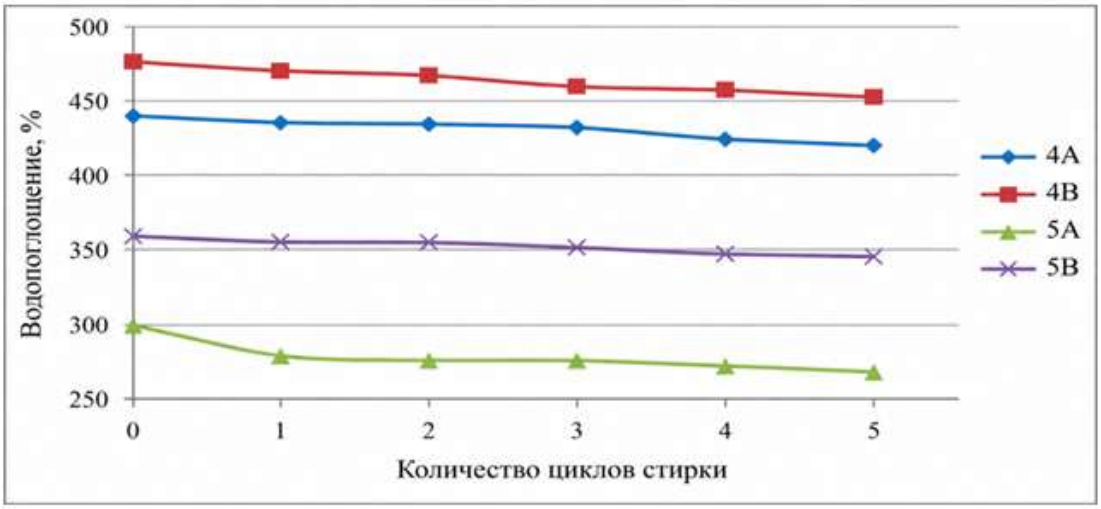


Рисунок 4.16 - Зависимость водопоглошения образцов полимерно-текстильных материалов №4 и №5 от числа стирок

Как видно из рисунка 4.16 после стирок водопоглощение обоих материалов уменьшается незначительно и примерно в одинаковой степени. После пятикратной стирки водопоглощение образца №4 уменьшается на 4.6-5.1 %, а образца №5 – на 3.1-3.6 %.

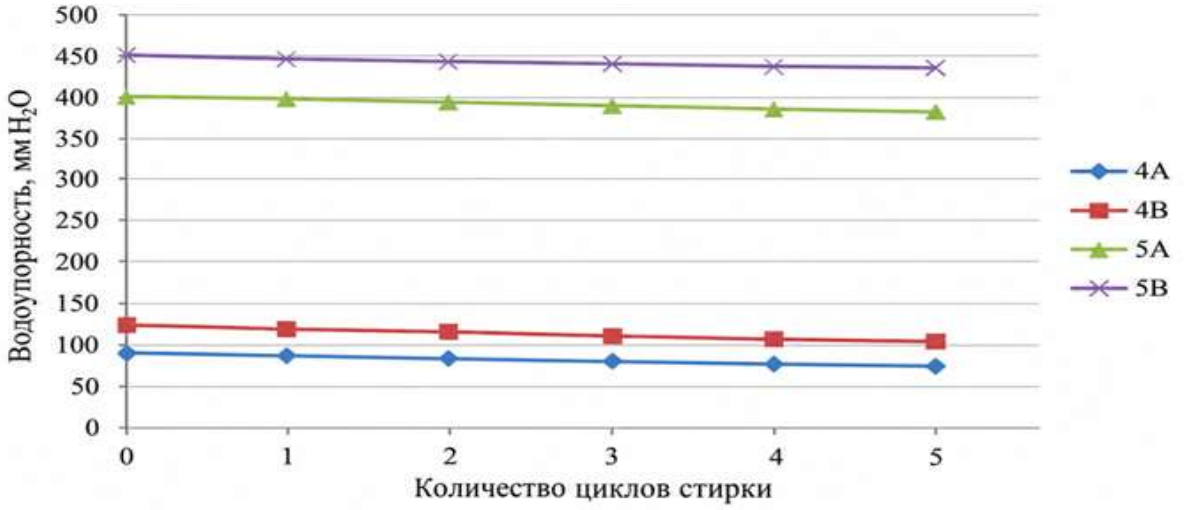


Рисунок 4.17 - Зависимость водоупорности образцов полимерно-текстильных материалов №4 и №5 от числа стирок

После стирок образцы сохраняют высокую водоупорность. После пятикратной стирки водоупорность образца №4 уменьшена на 12.0-18.9 %, а образца №5 уменьшена всего на 3.1-3.3 %. Образец №5 показал очень высокую водоупорность даже после многократных стирок.

На рисунке 4.18 представлены результаты изменения проницаемости воздуха и паров воды в процессе многократных стирок.

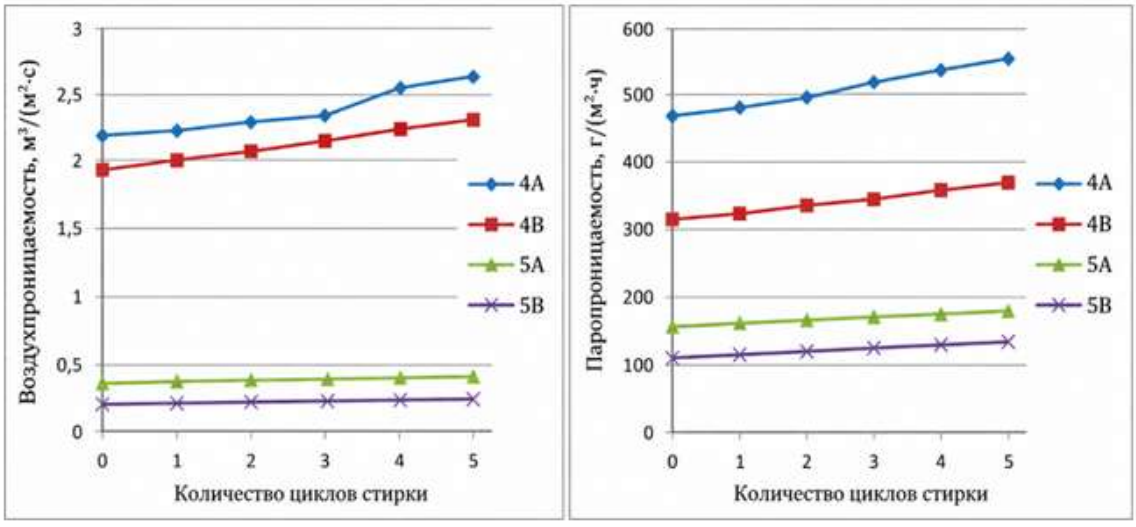


Рисунок 4.18 - Зависимость воздухопроницаемости (слева) и паропроницаемости (справа) образцов полимерно-текстильных материалов №4 и №5 от числа стирок

Было известно, что образец №4 имеет более высокую проницаемость воздуха и паров воды, чем образец №5. Как и ожидалось, после стирок эти показатели для обоих образцов возрастают. После пятикратной стирки для образца №4 воздухопроницаемость увеличивается на 18.1-20.2 %, а паропроницаемость - на 17.5-18.2 %; для образца №5 соответственно на 7.6-14.4 % и 12.7-17.2 %.

Таким образом, полученные полимерно-текстильные материалы на основе махровой ткани, как с двухсторонним, так и односторонним ворсом, сохраняют хорошие прочностные, водопоголощаюшие, водоупорные, одновременно «дышащие» свойства после многократных стирок. Это означает, что в процессе стирки составные компоненты материала не растворяются в воде или в мыльно-содовом растворе, не изменяется структура материала. Этому способствует нерастворимость полиметилакрилата акриловой эмульсии в слабощелочном растворе, и его прочная адгезия к волокнам хлопковой целлюлозы. Полученные полимерно-текстильные материалы на основе текстильных полотен и акриловой эмульсии сохраняют высокую водоупорность, водопоглощение, воздухопроводность и паропроницаемость после многократных стирок.

4.6 Разработка математического планирования эксперимента для прогнозирования водоупорности и водопоглощение

Исследования были проведены рототабельным планирование второго порядка (план Бокса Хантера). Планирование эксперимента и статистическую обработку полученных результатов проводили по [102-104]. Выбор данного метода обусловлен его высокой точностью и возможностью построения адекватных моделей при относительно небольшом количестве экспериментов. Для двухфакторного эксперимента число опытов планируемой серии экспериментов составит 13. Ввиду дискретности физического параметра "количество слоев", для заполнения расчетной матрицы использовались значения, полученные путем аппроксимации экспериментальных данных. Расчет при значении 0,6 и 3,4 слоев является интерполированным значением, необходимым для определения градиента изменений и обеспечения сходимости модели.

Для оценки адекватности полученных уравнений регрессии доверительный предел составил 95%. На основании уравнений регрессии были созданы трехмерные и плоскостные модели, показывающие зависимость водоупорности и водопоглощения от поверхностной плотности и количества слоев акриловой эмульсии.

Уровни и интервалы варьирования независимых факторов приведены в таблице 4.5. По результатам проведенных экспериментов составлена матрица планирования (таблица 4.6).

Таблица 4.5 - Уровни факторов и интервалы их варьирования при исследовании влияния поверхностной плотности и количества слоев эмульсии

Переменные	Кодированное обозначение	Натуральный вид	
		Пов.плотность, г/м^2	Слои эмульсии
Основной уровень	0	255	2
Интервал варьирования	Δ	32	1,4
Верхний уровень	+1	287	3,4
Нижний уровень	-1	233	0,6
Верхнее «звездное» плечо	+1,414	300	4
Нижнее «звездное» плечо	-1,414	210	0

Таблица 4.6 - Матрица планирования экспериментов и их результаты

№	Переменные				Технологические параметры			
	Кодированные		Натуральные		Водоупорность $_{эксп.}$, мм.вод.ст	Водоупорность $_{расч}$, мм.вод.ст	Водопоглощение $_{эксп.}$, %	Водопоглощение $_{расч}$, %
	X_1	X_2	Пов.плотность (П), г/м^2	Слои эмульсии (СЭ)				
1	-1	-1	223	0.6	180.0	200.1	375.0	381.3
2	+1	-1	287	0.6	57.0	60.0	450.0	433.3
3	-1	+1	223	3.4	390.0	401.5	200.0	242.9
4	+1	+1	287	3.4	150.0	144.4	415.0	434.9
5	1,414	0	300	2	95.0	99.8	430.0	433.1
6	-1,414	0	210	2	400.0	380.7	290.0	260.6
7	0	1,414	255	4	265.0	263.8	390.0	351.0
8	0	-1414	255	0	75.0	61.7	435.0	447.7
9	0	0	255	2	230.0	233.0	405.0	406.0
10	0	0	255	2	225.0	233.0	415.0	406.0
11	0	0	255	2	244.0	233.0	401.0	406.0
12	0	0	255	2	238.0	233.0	407.0	406.0
13	0	0	255	2	228.0	233.0	402.0	406.0

Статистическую значимость коэффициентов полученных уравнений регрессии оценивали по критерию Стьюдента при доверительной вероятности 95 %. Адекватность полученных математических моделей экспериментальным данным проверяли по критерию Фишера. При этом модель считалась адекватной при выполнении условия (F(расч)<F(табл)). Для водоупорности на основании результатов по матрице планирования первоначально было получено уравнение регрессии второго порядка:

Водоупорность =-747,65-3,6×П+289,216×СЭ+3,54×10-3×П2-17,92×СЭ2-0,653×П×СЭ (5)

Проверка коэффициентов уравнения по критерию Стьюдента показала, что коэффициент при (X11) является статистически незначимым при доверительной вероятности 95 %. После исключения незначимого коэффициента уравнение регрессии принимает следующий вид:

Водоупорность = 517.46-1.79×П+289.216×СЭ-17.92×СЭ2-0,653×П×СЭ. (6)

Проверка полученного уравнения по критерию Фишера показала, что (F(расч)=6,29), а (F(табл)=6,59). Поскольку F(расч)<F(табл), полученное уравнение адекватно описывает экспериментальные данные при принятом уровне значимости.

Для водопоглощения первоначально было получено уравнение регрессии второго порядка:

Водопоглощение =-1516,69+15,066×П-216,88×СЭ-0,028×П2-1,69×СЭ2+0,78×П×СЭ (7)

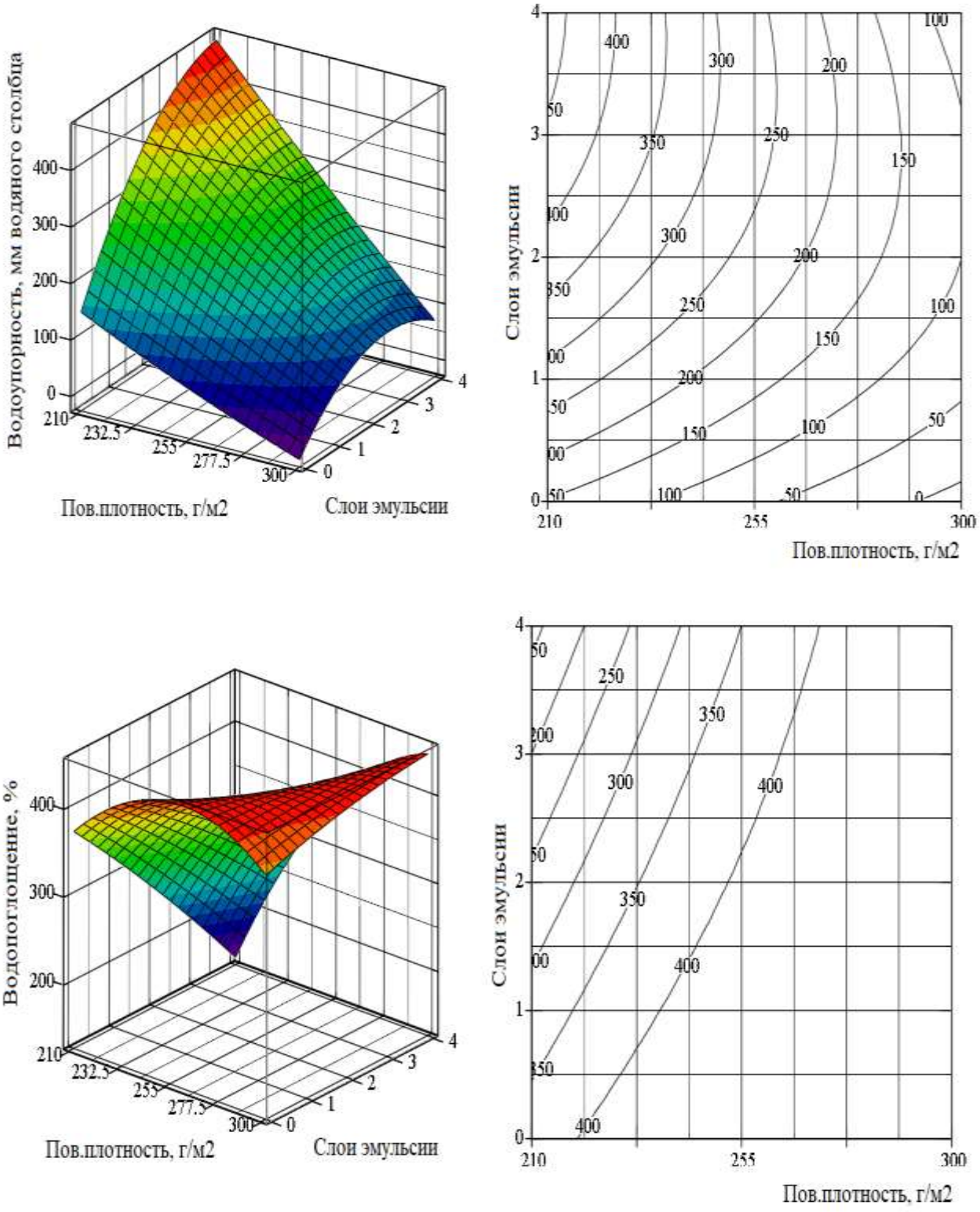
Оценка значимости коэффициентов по критерию Стьюдента также показала наличие одного статистически незначимого коэффициента - коэффициента при (X22). После его исключения уравнение принимает вид:

Водопоглощение =-1509.93+15,066×П-223.65×СЭ-0,028×П2 +0,78×П×СЭ (8)

Используя полученные 6 и 8 уравнение по [105, 106] с применением программы MathCAD построены 3D поверхность и ее горизонтальный разрез влияния поверхностной плотности и количества слоев акриловой эмульсии на водоупорность и водопоглощение (рисунок 4.19).

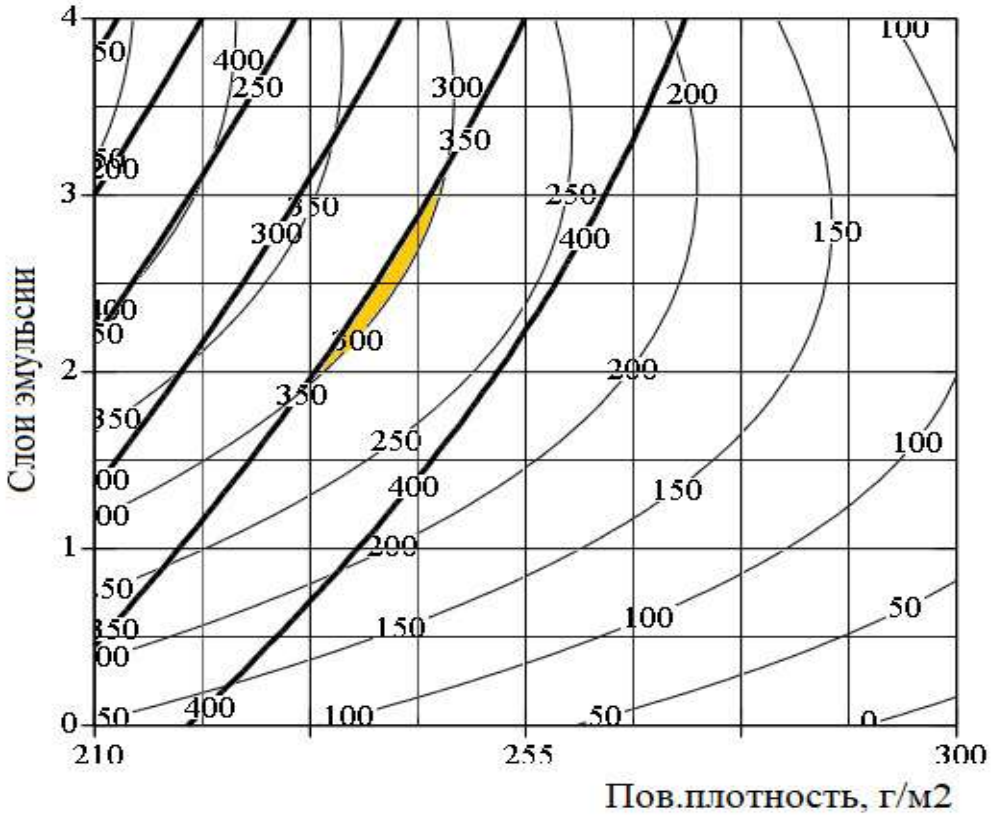
Из рисунка 4.19 видно, что при увеличении количества слоев эмульсии возрастает и водоупорность ткани, а водополглощение напротив-уменьшается. Водоупорность выше 400 мм.вод.ст. наблюдается при 3 и 220 г/м^2, а водополгощение при количестве слоев от 0 до 4 и поверхностно плотности от 220 до 300 г/м^2. В отсутствии эмульсии и поверхностной плотности 300 г/м^3 водопоглощение выше 400 мм.вод.ст. (по экспериментальным данным 520 мм.вод.ст.) данным тогда как водоупорность-отсутствует. Максимальная водоупорность 461,7 мм.вод.ст. наблюдается при поверхностной плотности 210 г/м^2 и 4 слоях эмульсии.

I II



I-объемная поверхность, II- горизонтальный разрез

Рисунок 4.19 - Влияние поверхностной плотности и количества слоев акриловой эмульсии на водоупорность и водопоглощение



(———)- водоупорность, мм.вод.ст., (▬▬)-водопоглощение, %

Рисунок 4.20 - Совмещенная картина влияния водопоглощения и водоупорности

Наложением полученных горизонтальных разрезов найдена область наибольшего водополгощения и водоупорности (рисунок 4.20). Выделенная область соответствует значениям водопоглощения >350% и водоупорности >300 мм.вод.ст при количестве слоев 2-3 и поверхностной плотности 233-245 г/м^2. В выделенной области водоупорность находится на уровне 300-312,3 мм.вод.ст, а водопоглощение 350-355,9%.

Вывод к четвертой главе

В результате проведенных исследований разработаны мембранные полимерно-текстильные материалы с заданными структурными и эксплуатационными характеристиками, предназначенные для использования в изделиях Smart-текстиля. Полученные результаты подтвердили возможность формирования композиционных материалов, сочетающих высокие защитные свойства мембранного слоя.

Установлено, что строение мембранного материала определяется видом полимерной композиции, способом формирования мембранного слоя, параметрами технологического процесса и характеристиками текстильной основы. Изменение указанных факторов оказывает существенное влияние на морфологию поверхности, равномерность распределения полимера, прочность межслойного соединения и стабильность эксплуатационных свойств композиционного материала.

Исследование физико-механических характеристик показало, что разработанные мембранные материалы обладают необходимой прочностью, устойчивостью к многократным деформациям и достаточной адгезионной прочностью соединения мембранного слоя с текстильной основой. При рациональном выборе состава полимерной композиции и технологических режимов обеспечивается сохранение целостности структуры материала при механических нагрузках, возникающих в процессе изготовления и эксплуатации изделий.

Установлено, что сформированные мембранные покрытия обеспечивают эффективные барьерные свойства, препятствуя проникновению жидкой влаги и внешних загрязнений при сохранении необходимого уровня паропроницаемости и воздухопроницаемости. Такое сочетание характеристик позволяет создать комфортные условия эксплуатации изделий, предназначенных для длительного использования в различных климатических условиях.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о наличии взаимосвязи между структурными особенностями мембранного слоя и комплексом эксплуатационных характеристик материала. Показано, что регулирование толщины покрытия, его микроструктуры и параметров соединения с текстильной основой позволяет целенаправленно изменять механические, защитные и гигиенические свойства композиционного материала в зависимости от функционального назначения изделия.

Проведенная оценка свойств разработанных материалов показала их соответствие требованиям, предъявляемым к современным изделиям интеллектуального текстиля. Мембранные полимерно-текстильные материалы могут служить защитным элементом конструкции и других компонентов Smart-систем без существенного снижения эксплуатационных характеристик текстильного изделия.

Таким образом, выполненные исследования подтвердили эффективность предложенных технологических решений получения

мембранных полимерно-текстильных материалов и позволили установить основные закономерности формирования их структуры и свойств. Полученные результаты являются научной основой для разработки многослойных интеллектуальных текстильных материалов нового поколения, сочетающих высокие защитные, механические, гигиенические и функциональные характеристики, а также для дальнейшего совершенствования технологий их промышленного производства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе комплексного исследования были получены следующие результаты:

1. Получены трикотажные полотна с включением полимерного оптического волокна в виде мононити из полиметилметакрилата. Технологически удобным способом введения полимерной нити в структуру полотна является закладывание его в петельные ряды в качестве уточной нити.

2. Чрезмерная толщина и ограниченная упругость полимерной нити затрудняет процесс петлеобразования, поэтому процесс формирования полотна требует особого подхода к выбору его дизайна и технологических режимов, иглы трикотажного станка. Получены полотна простого и плющевого переплетения, в которых полимерная нить участвует в петлеобразовании в сочетании с хлопковой пряжей. Полученные полотна имеют высокую механическую прочность при растяжении, устойчивость к истиранию, и отличаются светоотражающей способностью.

3. Нанесение акриловой эмульсии (ПМА) распылением на текстильные подложки представляет собой простой и эффективный метод получения водонепроницаемых, воздухопроницаемых и функциональных полимерно-текстильных материалов. Содержание ПМА в получаемых композитах колеблется от 8 до 15 мас.% материала. Функциональные характеристики материалов определяются типом волокна, переплетением ткани и количеством полимерных слоев.

4. В процессе модификации макромолекулы ПМА проникают в пористую структуру хлопковых волокон, образуя стабильную сеть межмолекулярных взаимодействий. Эти взаимодействия включают водородные связи между сложноэфирными группами ПМА и гидроксильными группами целлюлозы, а также частичное физическое закрепление полимера в микрофибриллярной структуре волокон. В результате образуется квазигомогенная межполимерная система, в которой термическая деградация происходит кооперативно, а не независимо. В полиэфирных тканях тесный контакт между ПМА и волокнами образует двухфазную систему, в которой разложение происходит за счет комбинированной деградации полиэфирной и акриловой фаз, сопровождающейся увеличением энтальпии и общей потери массы.

5. Морфология внутренней поверхности махровых хлопчатобумажных тканей остается практически неизменной после нанесения эмульсии. Гидрофильный ворс ткани поглощает значительное количество воды, которая удерживается микропористым гидрофобным полимерным слоем на обратной стороне (угол смачивания капли воды составляет 135-140°). Размер пор этого слоя предотвращает проникновение жидкой воды (водостойкость 400-450 мм вод. ст.), одновременно пропуская воздух (воздухопроницаемость 1,5-3 $м^3/(м^2 \cdot с)$) и водяной пар (паропроницаемость 150-500 $г/(м^2 \cdot ч)$), создавая желаемый «мембранный эффект», что подтверждается наблюдениями с

помощью сканирующего электронного микроскопа. А также в ходе исследования разработана математическая модель планирования эксперимента второго порядка на основе ротатабельного центрально-композиционного плана Бокса-Хантера. Применение данного метода позволило установить количественные зависимости показателей водоупорности и водопоглощения от исследуемых технологических факторов.

6. Для практического применения выбор ткани может быть адаптирован к целевым свойствам. Двусторонние махровые хлопчатобумажные ткани рекомендуются, когда требуется высокое водопоглощение, умеренная водостойкость и высокая воздухо- и паропроницаемость. Односторонние махровые хлопчатобумажные ткани предпочтительны в тех случаях, когда требуется высокая водостойкость, умеренное влагопоглощение и сохранение воздухопроницаемости.

Список использованных литератур

1. QazIndustry. Тренды: как в мире развивается текстильная промышленность. URL: https://qazindustry.gov.kz/kk/article/3869-trendy-kak-v-mire-razvivaetsya-tekstilnaya-promyshlennost.

2. Leal-Junior A.G., Díaz C.R., Leitão C., et al. Polymer optical fiber-based sensor for simultaneous measurement of breath and heart rate under dynamic movements // Optics & Laser Technology. - 2019. - Vol. 109. - P. 429-436.

3. Zeng W. Polymer Optical Fiber for Smart Textiles // Handbook of Smart Textiles / Ed. by X. Tao. - Singapore: Springer, 2015. - P. 109-125.

4. Quandt B.M., Pfister M.S., Lubben J.F., et al. POF-yarn weaves: controlling the light out-coupling of wearable phototherapy devices // Biomedical Optics Express. - 2017. - Vol. 8. - P. 4316-4330.

5. Oscarsson L., Jacobsen Heimdal E., Lundell T., et al. Flat knitting of a light emitting textile with optical fibres // AUTEX Research Journal. - 2009. - Vol. 9. - P. 61-65.

6. Saha J., Ahmed F., Mahmud S.T., Mondal M.I.H. Protective medical textiles for patients and health professionals // Protective Textiles from Natural Resources. - The Textile Institute Book Series. - Elsevier, 2022. - P. 39-73. DOI: 10.1016/B978-0-323-90477-3.00007-9.

7. Rafikov A.S., Shirinova M.X., Nigmatova F.U., Abdusamatova D.O. Membrane material based on acrylic emulsion and terry cloth for medical drapes // Polymer Engineering and Science. - 2023. - Vol. 63, No. 7. - P. 2251-2264. DOI: 10.1002/pen.26374.

8. Gong Z., Xiang Z., Ouyang X., et al. Wearable Fiber Optic Technology Based on Smart Textile: A Review // Materials. - 2019. - Vol. 12, No. 20. - Art. 3311. DOI: 10.3390/ma12203311.

9. Liu Z., Zhang Z.F., Tam H.-Y., Tao X. Multifunctional Smart Optical Fibers: Materials, Fabrication, and Sensing Applications // Photonics. - 2019. - Vol. 6, No. 2. - Art. 48. DOI: 10.3390/photonics6020048.

10. Selm B., Gürel E.A., Rothmaier M., Rossi R.M., Scherer L.J. Polymeric Optical Fiber Fabrics for Illumination and Sensorial Applications in Textiles // Journal of Intelligent Material Systems and Structures. - 2010. - Vol. 21, No. 11. - P. 1061-1071. DOI: 10.1177/1045389X10377676.

11. Smart Wearable Fibers and Textiles: Status and Prospects // Nanoscale. - 2025.

12. Global Market Insights. Smart Textile Manufacturing System Market. URL: https://www.gminsights.com/ru/industry-analysis/smart-textile-manufacturing-system-market.

13. Advances and Applications of Graphene-Enhanced Textiles // Textiles. - 2025.

14. Bremer K., Weigand F., Zheng Y., et al. Structural health monitoring using textile reinforcement structures with integrated optical fiber sensors // Sensors. - 2017. - Vol. 17. - Art. 345.

15. Nag A., Mukhopadhyay S.C., Kosel J. Wearable flexible sensors: A review // IEEE Sensors Journal. - 2017. - Vol. 17. - P. 3949-3960.

16. Mokhlespour Esfahani M.I., Taghinezhad S., Mottaghitalab V., et al. Novel printed body worn sensor for measuring the human movement orientation // Sensor Review. - 2016. - Vol. 36. - P. 321-331.

17. Afzal A., Drean J.-Y., Harzallah O., et al. Development of multifunctional different cross-sectional shaped coaxial composite filaments for SMART textile applications // Textile Research Journal. - 2017. - Vol. 87. - P. 1991-2004.

18. Yang J.-H., Cho H.-S., Lee J.H. An analysis on the luminance efficiency of the machine embroidery method applied to flexible plastic optical fiber for realization of the textile display // Textile Research Journal. - 2018. - Vol. 88. - P. 1466-1478.

19. Krebber K. Smart Technical Textiles Based on Fiber Optic Sensors // Current Developments in Optical Fiber Technology / Eds. S.W. Harun, H. Arof. - Rijeka: IntechOpen, 2013.

20. Stoppa M., Chiolerio A. Wearable Electronics and Smart Textiles: A Critical Review // Sensors. - 2014. - Vol. 14, No. 7. - P. 11957-11992. DOI: 10.3390/s140711957.

21. Zhao Y., Lin Z., Dong S., et al. Review of wearable optical fiber sensors: Drawing a blueprint for human health monitoring // Optics & Laser Technology. - 2023. - Vol. 161. - Art. 109227.

22. Leal-Junior A.G., Marquez C., Frizera A., et al. Dynamic mechanical analysis on a polymethyl methacrylate (PMMA) polymer optical fiber // IEEE Sensors Journal. - 2018. - Vol. 18, No. 6. - P. 2353-2361.

23. Liu Z., Stephens V. Exploring innovation ecosystem from the perspective of sustainability: towards a conceptual framework // Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity. - 2019. - Vol. 5. - Art. 48.

24. Quandt B.M., Braun F., Ferrario D., et al. Body-monitoring with photonic textiles: A reflective heartbeat sensor based on polymer optical fibres // Journal of the Royal Society Interface. - 2017. - Vol. 14, No. 128. - Art. 20170060.

25. Moraleda A.T., García C.V., Zaballa J.Z., Arrue J. A temperature sensor based on a polymer optical fiber macro-bend // Sensors. - 2013. - Vol. 13, No. 10. - P. 13076-13089.

26. Koyama Y., Nishiyama M., Watanabe K. A motion monitoring using hetero-core optical fiber sensors sewed in sportswear to trace trunk motion // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. - 2013. - Vol. 62, No. 4. - P. 828-836.

27. Li L., He R., Soares M.S., et al. Embedded FBG-based sensor for joint movement monitoring // IEEE Sensors Journal. - 2021. - Vol. 21, No. 23. - P. 26793-26798.

28. Nedoma J., Fajkus M., Martinek R., et al. Non-invasive fiber-optic biomedical sensor for basic vital sign monitoring // Advances in Electrical and Electronic Engineering. - 2017. - Vol. 15, No. 2. - P. 336-342.

29. Fajkus M., Nedoma J., Martinek R., et al. A non-invasive multichannel hybrid fiber-optic sensor system for vital sign monitoring // Sensors. - 2017. - Vol. 17, No. 1. - Art. 111.

30. Grillet A., Kinet D., Witt J., Schukar M., Krebber K., Pirotte F., Depre A. Optical fiber sensors embedded into medical textiles for healthcare monitoring // IEEE Sensors Journal. - 2008. - Vol. 8, No. 7. - P. 1215-1222.

31. Guignier C., Camillieri B., Schmid M., Rossi R. M., Bueno M.-A. E-Knitted Textile with Polymer Optical Fibers for Friction and Pressure Monitoring in Socks // Sensors. – 2019. – Vol. 19, No. 13. – Article 3011. – DOI: https://doi.org/10.3390/s19133011.

32. Bai Z.Q., Tan J. Innovative design of polymeric photonic fibre fabric for interior textiles // Research Journal of Textile and Apparel. - 2012. - Vol. 17, No. 2.

33. Ge L. Novel Woven Structure Design for Polymeric Optical Fiber (POF) Textiles: PhD Thesis. - The Hong Kong Polytechnic University, 2021.

34. Kallweit J., Pätzel M., Pursche F., Jabban J., Morobeid M., Gries T. An overview on methods for producing side-emitting polymer optical fibers // Textiles. - 2021. - Vol. 1, No. 2. - P. 337-360.

35. Baima M., Andrew T.L. Fluoropolymer-wrapped conductive threads for textile touch sensors operating via the triboelectric effect // Fibers. - 2018. - Vol. 6, No. 2. - Art. 41.

36. Beldi M., Cayla A., Behary N., Perwuelz A. Effect of hybrid woven fabrics structure on their electrical properties // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. - 2018. - Vol. 29. - P. 8057-8067. DOI: 10.1007/s10854-018-8812-y.

37. Gorgutsa S., Berzowska J., Skorobogatiy M. Optical fibers for smart photonic textiles // Multidisciplinary Know-How for Smart-Textiles Developers. - Elsevier, 2013. - P. 70-91.

38. Azimi B., Maleki H., Barani H., Caporalini S., Uddin M.J., Danti S. From fiber to function: Evolution of smart textiles in enhanced skin healing // Macromolecular Chemistry and Physics. - 2025. - Vol. 226, No. 19. DOI: 10.1002/macp.202500216.

39. Gugliuzza A., Drioli E. A review on membrane engineering for innovation in wearable fabrics and protective textiles // Journal of Membrane Science. - 2013. - Vol. 446. - P. 350-375.

40. Jocic D. Polymer-based smart coatings for comfort in clothing // Tekstilec. - 2016. - Vol. 59, No. 2. - P. 107-114. DOI: 10.14502/Tekstilec2016.59.107-114.

41. Hou Z., Liu X., Tian M., Zhang X., Qu L., Fan T., Miao J. Smart fibers and textiles for emerging clothes-based wearable electronics: Materials, fabrications and applications // Journal of Materials Chemistry A. - 2023. - Vol. 11. DOI: 10.1039/D3TA02617E.

42. Tian X., Lv S., Li J., Zhang J., Yu L., Liu X., Xin X. Recent advancement in synthesis and modification of water-based acrylic emulsion and

their application in water-based ink: A comprehensive review // Progress in Organic Coatings. - 2024. - Vol. 189. - Art. 108320. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2024.108320.

43. Slawinski M. Strategic Aspects of the Incorporation of Acrylic Acid in Emulsion Polymers: PhD Thesis. - Technische Universiteit Eindhoven, 1999. DOI: 10.6100/IR526315.

44. El-Gabrie L.K., Abou El-Kheir A., Salama M. Functional finishes of acrylic fibers using different technologies // Journal of Applied Sciences Research. - 2014. - Vol. 10, No. 3. - P. 218-229.

45. Boh Podgornik B., Šandrić S., Kert M. Microencapsulation for functional textile coatings with emphasis on biodegradability: A systematic review // Coatings. - 2021. - Vol. 11, No. 11. - Art. 1371. DOI: 10.3390/coatings11111371.

46. Grancarić A.M., Jerković I., Legrand X. Conductive polymers for smart textile applications // Journal of Industrial Textiles. - 2018. DOI: 10.1177/1528083717699368.

47. Akgün M., Güler E.B. Investigation of various surface and physical properties of acrylic coated woven fabrics // Tekstil ve Mühendis. – 2025. – Vol. 32, No. 139. – P. 254–267. DOI: 10.7216/teksmuh.1657925.

48. Rahimi M., Mokhtari J. Modeling and optimization of waterproof-breathable thermoregulating core-shell nanofiber/net structured membrane for protective clothing applications // Polymer Engineering and Science. - 2018. - Vol. 58, No. 10. - P. 1756-1765. DOI: 10.1002/pen.24776.

49. You X., Wang H., He J., Qi K. Fluorine-free biomimetic membranes with leaf vein-like and lotus dual structure for high-performance waterproof and breathable textiles // Journal of Membrane Science. - 2025. - Vol. 173. - Art. 123385. DOI: 10.1016/j.memsci.2024.123385.

50. Liu X., Wang Y., Wang W., Cheng M., Yu A., Wan L., Zhai J. Humidity-resistant, breathable, waterproof, and bionic triboelectric electronic skins for self-powered haptic sensing and human motion recognition // Chemical Engineering Journal. - 2024. - Vol. 490. - Art. 151771. DOI: 10.1016/j.cej.2024.151771.

51. Zhang Y., Ren G., Nie G., Hu S., Li D., Sun W., Li Z., Cui Z., Lu D., Shi X., Li L., Yu H., He J. Facile fabrication of fluorine-free waterproof and breathable nanofiber membranes with UV-resistant and acid-alkali resistant performances // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. - 2024. - Vol. 685. - Art. 133310. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2024.133310.

52. Zhao J., Hou A., Zhao Z., Feng Q., Wu X., Jiang Q., Xie J., Huang G., Yan J., Wang X. Facile fabrication of environmentally friendly and mechanically robust transparent, waterproof and breathable fibrous membranes // Chemical Engineering Journal. - 2025. - Vol. 505. - Art. 159222. DOI: 10.1016/j.cej.2025.159222.

53. Chen J., Yao N., Wang T., Wu J., Ding M., Zhang X., Zhang S., Yoon S.S., Ding B. High-performance fluorine-free waterproof and breathable

electrospun nanofibrous membranes by thermally induced coating-crosslinking // Composites Communications. - 2024. - Vol. 51. - Art. 102076. DOI: 10.1016/j.coco.2024.102076.

54. Rouhani S.T., Fashandi H. Breathable dual-layer textile composed of cellulose dense membrane and plasma-treated fabric with enhanced comfort // Cellulose. - 2018. DOI: 10.1007/s10570-018-1950-9.

55. Zhang H., Zhai Q., Cao Y., Hu J., Zhen Q., Qian X. Design and facile manufacturing of tri-layer laminated polyolefin microfibrous fabrics with tailoring pore size for enhancing waterproof breathable performance // Materials & Design. - 2023. - Vol. 228. - Art. 111829. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.111829.

56. leetwood S.K., Kleiman M., French V., Kaschuk J., Foster E.J. Bioinspired waterproof, breathable materials: How does nature transport water across its surfaces and through its membranes? // Progress in Materials Science. - 2026. - Vol. 156. - Art. 101578. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2025.101578.

57. Li Z., Zhang Y., Yan S., Zhang Y., Liu M., Gong L. Fabrication and characterization of novel polyurethane encapsulant with excellent underwater acoustic transparency and hydrophobicity // Polymer Engineering & Science. - 2022. - Vol. 62, No. 9. - P. 2731-2740. DOI: 10.1002/pen.26056.

58. Chang Y., Liu Y., Liu F. Simple fabrication of breathable poly(vinylidene fluoride) fibrous membranes decorated by silica nanoparticles with enhanced waterproof property // Ceramics International. - 2024. - Vol. 50, No. 24B. - P. 53728-53735. DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.10.225.

59. Chang Y., Liu F. Review of Waterproof Breathable Membranes: Preparation, Performance and Applications in the Textile Field // Materials. - 2023. - Vol. 16, No. 15. - Art. 5339. DOI: 10.3390/ma16155339.

60. Ren G., Li Z., Tian L., Lu D., Jin Y., Zhang Y., Li B., Yu H., He J., Sun D. Environmentally friendly waterproof and breathable electrospun nanofiber membranes via post-heat treatment // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. - 2023. - Vol. 658. - Art. 130643. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2022.130643.

61. Ketoja J.A., Saurio K., Rautkoski H., Kenttä E., Tanaka A., Koponen A.I., Virkajärvi J., Heinonen K., Kostamo K., Järvenpää A., Hyry N., Heikkilä P., Hankonen N., Harlin A. Design of biodegradable cellulose filtration with high efficiency and breathability // Carbohydrate Polymers. - 2024. - Vol. 336. - Art. 122133. DOI: 10.1016/j.carbpol.2024.122133.

62. Zhao J., Zhang T., Li Y., Huang L., Tang Y. Fluorine-Free, Highly Durable Waterproof and Breathable Fibrous Membrane with Self-Clean Performance // Nanomaterials. - 2023. - Vol. 13, No. 3. - Art. 516. DOI: 10.3390/nano13030516.

63. Siddique A., Fatima N., Liu S., Zahir A., Chan C.K., Xu Z., Ashraf M. Development of breathable waterproof polyurethane-coated cotton fabric using surfactant // ACS Omega. - 2025. - Vol. 10, No. 39. - P. 44913-44921. DOI: 10.1021/acsomega.5c01410.

64. Ghezal I., Moussa A., Marzoid I.B., El-Achari A., Campagne C., Sakli F. Development of breathable hydrophilic polymeric membrane for textile lamination // Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly. - 2025. - Vol. 31, No. 2. - P. 95-104. DOI: 10.2298/CICEQ240202017G.

65. He B., Hou X., Liu Y., Hu J., Song L., Tong Z., Zhan X., Ren Y., Liu Q., Zhang Q. Design of fluorine-free waterborne fabric coating with robust hydrophobicity, water resistance and breathability // Separation and Purification Technology. - 2023. - Vol. 311. - Art. 123308. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.123308.

66. Wang Z., Xing D., Yin R., Zhan P., Liu C., Shen C., Liu H. Breathable and waterproof conductive cotton fabric pressure sensor with distinguished electrothermal and electromagnetic interference shielding performances // Applied Materials Today. - 2024. - Vol. 38. - Art. 102256. DOI: 10.1016/j.apmt.2024.102256.

67. Rungruangkitrai N., Phromphen P., Chartvivatpornchai N., Srisa A., Laorenza Y., Wongphan P., Harnkarnsujarit N. Water repellent coating in textile, paper and bioplastic polymers: A comprehensive review // Polymers. - 2024. - Vol. 16, No. 19. - Art. 2790. DOI: 10.3390/polym16192790.

68. Liu Y., Wang Q., Zhang T., Hao M., Hu X., Chen Z., Yang B. Fabrication of breathable superhydrophobic composite fabric with moisture permeability and weak-electric-field bactericidal ability designed for protective clothing applications // Materials & Design. - 2024. - Vol. 237. - Art. 112612. DOI: 10.1016/j.matdes.2023.112612.

69. Joshi S., Midha V., Rajendran S. Multifunctional waterproof breathable coating on polyester-based woven protective clothing for healthcare application // Progress in Organic Coatings. - 2023. - Vol. 178. - Art. 107482. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2023.107482.

70. Mondal S., Hu J.L. Microstructure and water vapor transport properties of functionalized carbon nanotube-reinforced dense-segmented polyurethane composite membranes // Polymer Engineering & Science. - 2008. - Vol. 48, No. 9. - P. 1718-1724. DOI: 10.1002/pen.21093.

71. Ghaffari S., Yousefzadeh M., Mousazadegan F. Investigation of thermal comfort in nanofibrous three-layer fabric for cold weather protective clothing // Polymer Engineering & Science. - 2019. - Vol. 59, No. 10. - P. 2032-2040. DOI: 10.1002/pen.25203.

72. Sadighzadeh A., Valinejad M., Gazmeh A., Rezaiefard B. Synthesis of polymeric electrospun nanofibers for application in waterproof breathable fabrics // Polymer Engineering & Science. - 2016. - Vol. 56, No. 2. - P. 143-149. DOI: 10.1002/pen.24200.

73. Gu X., Li N., Cao J., Xiong J. Preparation of electrospun polyurethane/hydrophobic silica gel nanofibrous membranes for waterproof and breathable application // Polymer Engineering & Science. - 2018. - Vol. 58, No. 8. - P. 1381-1390. DOI: 10.1002/pen.24726.

74. Chen J., Su X., Zheng M., Lin J., Tan K.B. Enhanced properties of chitosan/hydroxypropyl methylcellulose/polyvinyl alcohol green bacteriostatic film composited with bamboo fiber and silane-modified bamboo fiber // Polymer Composites. - 2022. - Vol. 43, No. 4. - P. 2440-2449. DOI: 10.1002/pc.26553.

75. Li H., Lan J., Zhang H., Ma J., Zhang L., Li Y., Niu X., Hong W., Li H. Bidirectional solar water production enabled by a breathable Janus photothermal material // Chemical Engineering Journal. - 2024. - Vol. 500. - Art. 157295. DOI: 10.1016/j.cej.2024.157295.

76. Tehrani-Bagha A.R. Waterproof breathable layers - A review // Advances in Colloid and Interface Science. - 2019. - Vol. 268. - P. 114-135. DOI: 10.1016/j.cis.2019.03.006.

77. Zhang X., Xiao C., Hu X., Li X., Wang R. Hydrophilic modification of high-strength poly(vinylidene fluoride) hollow fiber membrane // Polymer Engineering & Science. - 2014. - Vol. 54, No. 2. - P. 276-287. DOI: 10.1002/pen.23559.

78. Meng W., Wang J., Zhao J., Gao J., Tan Z., Li X. Preparation and properties of enhanced lightweight nanofibrous membrane-based desiccant // Polymer Engineering & Science. - 2022. - Vol. 62, No. 2. - P. 405-415. DOI: 10.1002/pen.25853.

79. Weilin Z.B., Xu J., Yang H., Xiao S., Liu X., Liang G., Chen L. Fabrication and characterization of silk fibroin powder/polyurethane fibrous membrane // Polymer Engineering & Science. - 2012. - Vol. 52, No. 9. - P. 2025-2032. DOI: 10.1002/pen.23150.

80. Ghosh T., Das T., Purwar R. Review of electrospun hydrogel nanofiber systems: Synthesis, properties and applications // Polymer Engineering & Science. - 2021. - Vol. 61, No. 7. - P. 1887-1911. DOI: 10.1002/pen.25709.

81. Zhang Y., Qiang X.Q., Xu J., Miao M., Guo D., Wang X., Ma X., Li N. Preparation and properties of polyester fibers with polyacrylamide hydrogel grafted by UV irradiation // Polymer Engineering & Science. - 2024. - Vol. 64, No. 2. - P. 865-874. DOI: 10.1002/pen.26590.

82. Oğlakcıoğlu N., Akduman C., Sarı B. Investigation of thermal comfort properties of electrospun thermoplastic polyurethane fiber-coated knitted fabrics for wind-resistant clothing // Polymer Engineering & Science. - 2021. - Vol. 61, No. 3. - P. 669-679. DOI: 10.1002/pen.25607.

83. Akduman C., Oğlakcıoğlu N., Cay A. Enhanced thermoregulation performance of knitted fabrics using phase change material incorporated thermoplastic polyurethane and cellulose acetate nanofibers // Polymer Engineering & Science. - 2024. - Vol. 64, No. 11. - P. 5360-5374. DOI: 10.1002/pen.26921.

84. Rafikov A.S., Khakimova M.Sh., Fayzullayeva D.A., Reyimov A.F. Microstructure, morphology and strength of cotton yarns sized by collagen solution // Cellulose. - 2020. - Vol. 27, No. 17. - P. 10369-10384. DOI: 10.1007/s10570-020-03450-w.

85. Fong N.R., Berini P., Tait R.N. Mechanical properties of thin free-standing CYTOP membranes // Journal of Microelectromechanical Systems. - 2010. - Vol. 19, No. 3. - P. 700-705.

86. Leal-Junior A.G., Quandt B.M., Frizera A., Scherer L.J. Body-monitoring and health supervision by means of optical fiber-based sensing systems in medical textiles // Advanced Healthcare Materials. - 2015. - Vol. 4, No. 3. - P. 330-355.

87. Lau K.W., Dias T. Knittability of high-modulus yarns // Journal of the Textile Institute. - 1994. - Vol. 85, No. 2. - P. 173-190.

88. Derler S., Schrade U., Gerhardt L.C. Tribology of human skin and mechanical skin equivalents in contact with textiles // Wear. - 2007. - Vol. 263, No. 7-12. - P. 1112-1116.

89. Pabon-Carrasco M., Juarez-Jimenez J.M., Reina-Bueno M., et al. Behavior of provisional pressure-reducing materials in diabetic foot // Journal of Tissue Viability. - 2016. - Vol. 25, No. 3. - P. 143-149.

90. Peyre K., Tourlonias M., Bueno M.-A., et al. Tactile perception of textile surfaces from an artificial finger instrumented by a polymer optical fibre // Tribology International. - 2019. - Vol. 130. - P. 155-169.

91. Schwarz-Pfeiffer A., Mecnika V., Beckers M., Gries T., Jockenhoevel S. Optical Fibers // In: Tao X. (Ed.). Handbook of Smart Textiles. - Singapore: Springer, 2015. - P. 79-108. DOI: 10.1007/978-981-4451-45-14.

92. Bunge C.-A., Beckers M., Lustermann B. Basic Principles of Optical Fibres // In: Bunge C.-A., Gries T., Beckers M. (Eds.). Polymer Optical Fibres: Fibre Types, Materials, Fabrication, Characterisation and Applications. - Amsterdam: Woodhead Publishing, 2017. - P. 47-118. DOI: 10.1016/B978-0-08-100039-7.00003-8.

93. Guo J., Liu X., Jiang N., et al. Highly Stretchable, Strain Sensing Hydrogel Optical Fibers // Advanced Materials. - 2016. - Vol. 28, No. 46. - P. 10244-10249. DOI: 10.1002/adma.201603160.

94. Krehel M., Rossi R.M., Bona G.-L., Scherer L.J. Characterization of Flexible Copolymer Optical Fibers for Force Sensing Applications // Sensors. - 2013. - Vol. 13. - P. 11956-11968.

95. Leal-Junior A.G., Frizera A., José M. Sensitive Zone Parameters and Curvature Radius Evaluation for Polymer Optical Fiber Curvature Sensors // Optics & Laser Technology. - 2018. - Vol. 100. - P. 272-281.

96. Remouche M., Georges F., Meyrueis P. Flexible optical waveguide bend loss attenuation effects analysis and modeling: application to an intrinsic optical fiber temperature sensor // Optics and Photonics Journal. - 2012. - Vol. 2. - P. 1-7.

97. Guignier C., Camillieri B., Schmid M., et al. E-knitted textile with polymer optical fibers for friction and pressure monitoring in socks // Sensors. - 2019. - Vol. 19, No. 13. - Art. 3011. DOI: 10.3390/s19133011.

98. Nie B., Huang R., Yao T., et al. Textile-based wireless pressure sensor array for human-interactive sensing // Advanced Functional Materials. - 2019. - Vol. 29. - Art. 1808786. DOI: 10.1002/adfm.201808786.

99. Sun G., Xie H., Lake M.J., et al. Walking-sliding experimental analysis of frictional characteristics of socked feet // Journal of Industrial Textiles. - 2021. - Vol. 51 (Suppl. 5). - P. 9031S-9046S.

100. Bahin L., Tourlonias M., Bueno M.-A., et al. Smart textiles with polymer optical fibre implementation for in-situ measurements of compression and bending // Sensors and Actuators A: Physical. - 2023. - Vol. 350. - Art. 114117. DOI: 10.1016/j.sna.2023.114117.

101. Rafikov A.S., Mirzayev N., Alimkhanova S. Multilayer nonwoven lining materials made of wool and cotton for clothing and footwear // Journal of Industrial Textiles. - 2022. - Vol. 51, No. 4. - P. 6172S-6194S. DOI: 10.1177/15280837211060881.

102. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии. Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк, 1985.- 327 с.

103. Шкляр В.Н. Планирование эксперимента и обработка результатов. - Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2010. - 90 с.

104. Глухих В.В., Шкуро А.Е., Артемов А.В. Математическое планирование экспериментов и анализ их результатов с применением компьютерных программ. - Екатеринбург: УГЛТУ, 2023.

105. Инков А.М., Тапалов Т., Умбетов У.У., Ху Вен Цен В., Ахметова К.Т., Дьякова Е.Т. Методы оптимизации: электронная книга. - Шымкент: ЮКГУ, 2003.

106. Очков В.Ф. Mathcad 14 для студентов, инженеров и конструкторов. - СПб.: БХВ-Петербург, 2007. - 368с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А - АКТ испытания

«УТВЕРЖДАЮ»
Проректор по научной работе и инновациям ТИТЛП

_____ проф. Н.Б.Мирзаев
«__» _____ 2026 г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Член правления-проректор по научной работе и инновациям ЮКУ им. М.Ауэзова

_____ проф. А.К. Жанибеков
«__» _____ 2026 г.

АКТ
о результатах испытаний мембранного материала на основе махровой хлопчатобумажной ткани и акриловой эмульсии

Мы нижеподписавшиеся, докторант кафедры «Технология и проектирование текстильных материалов» ЮКУ им.М.Ауэзова Аташикова Наргиза Асланбековна, профессор Ташкентского института текстильной и легкой промышленности (ТИТЛП) д.т.н., проф. А.С. Рафиков, доцент ТИТЛП, к.х.н., доц. Д.О.Абдусаматова, PhD ЮКУ им.М.Ауэзова А.М. Азимов, PhD и сотрудник сертификационного центра “CENTEXUZ” ТИТЛП О. В. Прозорова составили настоящий акт о том, что в условиях “CENTEXUZ” проведены испытания нового мембранного материала на основе махрового хлопчатобумажной ткани и акриловой эмульсии, полученного в рамках диссертационной работы Аташиковой Н.А.

Испытания проведены по ГОСТ 3811-72 (ISO 3801-77) - поверхностная плотность (г/м^2), ГОСТ 3813-72 (ISO 5082-82) - прочность на разрыв (N), ГОСТ 9913-90- Стойкость к истиранию, ГОСТ 3816-81 (ISO 811-81) - водопоглощение (%),ГОСТ 29298-2005 – воздухопроницаемость, ГОСТ 938.17-70 - паропроницаемость, ГОСТ 8710-84 - промывка образцов для определения усадки.

Цель испытаний: Оценка физико-механических и эксплуатационных свойств мембранного материала для определения возможности его практического применения.

В ходе испытаний были определены следующие показатели:

1. Внешний вид материала:
- покрытие равномерное, без видимых дефектов;
- расслоений и повреждений не обнаружено.
2. Адгезия акрилового покрытия к текстильной основе:
- покрытие обладает удовлетворительной адгезией;
- отслаивание при испытаниях не выявлено.
3. Водопоглощение – 340-390%:
- материал поглощает большое количество воды.
4. Водонепроницаемость – показатель водоупорности 400-448 мм H_2O:
- материал обеспечивает защиту от проникновения воды;

- показатели соответствуют установленным требованиям.

5. Воздухопроницаемость – 0,2-1,0 $m^3/(m^2 \cdot s)$:

- материал сохраняет необходимый уровень воздухопроницаемости.

6. Стойкость к истиранию – свыше 1000-1100 циклов:

- показатель соответствует установленным требованиям.

7. Прочность на разрыв – 350-390 Н:

- показатель соответствует установленным требованиям.

- после проведения испытаний повреждений покрытия не выявлено.

По результатам проведенных испытаний установлено, что мембранный материал на основе махровой хлопчатобумажной ткани и акриловой эмульсии обладает удовлетворительными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками и может быть рекомендован для дальнейших исследований и практического применения.

Заключение: Испытуемый материал соответствует заявленным требованиям и рекомендуется для дальнейшего использования по назначению.

Исполнители:

Докторант _____ Н.А. Аташикова

Науч. руков., д.х.н, проф. _____ А.С. Рафиков

Доцент, к.х.н., доц. _____ Д.О. Абдусаматова

Науч. руков., PhD _____ А.М.Азимов

Сотрудник “CENTEXUZ” _____ О.В. Прозорова

ПРИЛОЖЕНИЯ В – АКТ опытно-промышленного испытания

«СОГЛАСОВАНО»
в.и.о. Проректора по НР и И
ЮКУ им.М.Ауэзова
_____ Назарбек У. Б.
«___» _____ 2026г.

«УТВЕРЖДАЮ»
Директор ТОО
«ШАБИТЕКС»
_____ Сапар Н.С.
«___» _____ 2026 г.

АКТ
опытно-промышленных испытаний

В соответствии с выполнением диссертационной работы на тему: «Разработка технологии Smart-текстиля с использованием полимерного оптического волокна и мембранного слоя» автора диссертационной работы Аташиковой Н.А., были проведены опытно-промышленные испытания на определение основных физико-механических и функциональных показателей и анализ возможности воспроизводства разработанной технологии в производственных условиях на производственной базе ТОО «ШАБИТЕКС»
Срок проведения испытаний: с «01» июня 2026 г. по «01» июля 2026 г.

Основной целью опытно-промышленных испытаний являлось подтверждение работоспособности разработанной технологии и определение возможности ее масштабирования и воспроизводства в производственных условиях.

В рамках испытаний решались следующие задачи:

- определение основных физико-механических показателей разработанного Smart-текстиля;
- определение функциональных характеристик материала;
- оценка равномерности и стабильности свойств по площади образцов;
- оценка прочности и устойчивости соединения текстильной основы, полимерного оптического волокна и мембранного слоя;
- оценка сохранения функциональных свойств материала после технологических воздействий;
- определение технологичности разработанного процесса;
- анализ возможности воспроизводства разработанной технологии на производственном оборудовании;
- выявление возможных технологических ограничений и факторов, влияющих на качество готового материала.

Для проведения испытаний использовались опытные образцы Smart-текстиля, изготовленные в соответствии с разработанным технологическим процессом.

При проведении испытаний контролировались следующие показатели:

- поверхностная плотность материала;
- толщина материала;
- разрывная нагрузка;
- разрывное удлинение;
- устойчивость структуры материала;

- другие показатели в соответствии с назначением разработанного материала.

По результатам испытаний установлено, что опытные образцы Smart-текстиля обладают удовлетворительными физико-механическими характеристиками и сохраняют целостность структуры при проведении предусмотренных испытаний (Таблица 1,2).

Таблица 1 - Физико-механические свойства трикотажных тканей с ПОВ

Образцы	Прочность к истиранию	Разрывная сила, Н		Удлинение, %	
		По ширине	По длине	По ширине	По длине
Полотно без ПОВ	16800	381	240	156	354
Полотно с ПОВ в качестве уточной нити	28500	более 1000	255	125	370
Полотно простого переплетения с ПОВ	более 35000	более 1000	более 1000	113	420
Полотно плюшевого переплитения с ПОВ	более 35000	более 1000	более 1000	85	550

Таблица 2 - Физико-механические свойства мембранных полимерно-текстильных материалов. Числитель – исходное полотно, знаменатель – мембранный материал

Номер образца	Поверхностная плотность, г/м^2	Устойчивость к истиранию, цикл	Разрывная сила, Н	
			По основе	По утку
1А	224 / 244	10500 / 9600	671 / 630	370 / 293
1Б	224 / 261	10500 / 10300	671 / 645	370 / 335
2А	72 / 76	11000 / 9400	322 / 403	93 / 160
2Б	72 / 79	11000 / 10000	322 / 420	93 / 185
3А	202 / 224	14000 / 15500	460 / 438	105 / 301
3Б	202 / 241	14000 / 16000	460 / 472	105 / 334
4А	300 / 353	10900 / 9800	412 / 370	269 / 258
4Б	300 / 389	10900 / 11000	412 / 394	269 / 288
5А	210 / 231	10000 / 10500	310 / 350	330 / 355
5Б	210 / 244	10000 / 11000	310 / 387	330 / 395
6А	228 / 256	15000 / 16800	306 / 281	96 / 140
6Б	228 / 271	15000 / 17000	306 / 311	96 / 148

Полученные результаты свидетельствуют о том, что введение полимерного оптического волокна и мембранного слоя в структуру

текстильного материала не приводит к недопустимому ухудшению его основных физико-механических характеристик.

Проведенный анализ показал, что разработанная технология изготовления Smart-текстиля может быть воспроизведена в производственных условиях при наличии соответствующего технологического оборудования и соблюдении установленных технологических параметров.

В процессе опытно-промышленных испытаний установлено, что технологические операции являются последовательными и могут быть интегрированы в существующую технологическую схему производства текстильных материалов с соответствующей адаптацией отдельных операций.

По результатам проведенных опытно-промышленных испытаний установлено, что разработанная в рамках диссертационной работы, технология обеспечивает получение текстильного материала с заданным комплексом физико-механических и функциональных свойств.

Опытно-промышленные испытания подтвердили:

- работоспособность разработанной технологии;
- соответствие полученных образцов установленным требованиям по основным физико-механическим показателям;
- возможность получения материала с воспроизводимыми характеристиками;

Результаты испытаний подтверждают практическую значимость и возможность дальнейшего применения разработанной технологии в производстве функционального и интеллектуального текстиля.

От ТОО «ШАБИТЕКС»:
Технолог
_____ Фатехова Ф. К.

Лаборант
_____ Миралиева К.А.

От ЮКУ им.М.Ауэзова
Заместитель Проректора по НР и И
_____ Назарбек У.Б.

Директор ДПА
_____ Серікұлы Ж.

Докторант
_____ Аташикова Н.А.
Научный консультант
_____ Ботабаев Н.Е.
_____ Азимов А.М.