

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

На правах рукописи



ХАРАПУДЬКО ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕМБРАННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ТЕКСТИЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ С
ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ**

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук,
доцент Э.Ф. Вознесенский

Казань – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список условных сокращений и обозначений	4
Введение	6
ГЛАВА 1. ТЕНДЕНЦИИ РЫНКА СОВРЕМЕННЫХ МЕМБРАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	15
1.1 Тенденции развития рынка и перспективные области применения технических текстильных материалов, ламинированных полимерными пленками	15
1.2 Современные мембранные и изоляционные технические текстильные материалы	18
1.3 Функциональные полимерные мембраны для ламинирования текстильных материалов	26
1.4 Методы модификации и функционализации технических текстильных материалов и мембран	34
1.5 Задачи диссертации	40
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕМБРАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА С ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ	42
2.1 Выбор объектов исследования	42
2.2 Опытно-промышленное оборудование для получения паропроницаемых полимерных мембран	44
2.3 Экспериментальное оборудование для плазменной модификации и вакуумной металлизации мембранного технического текстильного материала	47
2.4 Методы исследований и испытаний мембранного технического текстильного материала	49
2.5 Методы математического моделирования и статистической обработки результатов экспериментальных исследований	52

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕМБРАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА С ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ	54
3.1 Разработка паропроницаемой гидроизоляционной мембраны для мембранного технического текстильного материала	54
3.2 Математическая модель процесса одноосной ориентации полимерной мембраны для мембранного технического текстильного материала	76
3.3 Разработка мембранного технического текстильного материала	84
3.4 Исследование влияния металлизации на свойства мембранного технического текстильного материала	95
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МЕМБРАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА С ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ	109
4.1 Описание оборудования для производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами	109
4.2 Разработка технологических рекомендаций по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами	116
4.3 Обоснование экономической эффективности производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами	119
Заключение	123
Список литературы	125
Приложения	148

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Сокращения

БОПП	
(BOPP)	– биаксиально ориентированный полипропилен (biaxially-oriented polypropylene),
ВЧ	– высокочастотный,
ВЧЕ	– высокочастотный емкостной,
ИК	– инфракрасный,
КЛСМ	– конфокальная лазерная сканирующая микроскопия,
КТУ	– коэффициент термической усадки,
ЛПЭНП	
(LLDPE)	– линейный полиэтилен низкой плотности (linear low-density polyethylene),
МОПП	
(MOPP)	– моноаксиально ориентированный полипропилен (monoaxially-oriented polypropylene),
МОПЭ	
(MOPPE)	– моноаксиально ориентированный полиэтилен (monoaxially-oriented polyethylene),
МРС	– магнетронная распылительная система,
НТЦ	– научно-технический центр,
ПП (PP)	– полипропилен (polypropylene),
ПЭ (PE)	– полиэтилен (polyethylene),
ПЭНП	
(LDPE)	– полиэтилен низкой плотности (low-density polyethylene),
РСА	– рентгеноструктурный анализ,
ТПУ	– термопластичный полиуретан,
УЗ	– ультразвуковой,
УФ	– ультрафиолетовый,
ЦКРП	– метод центрального композиционного рототабельного планирования,
MD	– продольное направление полотна (machine direction),
MDO	– технология продольной ориентации полимерной пленки (machine direction orientation),

- ME AUS – общая технология получения ориентированных пленок, в том числе пористых, включающая этапы экструзии расплава, отжига, одноосного растяжения (Melt-Extrusion, Annealing, Uniaxial Stretching, MDO),
- TD – поперечное направление полотна (transverse direction),
- RWP – водоупорность (resistant water pump),
- WVTR – паропроницаемость (water vapor transmission rate),

Условные обозначения

- $P_{газ}$ – газопроницаемость,
- $P_{пар}$ – паропроницаемость,
- h_m – расстояние от мишени магнетрона до поверхности материала,
- G_m – расход рабочего газа в процессе магнетронного напыления,
- G_{rf} – расход плазмообразующего газа в процессе ВЧЕ плазменной обработки,
- P_m – давление в камере в процессе магнетронного напыления,
- P_{rf} – давление в камере в процессе ВЧЕ плазменной обработки,
- τ_m – продолжительность магнетронного напыления,
- τ_{rf} – продолжительность ВЧЕ плазменной обработки,
- W_m – удельная мощность магнетрона, отнесенная к площади мишени,
- W_{rf} – удельная мощность ВЧЕ разряда, отнесенная к площади ВЧ-электрода.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Актуальность разработки мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами определяется высоким спросом на данную продукцию при отсутствии на рынке отечественных аналогов. Данные материалы применимы для строительства зданий и сооружений, в частности для кровельных систем и фасадов в качестве паропроницаемого, водо- и ветрозащитного, теплоотражающего слоя. На российском рынке представлены либо мембранные технические текстильные мембраны, либо теплоотражающие материалы. В данном направлении известны паропроницаемые или теплоотражающие материалы таких фирм в России и СНГ как ООО «ТехноНиколь» (г. Рязань), ООО «Гекса» (г. Красногорск), АО «Полимализ» (ОЭЗ «Алабуга», Республика Татарстан), ОАО «СветлогорскХимволокно» (г. Светлогорск, Республика Беларусь). На мировом рынке данная продукция представлена DuPont под брендом Тувек. Поэтому разработка многослойной системы, сочетающей в себе комплекс требуемых свойств, на основе отечественных компонентов является актуальной задачей.

Мембранный технический текстильный материал должен обладать высокими значениями паропроницаемости в сочетании с водоупорностью и ветрозащитными свойствами при сохранении высокой механической прочности. Комплекс свойств паропроницаемости и водоупорности обеспечивают материалы с развитой пористой структурой и отсутствием крупных сквозных микропор. Эту функцию могут выполнять полимерные слои или покрытия, функционирующие по принципу полимерной пористой или непористой мембраны. В качестве армирующей основы многофункционального материала экономически целесообразно применять текстильные нетканые полотна. Теплоотражение традиционно достигается применением металлических и металлсодержащих слоев. Для объединения отдельных функциональных слоев в единую

многослойную структуру применяют процессы ламинирования: клеевым, ультразвуковым или традиционным термическим способом.

Таким образом, комбинирование в одном материале противоречивых, на первый взгляд, свойств является сложной научно-технической задачей, требующей усовершенствования существующих процессов получения мембранных текстильных материалов, металлизации и ламинирования.

Степень разработанности темы. Весомый вклад в развитие темы создания мембранных и многофункциональных текстильных материалов внесли такие исследователи, как В.И. Бесшапошникова, О.И. Одинцова, В.В. Хамматова, Б.Л. Горберг, А.И. Максимов, О.В. Козлова, Д.К. Панкевич, Ю.А. Тимошина, И.М. Давлетбаева.

Представленная работа является продолжением научного направления, связанного с разработкой многофункциональных ламинированных текстильных материалов.

Диссертационная работа направлена на решение актуальной задачи разработки мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами за счет применения паропроницаемых гидроизоляционных полимерных пленок и методов вакуумной металлизации.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» по плану аспирантской подготовки, с использованием оборудования Центра коллективного пользования научным оборудованием по получению и исследованию наночастиц металлов, оксидов металлов и полимеров «Наноматериалы и нанотехнологии».

В диссертационной работе изложены результаты научных исследований автора с 2017 по 2023 гг. в области разработки и исследования мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами.

Область исследования соответствует научной специальности 2.6.16 – «Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности»: п. 2. Проектирование структуры и прогнозирование показателей свойств и качества волокон, нитей, материалов ИТЛП; п. 7. Цифровое прогнозирование,

математические методы, информационные технологии моделирования технологических процессов первичной обработки сырья, организации производства и изготовления волокон, нитей, материалов и изделий текстильной и легкой промышленности; п. 19. Разработка новых материалов, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства ИТЛП; п. 20. Воздействие излучений и плазмы на волокнообразующие полимеры природного и синтетического происхождения, волокна, ткани, кожевенно-меховые и другие ИТЛП.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является разработка мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами, обладающего высокими эксплуатационными характеристиками.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Анализ областей применения, методов получения ламинированных текстильных материалов, методов создания и модификации паропроницаемых и теплоотражающих текстильных материалов.

2. Выбор объектов, методов исследования и оборудования для получения паропроницаемых полимерных мембран, методов металлизации и ламинирования текстильных материалов.

3. Экспериментальные и теоретические исследования влияния технологических параметров производства паропроницаемой полимерной мембраны, методов металлизации и особенностей ламинирования на эксплуатационные свойства мембранных технических текстильных материалов.

4. Разработка технологических рекомендаций по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами, включающих методику получения полимерной мембраны с улучшенными эксплуатационными свойствами, параметры нанесения теплоотражающего покрытия и особенности ламинирования мембраны с неткаными полотнами.

Научная новизна работы.

1. Впервые установлено, что снижение температуры одноосной ориентации дисперсно-наполненной пленки на основе полиэтилена и полипропилена до 85 °С при коэффициенте вытяжки 5,5 позволяет сформировать полимерную мембрану с наиболее равномерной пористой структурой, высокими значениями паропроницаемости (до 11000 г/(м²×24 ч)) и водоупорности (не ниже 1490 мм вод.ст.).

2. Экспериментально установлено и теоретически обосновано, что одноосная ориентация полимерной мембраны в установленном режиме обеспечивает распрямление макромолекулярных цепей, формирование высокоупорядоченной надмолекулярной структуры и многослойной системы щелевидных пор, образующих сквозные каналы в диапазоне размеров 0,115–0,140 мкм и объемной пористостью 46,3 %.

3. Установлено, что для получения износостойкого теплоотражающего покрытия на полимерной мембране при сохранении ее паропроницаемости и водоупорности необходимо в едином вакуумном цикле провести ВЧЕ плазменную обработку и нанесение методом магнетронного распыления слоя алюминия толщиной до 80 нм.

4. Экспериментально подтверждено, что ламинирование разработанной металлизированной мембраны методом точечной УЗ сварки с неткаными несущим и защитным слоями позволяет получить мембранный технический текстильный материал с теплоотражающими свойствами и высокими эксплуатационными характеристиками.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Разработан мембранный технический текстильный материал с теплоотражающими свойствами, обладающий паропроницаемостью до 7800 г/(м²×24 ч), водоупорностью до 1600 мм вод. ст., коэффициентом отражения теплового излучения 0,55.

2. Установлены технологические параметры получения полимерной мембраны, придающие мембранному техническому текстильному материалу повышенные значения паропроницаемости и водоупорности.

3. Установлены технологические параметры нанесения металлического покрытия на мембранный технический текстильный материал, обеспечивающие повышение значений коэффициента отражения ИК-излучения на 90 % и не оказывающие негативного влияния на показатели эксплуатационных свойств.

4. Разработаны технологические рекомендации по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами.

Проведена оценка экономической целесообразности промышленного производства разработанного материала. Экономическая эффективность внедрения разработки составляет 62,8 млн руб. в год со сроком окупаемости 2 года при объеме производства 1036,8 пог. км (20 736 рулонов) в год.

Результаты диссертационной работы успешно прошли испытания в АО «Полиматиз» (ОЭЗ «Алабуга») и внедрены в производство ООО «Композиты116» (г. Казань).

Объекты исследования: полиолефиновые пленки-полуфабрикаты с поверхностной плотностью 56–58 г/м², наполненные дисперсными частицами CaCO₃ производства ООО «ДАНАФЛЕКС-НАНО» (г. Казань); пористые мембраны, полученные одноосной ориентацией пленок-полуфабрикатов; нетканые ПП полотна производства АО «Полиматиз» (ОЭЗ «Алабуга»).

Методология и методы исследований.

В ходе выполнения диссертационной работы использовали стандартные и специальные методики испытаний мембран и текстильных материалов, аналитические методы физико-химических исследований. Для обработки результатов экспериментальных исследований использовали методы статистической обработки данных. Для разработки математической модели процесса одноосной ориентации полимерной мембраны для мембранного

технического текстильного материала использовали метод молекулярной динамики.

Получение пористой мембраны для ламинирования технического текстильного материала проводилось на опытно-промышленной MDO установке MDO-II 600 (COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH, г. Мейтенбет, Германия). Металлизация и плазменная модификация полимерной мембраны проводились в модульной вакуумной плазменной установке PlasmaModular (ООО «ПИ ВИ ЭС», г. Казань).

Паропроницаемость мембранных технических текстильных материалов определялась по ASTM D6701; поверхностная плотность – по ГОСТ 3811-1972; водоупорность – по ГОСТ Р 51553-99; изменение размеров после нагревания – по ГОСТ Р 54106-2010; разрывная нагрузка и удлинение при разрыве – по ГОСТ Р 53226-2008; коэффициент теплоотражения текстильных материалов определяли по ГОСТ Р 56734–2015; прочность на растяжение в момент разрыва пористой мембраны – по ASTM D882. Для исследования физико-химических свойств и структуры мембранных технических текстильных материалов применяли методы конфокальной лазерной сканирующей микроскопии (КЛСМ), сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), ИК-Фурье спектроскопии, рентгеноструктурного анализа (РСА), газожидкостной порометрии, дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и компьютерной микротомографии.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика получения мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния параметров процесса одноосной ориентации полимерной мембраны на эксплуатационные свойства мембранного технического текстильного материала.

3. Результаты экспериментальных исследований влияния структуры мембранного технического текстильного материала и процесса металлизации на комплекс его эксплуатационных свойств.

4. Молекулярно-динамическая модель влияния температуры одноосной ориентации на надмолекулярную структуру полимерной мембраны для мембранного технического текстильного материала.

5. Технологические рекомендации по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами.

Достоверность полученных результатов и выводов обеспечена применением современных аналитических методов, стандартных и специальных методик испытаний, согласованностью данных, полученных при использовании комплекса методов исследования и в сопоставлении полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Апробация работы и публикации.

Результаты работы обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции с элементами научной школы для студентов и молодых ученых «Новые технологии и материалы легкой промышленности» (г. Казань, 2020–2023); Всероссийской (с международным участием) конференции «Физика низкотемпературной плазмы» (г. Казань, 2020); Международной научно-технической конференции «Легкая промышленность: проблемы и перспективы» (г. Омск, 2021); Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь. Наука. Творчество» (г. Омск, 2021); Международной научно-технической конференции «Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий» (г. Казань, 2020); Международной научной конференции «Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах» (г. Санкт-Петербург, 2021); Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием «Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2022)» (г. Москва, 2022); I Всероссийской конференции с международным участием «Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий» (Материаловедение – 2023) (г. Казань, 2023).

Личный вклад автора в опубликованных в соавторстве работах состоит в выборе и обосновании объектов и методов исследований; в проведении экспериментов; анализе, обработке и обобщении полученных экспериментальных данных; в разработке рекомендаций по производству мембранных технических текстильных материалов с теплоотражающими свойствами.

Структура и объем работы: Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Диссертационная работа изложена на 147 страницах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 22 таблицы, в тексте представлены ссылки на 216 литературных источников.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, поставлены цели и определены задачи диссертационного исследования, изложена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены тенденции рынка технических и бытовых мембранных текстильных материалов. Представлены основные производители мембранных материалов на текстильной основе и конъюнктура мирового и российского спроса на данную продукцию. Описаны известные технические решения при создании мембранных текстильных материалов и области их применения. Представлен обзор теплоотражающих полимерных материалов, методов их получения и применения. Обоснована актуальность разработки мембранных технических текстильных материалов с теплоотражающими свойствами на основе российского сырья и технологий. Сформулированы основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе обоснован выбор объектов исследования, представлены их основные характеристики. Приведено описание опытно-промышленного полимерного, вакуумного напылительного и плазменного оборудования для

получения образцов мембранных технических текстильных материалов с теплоотражающими свойствами. Представлены методы исследований и испытаний объектов исследования. Описаны статистические методы обработки экспериментальных данных и методы математического моделирования.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований процессов получения пористой мембраны. Разработана математическая модель влияния температуры одноосной ориентации на надмолекулярную структуру полимерной мембраны. Разработана методика получения мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами. Проведены исследования эксплуатационных свойств полученного мембранного текстильного материала технического назначения.

В четвертой главе на основе результатов экспериментальных исследований предложены технологические параметры процесса одноосной ориентации (MDO) при получении паропроницаемой мембраны для производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами. Разработаны технологические рекомендации по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами. Проведен расчет экономической эффективности от внедрения разработки в производство.

ГЛАВА 1. ТЕНДЕНЦИИ РЫНКА СОВРЕМЕННЫХ МЕМБРАННЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В главе представлен анализ рынка современных мембранных текстильных материалов. Описаны известные и перспективные технические решения по созданию мембранных материалов на текстильной основе. Приведено обоснование направления исследования, определены задачи диссертации. Основные результаты, представленные в главе, опубликованы в работах [1, 2].

1.1 Тенденции развития рынка и перспективные области применения технических текстильных материалов, ламинированных полимерными пленками

В 2013–2023 гг. с точки зрения развития текстильной промышленности на глобальном уровне отмечены процессы интенсивной структурной перестройки, которые привели к смещению интересов R&D (Research and Development, исследования и разработки) компаний и профильных университетов с создания новых синтетических прекурсоров для изготовления комплексных или композиционных текстильных материалов на модификацию и функционализацию текущих решений в данной области [3–5]. Трендом современных синтетических изделий является комбинирование текстильного материала основы с пленочными многофункциональными материалами [6]. Номенклатура современных комбинированных ламинатов позволила увеличить спектр применений в различных межотраслевых нишах за счет достижения уникальных свойств.

Классифицируют композиционные текстильные материалы в основном по структуре, способу производства и назначению [7]. Высокий интерес в мире наблюдается в области разработки интеллектуального или функционального текстиля. Функциональный текстиль – это материалы, которым придаются

определенные свойства с помощью состава, структуры или отделки (например, путем нанесения пропиток, наполнителей, специальных слоев или покрытий). Функциональный текстиль может включать в себя традиционные текстильные изделия, в то время как интеллектуальный текстиль обладает внутренними свойствами, которые обычно не ассоциируются с традиционным текстилем [8].

Сектор рынка функционального текстиля чрезвычайно обширен, однако в производстве текстильных материалов, ламинированных полимерными пленками, можно выделить несколько перспективных направлений, востребованных на внутреннем рынке РФ и за рубежом. Например, водонепроницаемые «дышащие» ламинаты применяются в строительной индустрии, в сельском хозяйстве, для производства защитной и спортивной одежды, для изделий личной гигиены [9, 10].

Водонепроницаемые «дышащие» ламинаты на текстильной основе сочетают в себе паропроницаемость и водоупорность. Во многих областях применения «дышащие» ламинаты на текстильной основе должны удовлетворять требованиям не только по значениям паропроницаемости, но и ряду других функциональных характеристик. Например, в демисезонной одежде паропроницаемость необходимо сочетать с рядом специфических свойств, таких как устойчивость к дождю, сопротивление давлению воды, ветрозащитные свойства, механическая прочность, стойкость к истиранию, поведение при высыхании, устойчивость к стирке, устойчивость к изгибу, воздействию низких температур, проколу, порезу и др. [11].

Различные типы дышащих текстильных ламинатов можно разделить на следующие группы: материалы с селективной проницаемостью самой текстильной основы; материалы, ламинированные микропористыми мембранами; ламинаты на основе гидрофильных непористых полимерных мембран; разнообразные комбинации микропористых и непористых гидрофильных мембран и покрытий [10, 12–15].

На мировом рынке мембранного текстиля для одежды и обуви ключевыми производителями являются W. L. Gore and Associates (США) под брендом Gore-Tex [16], Toray Industries (Япония) с брендами FHM и SIMMS [17], Sympatex

Technologies GmbH (Германия) [18], UCB Chemicals (Бельгия) [19], Mitsubishi Heavy Industries Ltd (Япония) [20].

В России мембранные ткани для одежды производят ООО «Балтекс» (г. Балашов) [21], группа компаний «Текстайм» (г. Москва) [22], ООО «Чайковский текстиль» (г. Чайковский) [23]. Лидером мембранного текстиля в Республике Беларусь является ОАО «Моготекс» (Республика Беларусь, г. Могилев) [24]. В России и СНГ мембранные текстильные материалы бытового, медицинского и сельскохозяйственного назначения производят такие предприятия как АО «Полиматиз» (ОЭЗ «Алабуга», Республика Татарстан) [25], ОАО «СветлогорскХимволокно» (Республика Беларусь) [26], ООО «Гекса-Нетканые материалы» (г. Красногорск) [27].

В настоящее время «дышащие» ламинаты на текстильной основе и мембранный текстиль, в целом, находят все большее применение в отраслях, не связанных с производством одежды, например, в строительстве зданий и сооружений, для обеспечения ветрозащиты, паро- и гидроизоляции. Однако, производство мембранных тканей зачастую связано с высокими производственными затратами [28–32] и бытовой текстиль не в полной мере отвечает требованиям к техническим текстильным материалам для строительства. Поскольку речь идет о большом объеме потребления материала, основными требованиями, наряду с обеспечением целевых свойств, являются относительная дешевизна в производстве, удобство монтажа и специфическая эксплуатационная устойчивость.

Мировыми лидерами в производстве строительных полимерных мембран являются DELTA®-VENT S (PLUS) от компании DÖRKEN Membranes (Германия) [33], TYVEK SOLID от компании DuPont (США) [34], GRAND LINE 170 от компании MDM NT (Польша) [35], Ютавек 115 от фирмы JUTA (Чехия) [36].

На российском рынке и в СНГ известны такие технические текстильные материалы с мембранными свойствами как Полиспан Строй АМ от АО «Полиматиз» (ОЭЗ «Алабуга», Республика Татарстан) [25], ИЗОСПАН-AQ PROFF от компании ООО «Гекса-Нетканые материалы» (г. Красногорск) [27], АЛЬФА

ВЕНТ 130 от ООО «Завод Технофлекс» (бренд Технониколь) (г. Рязань) [37], BUDAP от ОАО СветлогорскХимволокно (Республика Беларусь) [26].

Обзор основных производителей рынка мембранных технических текстильных материалов показывает присутствие крупных международных корпораций с запатентованными техническими решениями. В России и СНГ также присутствуют свои лидеры, однако ассортимент мембранных текстильных материалов и их технический уровень заметно ниже. Таким образом, разработка современных мембранных технических текстильных материалов из отечественных компонентов является перспективной и востребованной. Согласно трендам современной промышленности на производство энергоэффективных «eco-friendly» полимерных материалов, сочетающих в едином полотне несколько эффектов, целесообразно усовершенствование существующих технологий с точки зрения снижения материалоемкости и придания дополнительных теплоотражающих свойств.

1.2 Современные мембранные и изоляционные технические текстильные материалы

В РФ применение современных подкровельных и фасадных изоляционных текстильных материалов, пленок и мембран началось с 2000-х годов. За рубежом классификация строительного текстиля и мембран разрабатывалась отраслевыми союзами, например, Центральным союзом кровельщиков Германии (ZVDH-Fachregeln für Dachdeckungen mit Dachziegel und Dachsteinen) [38]: DIN EN 13967-2017 [39], DIN EN 13984:2013 [40], DIN EN 13859-1:2014 [41]. Данные стандарты нормируют следующие рулонные водо- и ветрозащитные подкровельные и фасадные полимерные материалы:

– Диффузионная мембрана – водоизоляционный паропроницаемый рулонный материал, защищающий нижерасположенные слои конструкции крыши от атмосферных осадков и конденсата, применяемый в стропильной конструкции

крыши с одним вентиляционным каналом (зазором), ограничивающий конвективное движение воздуха через теплоизоляцию и не препятствующий выводу водяного пара из теплоизоляции.

– Пленка пароизоляционная – изоляционный материал из полимеров, эластомеров или композиционных материалов, функция которого заключается в ограничении движения водяного пара и влаги через конструкцию, в полном исключении неконтролируемого движения воздуха.

– Пленка пароизоляционная адаптивная – изоляционный материал с переменной паропроницаемостью, функция которого заключается в обеспечении контролируемого движения водяного пара и влаги через конструкцию и в полном исключении неконтролируемого движения воздуха.

Нормируемыми показателями качества рулонных изоляционных материалов являются геометрические параметры; показатели физико-механических свойств; показатели пожарной опасности; водонепроницаемость; паропроницаемость; устойчивость к искусственному старению, воздействию низких температур и др.

Несмотря на активное применение данных инженерных решений, в России до конца не сформировалась единая номенклатура таких материалов. Первоначальным регламентом в данной области являлся СП 17.13330.2011 Кровли, актуализированная редакция СНиП II-26-76 [42]. В РФ в настоящее время ведется обсуждение проектов пакета государственных стандартов в области гибких рулонных изоляционных материалов для кровли и фасадов [43], гармонизированного с системами стандартов ISO и EN.

Функциональные технические текстильные материалы строительного назначения классифицируют по реализуемым функциям, что облегчает подбор материалов при проектировании фасадных и кровельных конструкций. По этому признаку выделяют ветрозащитные, пароизоляционные, гидроизоляционные и теплоотражающие полотна.

Ветрозащитные текстильные материалы, как правило, образованы неткаными полотнами по технологии спанбонд. Технология спанбонд основана на формировании полотна из расплава с последующей точечной термической

сваркой волокон [44]. Для ветрозащиты кровли и вентилируемых фасадов зданий обычно применяют спанбонд на основе полипропиленовых (ПП) волокон. Известны нетканые материалы на основе более тонких волокон и других технологий холстообразования, например, айрлейд, спанлейс, мелтблаун, однако они редко применяются в качестве ветрозащитных мембран в строительстве в силу высокой цены и низкой, относительно спанбонда, механической прочности [45, 46].

Более эффективным решением является применение пористых или перфорированных паропроницаемых полимерных пленок, укрепленных одним (дуплекс) или двумя (триплекс) слоями нетканого полотна. Объединение слоев могут проводить термоскреплением, точечной ультразвуковой (УЗ) сваркой, с применением клея. Ветрозащитный материал должен обладать хорошей паропроницаемостью и, желательно, препятствовать проникновению конденсированной воды. Такие материалы также называют диффузионными. Диффузионный материал представляет собой аналог мембранного водоупорного материала селективно проницаемого для водяных паров [47].

Пароизоляционные материалы, как правило, представляют собой нетканые полотна, ламинированные непористыми полимерными пленками (дуплексы и триплексы). Различают их в основном по материалам отдельных слоев и их сочетаниям, например, спанбонд с пароизоляционной полиэтиленовой (ПЭ), ПП или поливинилхлоридной (ПВХ) пленкой и спанбонд с лакокрасочным покрытием. Функцией данных материалов является предотвращение проникновения пара из жилого помещения к слоям теплоизоляции из минеральной ваты или комбинированных матов, в целях исключения намокания гигроскопичного теплоизоляционного материала, снижения его теплоизолирующей способности, возникновения плесневого заражения кровельных конструкций [48].

Гидроизоляционные материалы представляют собой волокнисто армированные (штапельные волокна, ткани или нетканые полотна) композиты с битумной [49] или ПВХ матрицей. Данные материалы препятствуют

распространению капиллярной влаги от фундамента или кровли по конструкциям здания.

Теплоотражающие материалы основаны на эффектах оптического отражения ИК излучения в сторону жилого помещения или подкровельного пространства. Это достигается за счет применения металлической фольги или металлизированных полотен. Применение теплоотражающих материалов в составе кровли или фасада обеспечивает сокращение теплотерь здания за счет излучения [50]. Теплоотражающие материалы могут размещаться непосредственно под кровлей или над потолком помещения, над или под теплоизоляцией. Основным требованием для функционирования теплоотражающих материалов в составе пакета является отсутствие плотного прилегания каких бы то ни было материалов к отражающей поверхности.

В отдельных работах предложены разнообразные варианты классификации текстильных изоляционных материалов. В работе [48] все текстильные строительные мембранные материалы классифицированы с точки зрения паропроницаемости:

- тип А – влаго- и ветрозащитный паропроницаемый нетканый материал по технологии спанбонд для защиты утеплителя от выветривания и внешней влаги;

- тип АМ – диффузионный материал, который представляет собой дуплекс или триплекс, с усиливающими слоями спанбонда и паропроницаемой диффузионной пленкой; укладывается между утеплителем и кровельным покрытием; обеспечивает защиту несущих элементов кровли и утеплителя от внешних атмосферных осадков и ветра;

- тип В – собственно пароизолирующий материал, имеет двухслойную структуру, содержит спанбонд и пароизоляционную непористую пленку; пароизоляционный материал используется в качестве паробарьера внутри помещений, в конструкции стен, полов и межэтажных перекрытий, для утепленной скатной кровли;

– тип С – двухслойная пароизоляционная мембрана аналогичная типу В, но повышенной плотности; используется в неутепленных и в плоских утепленных кровлях, в цокольных этажах и в неотапливаемых подвалах;

– тип D – дуплекс из ламинированной ПП ткани; выдерживает значительные механические нагрузки.

На основе рекомендаций разработчиков и производителей изоляционных текстильных материалов [52, 53] предложена схема расположения слоев в составе пакета кровельных материалов (рисунок 1.1).

В направлении разработки фасадных и подкровельных изоляционных материалов на текстильной основе в РФ и за рубежом наблюдается высокая изобретательская активность.

Ветроизоляционные нетканые материалы могут быть представлены как традиционными полотнами спанбонд [51], так и их вариациями. Известен строительный нетканый изоляционный материал, на основе скрепленных между собой нетканых полотен из штапельного стекловолокна и синтетических волокон. Материал обладает хорошими физико-механическими характеристиками и огнестойкостью [54].

Гидроизоляционные материалы часто являются композиционными системами на основе штапельных волокон или иглопробивных нетканых полотен, пропитанных или покрытых составами на основе битумов. Имеется значительно количество разработок по созданию текстильной основы для битумной гидроизоляции – так называемого «еврорубероида» [54–58].

Пароизоляционные текстильные и полимерные материалы строительного назначения позволяют ограничить проникновение пара или способствовать его выведению из конструкций здания.

Комбинированный соэкструзионный нетканый материал, описанный в патенте [59], с полимерным пористым слоем предлагается в качестве строительной пароизоляционной мембраны.

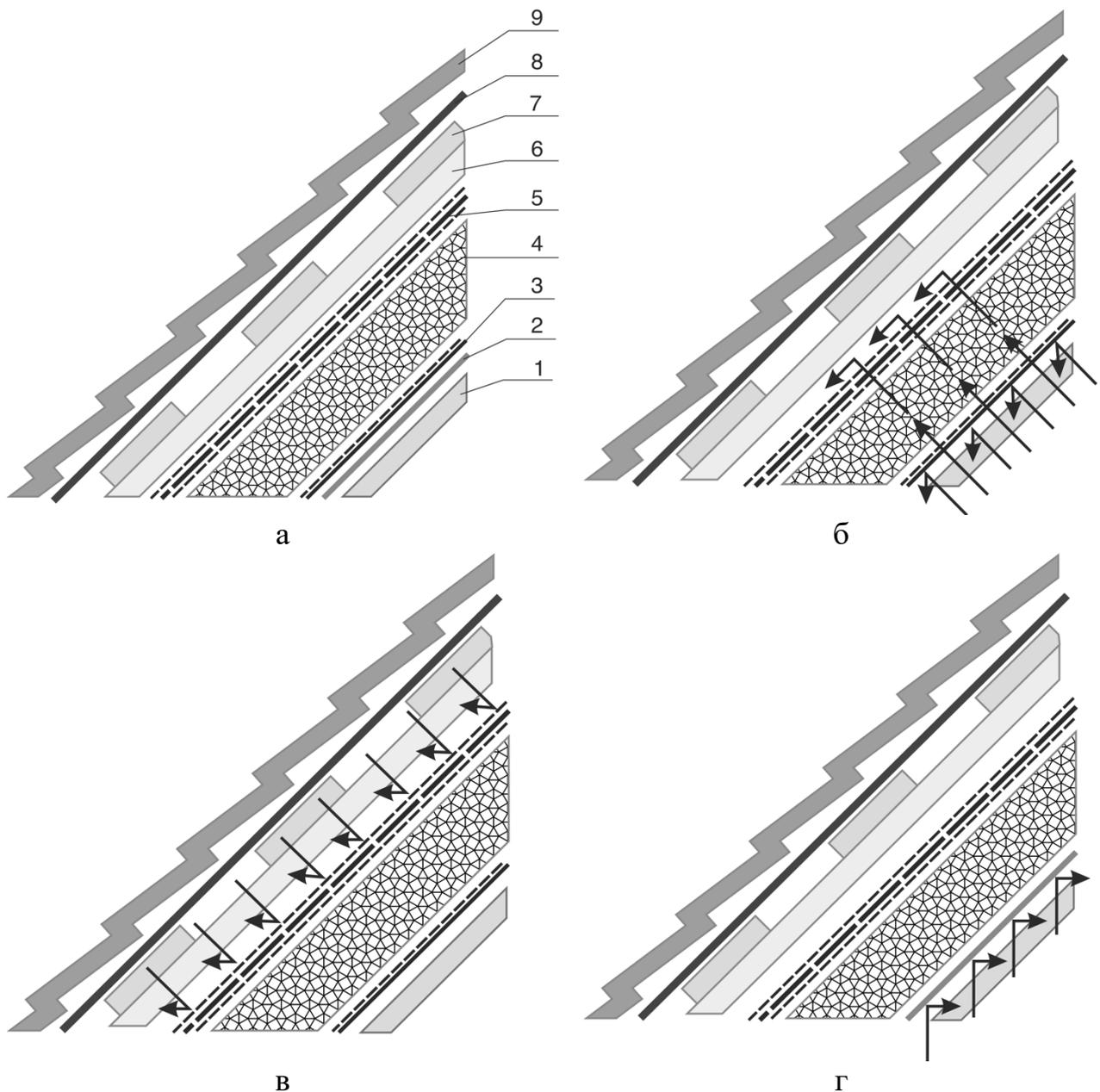


Рисунок 1.1 – Схема расположения и функционирования слоев в составе пакета кровельных материалов: а – схема слоев (1 – внутренняя обшивка; 2 – теплоотражающий материал; 3 – пароизоляционный материал; 4 – волокнистый утеплитель; 5 – диффузионный мембранный материал; 6 – контробрешетка с вентиляционным зазором; 7 – разреженная обрешетка; 8 – подкровельный слой; 9 – кровельный материал); б – схема транспорта водяных паров через пакет кровельных материалов; в – схема отвода воды из кровельной системы; г – схема отражения теплового излучения

Фирма ТЦ «Изоспан» (г. Москва) производит мембранные, паро- влагоизоляционные материалы строительного назначения [60]. Данные материалы рассматриваются как часть запатентованных решений в области энергоэффективного строительства [61].

Среди ламинированных мембранных текстильных материалов строительного назначения запатентован ряд распространенных технических решений.

В изобретении [62] описан слоистый рулонный кровельный гидроизоляционный материал, представляющий собой нетканый материал на синтетической основе, покрытый полимерной композицией, содержащей полиизобутилен, этиленпропиленовый каучук, технический углерод, парафин, стеариновую кислоту, битум и стабилизатор.

В изобретении [63] предложен кровельный изоляционный материал, содержащий несущий нетканый слой и паропроницаемый, водонепроницаемый функциональный слой, на основе акрилатов или полиуретанов.

Известна композитная пленка, предназначенная для использования в качестве мембранного строительного материала [64]. Многослойный материал содержит функциональную пленочную мембрану, защищенную с двух сторон слоями нетканого материала на основе бикомпонентных волокон. В данном изобретении используются непористые мембраны на основе термопластичного полиуретана и/или сложного сополиэфира, отличающиеся более низкой паропроницаемостью и высокой стоимостью по сравнению с микропористыми мембранами на основе полиолефинов.

Многослойная комбинированная пленка для строительства, содержащая функциональный слой, обладающий паропроницаемостью и водонепроницаемостью, описанная в изобретении [65], для защиты функционального слоя от внешних воздействий, содержит в составе несущие слои на основе полиэфирных филаментов. К недостаткам изобретения относится технологическая сложность соэкструзии термопластичного мембранного слоя на несущий волокнистый слой, что значительно усложняет технологический процесс производства многослойного материала.

Придание мембранным подкровельным материалам дополнительных теплоотражающих свойств позволяет уменьшить толщину слоя теплоизоляционных материалов, используемых в строительных конструкциях, и повысить энергоэффективность зданий и сооружений. Данное сочетание свойств обеспечивает конкурентные преимущества мембранных материалов в строительстве. Теплоотражающие свойства в кровельных и фасадных конструкциях актуальны для отражения теплового излучения в сторону помещения. Данные свойства обеспечивают либо применением отдельного материала с покрытием из фольги, например, теплоизолирующего назначения, либо нанесением металлического покрытия на мембранный или теплоизолирующий материал.

Известно подкровельное покрытие, содержащее мембранный слой, обеспечивающий паропроницаемость материала, и металлический слой, отражающий тепловое излучение [66]. В качестве мембран используют перфорированные и микропористые пленки на основе полипропилена. Для защиты от механических повреждений мембрана с внешних сторон покрыта фильтерными неткаными материалами и соединена с ними методом термоскрепления. Для придания теплоотражающих свойств на фильтерный нетканый материал или перфорированную/микропористую пленки наносят металлический слой из чистого алюминия или алюминиевого сплава, который для предотвращения коррозии покрывают защитным полимерным слоем с добавлением аморфного диоксида кремния. Существенным недостатком указанного решения является то, что использование полимерного покрытия для защиты металлического слоя от коррозии приводит к снижению паропроницаемости материала, что связано с уменьшением диаметра пор, повышению его поверхностной плотности, а также приводит к увеличению количества операций и усложнению технологического процесса получения материала.

Для теплоотражающих мембранных материалов, которые могут быть использованы в том числе в строительных конструкциях в качестве подкровельных гидроизоляционных материалов, важным показателем является их биологическая

стойкость к воздействию бактерий и плесневых грибов. Для придания текстильным материалам биостойких свойств применяют разнообразные препараты: антибактериальные, биоциды, фунгициды. Составы могут вводить в процессах пропитки, добавлять в качестве наполнителей в полимерный расплав в процессах смешения и экструзии [67]. Также ведутся разработки специальных биоцидов, эффективных для защиты зданий и сооружений от биоповреждений, например, на основе азотиазола [68–70].

На основе рассмотренных литературных источников показано, что применение изоляционных текстильных материалов отвечает современным требованиям проектирования кровельных и фасадных конструкций. Номенклатура данных материалов стандартизована в рамках Евросоюза. На рынке Европы присутствует значительное количество разработок изоляционных текстильных материалов. Данные технологии успешно применяются в РФ и СНГ, однако ассортимент отечественных аналогов намного уже. В РФ и СНГ начаты процессы стандартизации и сертификации данного вида продукции.

Таким образом, разработка отечественных изоляционных и, в частности мембранных, технических текстильных материалов на основе отечественного сырья и компонентов является актуальной задачей современного материаловедения.

1.3 Функциональные полимерные мембраны для ламинирования текстильных материалов

Многослойные текстильные материалы, обладающие селективной проницаемостью, являются перспективными для использования в подкровельных и фасадных системах в качестве диффузионного слоя, обладающего гидроизоляционными свойствами и высокой паропроницаемостью. Для создания данных материалов в качестве функционального слоя применение получили

полимерные пленки, представляющие собой мембраны с регулируемым диапазоном проницаемости.

Мембранный слой, входящий в состав многослойных мембранных материалов технического назначения, используемых в строительстве, должен обеспечивать эффективный транспорт паров воды от утеплителя к вентилируемому зазору, препятствуя образованию конденсата. Гидроизоляционные свойства мембранных материалов обеспечивают дополнительную защиту строительных конструкций от воды при монтаже и эксплуатации.

Для получения мембранных материалов, используемых в строительстве, применяются полимерные мембраны, выполненные из пластифицированного поливинилхлорида, полиуретанов на основе простых и сложных эфиров, термопластичных полиолефинов [64, 71]. Применение данных полимеров для изготовления мембранных слоев обусловлено доступностью сырьевой базы, высокими физико-механическими характеристиками, отсутствием изменений линейных размеров в процессе эксплуатации материалов.

Функциональные полимерные мембраны по строению подразделяют на непористые, пористые и комбинированные [71–73]. Непористые мембраны производят из гидрофильных полимеров. Отсутствие водопроницаемости для данных материалов обусловлено наличием монолитной структуры, а паропроницаемость обеспечивается диффузией низкомолекулярных веществ в аморфной фазе гидрофильного полимера за счет градиента концентраций.

В изобретении [64] непористая мембрана, входящая в состав многослойного текстильного материала, выполнена из термопластичного полиуретана (ТПУ) или сложного сополиэфира. Мембранный материал наносится на текстильную подложку в процессе каширования на линиях экструзионного ламинирования. Мембрана характеризуется хорошей водоупорностью, в том числе в условиях косого дождя.

Авторами [65] разработан многослойный материал с непористой мембраной на основе ТПУ карбонатного типа, который получен присоединением изоцианата и одного или нескольких полиолов. Материал мембраны устойчив к атмосферным

воздействиям и характеризуется хорошей водоупорностью, но требует нанесения методом поливной соэкструзии на несущий волокнистый слой.

В работе [74] непористый мембранный слой получают из сополимера простого и сложного полиэфира или сополимера простого и сложного полиэфира и полипропилена. Мембрана наносится на пленочную подложку, которая в последствии удаляется, позволяя получить материал, характеризующийся высокой паропроницаемостью.

Непористые мембраны главным образом производятся из ТПУ, стоимость которого выше по сравнению со стоимостью полиолефинов. Кроме того, для мембранных материалов из сложноэфирных ТПУ при постоянном попадании на них воды может происходить ускоренное разложение в результате автокаталитического гидролиза. Материалы из ТПУ на основе простых эфиров менее восприимчивы к гидролизу, но имеют пониженную стойкость к повышенным температурам и УФ-излучению [65].

Материалы на основе непористых мембран обеспечивают хорошее отведение водяного пара только при значительной разнице давлений и концентраций по разные стороны мембранного слоя, поэтому при использовании данных материалов скорость транспорта водяных паров снижается при повышенной влажности воздуха [75]. Кроме того, использование непористых мембран на основе ТПУ приводит к удорожанию ламинатов на их основе, что обусловлено относительно высокой стоимостью полиуретанов по сравнению с полиолефинами и большим расходом для производства рулонных материалов строительного назначения.

Пористые мембранные пленочные материалы представлены корпускулярными и губчатыми мембранами. Корпускулярную структуру получают соединением отдельных гранул или волокон полимеров с образованием системы пустот. Губчатая структура образуется в результате различных физико-химических и механических воздействий на сплошной твердый полимерный слой с образованием в нем пор и каналов. Непроницаемость данных материалов достигается за счет использования для их производства гидрофобных полимеров.

Механизм проницаемости основан на явлении массопереноса транспортируемого вещества через систему сквозных пор под действием градиента давлений.

Пористые мембраны корпускулярной структуры в основном представлены материалами, полученными методом электроспиннинга. Функциональный слой может быть получен из полиуретановых волокон, которые в процессе нанесения на текстильную подложку образуют пористую систему [76]. Авторами [77] для получения пористой мембраны методом электроформования предложено использовать композицию из фторопласта, диметилформамида, полиуретана и бутилацетата.

Регулирование процесса электроспиннинга позволяет получать мембраны с широким диапазоном характеристик, создавать бесшовные переходы между частями материала с различной проницаемостью. Мембраны, полученные методом электроформования, характеризуется высокой паропроницаемостью и эластичностью, низкой поверхностной плотностью, но уступают другим видам мембран по водоупорности, а используемая технология отличается сложностью.

Для получения мембранных пористых материалов губчатой структуры используются различные методы, среди которых вспенивание полимеров с образованием структуры с открытыми сквозными порами, а также метод ориентационного вытягивания MDO (Machine Direction Orientation) полимерных пленок с дисперсными наполнителями с образованием пор в результате термомеханического воздействия. Общая технология получения ориентированных пленок, в том числе пористых, включает этапы экструзии расплава (Melt-Extrusion), отжига (Annealing), одноосного растяжения (Uniaxial Stretching), включая MDO, и называется в профессиональных источниках MEAUS [78]. Технология MEAUS для производства пористых мембран исключает применение растворителей, основана на растяжении полукристаллических полимерных пленок в три этапа. Наполненные пленки получают по технологиям плоскощелевой или выдувной экструзии. Последующий термический отжиг позволяет повысить размеры кристаллитов полимера. При одноосном растяжения наполненные экструдированные пленки сильно деформируются вдоль машинного направления,

сначала при комнатной температуре, чтобы образовались поры, затем при повышении температуры для увеличения размера пор. Завершающим этапом технологии MEAUS является стадия термофиксации для стабилизации размеров и структуры полученных мембран [79–88].

В работе [89] для получения многофункционального ламинированного текстильного материала используется полупроницаемый микропористый мембранный слой, выполненный из гидрофобного полиуретана (ПУ) или гидрофобного вспененного политетрафторэтилена (ПТФЭ). Мембраны, полученные путем вспенивания, характеризуются высокой газопроницаемостью и являются непроницаемыми для полимерных смол, но наличие высокоразвитой пористой структуры не позволяет получать на их основе материалы с высокими гидроизоляционными характеристиками.

Авторами [90] предложен микропористый материал на основе ПВХ или ПП пленки с механически расщепленным графитом. В изобретении [91] для получения материала с регулируемой влаго- и паропроницаемостью используется мембранный микропористый материал, который заполняет ячейки несущей сетки. Для получения микропористой мембраны в расплав полимера вводят дисперсный карбонат кальция или магния. В результате деформации наполненного полимера образуются сквозные микропоры, локализованные в пределах ячеек сетчатой структуры несущего слоя.

Для получения мембран микропористой структуры методом одноосного растяжения используют полимерные пленки, преимущественно на основе полиолефинов, а именно из полукристаллических гомополимеров, таких как ПЭ и ПП [92]. В качестве дисперсных наполнителей используют неорганические порошки на основе кремнезема, глинозема, оксидов кальция, цинка, магния, титана, циркония, а также их смесей [93].

Для получения микропористых мембран методом MEAUS используется пленка-предшественник (полуфабрикат), полученная методом экструзии, содержащая дисперсный наполнитель. Образование пористой морфологии происходит в результате возникновения локальных дефектов структуры при

одноосной ориентации пленки-предшественника. Регулирование режимов термического воздействия и усилия вытяжки позволяет получать микропористые мембраны с различными характеристиками [92].

В работе [71] описан метод получения микропористой мембраны на основе смеси полимеров – ПП, ПЭ низкого и высокого давления, линейного ПЭ низкой плотности и металлоценового ПЭ. В качестве неорганического наполнителя использован дисперсный карбонат кальция или сульфат бария. Полученную экструдированную непористую пленку подвергают одноосному растяжению, при этом происходит образование развитой микропористой структуры. Материал характеризуется высокими показателями воздухо- и паропроницаемости, при этом является влагонепроницаемым.

Авторами [80, 94] получены микропористые мембраны на основе смеси ПП и ПЭ высокой плотности, наполненной дисперсным карбонатом кальция и тальком. Использование в качестве наполнителя талька, имеющего пластинчатую форму частиц, способствует получению мембран с наибольшей степенью ориентации макромолекул полимера, что положительно сказывается на их физико-механических характеристиках. Повышение содержания наполнителя приводит к увеличению суммарного объема пор в материале и повышению проницаемости. Введение дисперсного наполнителя также способствовало повышению предела прочности одноосно-ориентированных микропористых мембран, при этом максимальные значения предела прочности достигались при содержании 5 мас. % наполнителя в полимерной матрице.

В работе [95] исследованы шероховатость, кристалличность, распределение пор по размерам, паропроницаемость и водоупорность микропористых мембран на основе ПЭ, наполненного карбонатом кальция. Установлено, что определяющим фактором, влияющим на воздухо- и паропроницаемость, является размер частиц наполнителя и его процентное содержание в полимерной матрице. Кристалличность микропористых мембран не оказывает влияние на их проницаемость.

Микропористые мембраны технического назначения обладают рядом преимуществ, таких как высокие показатели водостойкости и паропроницаемости, ветроустойчивость и относительно низкая стоимость по сравнению с непористыми мембранами на основе гидрофильных полимеров. При этом пористые мембраны наиболее подвержены механическим повреждениям и загрязнению, что может приводить к закупориванию пор и нарушению функций мембранного материала.

Для снижения загрязняемости микропористых мембранных материалов, содержащих дисперсные наполнители, применяется модификация соединением полиамина, функционализированным силаном, который имеет алкоксисилановую группу [93]. Для повышения долговечности полимерных микропористых мембран, используемых в составе подкровельных и фасадных материалов, в их состав вводят антиоксиданты и УФ-стабилизаторы [96]. Данные функциональные добавки препятствуют протеканию процессов термоокислительной и фотохимической деструкции, характерной для полиолефинов, распространенных в производстве мембран данного типа.

При создании многофункциональных технических мембранных материалов актуально придание дополнительных теплоизоляционных свойств, огнестойкости, стойкости к развитию плесневых грибов.

В изобретении [66] для придания теплоотражающих свойств на микропористый мембранный материал наносят металлический слой из чистого алюминия или алюминиевого сплава. Для предотвращения коррозии металлический слой покрывают защитным полимерным покрытием с аморфным диоксидом кремния.

Авторами [74] получен теплоотражающий, водонепроницаемый, паропроницаемый мембранный материал с металлизированной открытой поверхностью. Металлизированный слой наносится методом вакуумного испарения, и состоит из алюминия, меди или серебра.

В работе [97] получен мембранный материал на основе этиленпропилендиенового каучука и смеси технического углерода, глины и терморасширяющегося графита. Предложенное решение позволяет получить

огнестойкий мембранный материал с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Для получения мембранных материалов, стойких к биохимической коррозии, в их состав вводят биоцидные добавки [98, 99]. Это предотвращает появление и развитие на поверхности мембран микроорганизмов, спор и плесени, что имеет важное значение при их использовании в подкровельном пространстве и фасадах зданий, позволяет продлить межремонтный срок службы строительных конструкций.

Комбинированные мембранные пленочные материалы могут быть получены на основе смеси гидрофильных и гидрофобных полимеров, а также чередованием слоев из пористой и непористой мембраны, например, при коагуляции гидрофобного полимера на гидрофильном полимерном слое, а также при использовании смеси.

В изобретении [100] для получения текстильного материала, обладающего селективной проницаемостью, используют ламинирование ткани мембранным материалом слоистой структуры. Слои представляют собой экспандированные фторполимерные материалы с открытыми порами, различие микроструктуры которых заключается в количестве открытых пор, их геометрии и размере. Ассиметричное расположение слоев с различной проницаемостью позволяет получать воздухопроницаемые материалы, устойчивые к загрязнениям органическими веществами. Комбинированные мембраны отличаются сложностью технологий их производства, повышенной стоимостью и невозможностью вторичной переработки, что обусловлено их гетерогенным составом.

Таким образом, можно сделать вывод, что для получения мембранных материалов, характеризующихся сравнительно невысокой стоимостью, хорошими показателями водоупорности и паропроницаемости, наиболее оправдано применение микропористых мембран по технологии одноосной ориентации (MEAUS). Данные материалы изготавливаются на основе экономически доступных полиолефинов и могут быть использованы в качестве функционального слоя в рулонных материалах, в том числе для гидроизоляции кровельных и фасадных

систем. При этом, для создания требуемой структуры слоя полимерного материала с микродефектами в виде сквозных пор без разрушения всего материала, необходимо обеспечить высокую степень регулирования процесса порообразования с исключением неконтролируемого роста дефектов структуры.

Поскольку микропористые мембраны подвержены механическим повреждениям, приводящим к снижению их изоляционных свойств, наиболее целесообразно использовать их в качестве внутреннего функционального слоя, защищенного с обеих сторон несущими и защитными слоями. Внешние несущие и защитные слои могут быть выполнены из нетканых волокнистых или перфорированных материалов, характеризующихся высокими физико-механическими характеристиками и отсутствием блокирования функции паропроницаемости.

Для получения мембран, стойких к атмосферным и биохимическим воздействиям в их состав необходимо введение компонентов, препятствующих термоокислительной деструкции, УФ-стабилизаторов и биоцидных добавок. Использование антипиренов позволяет получать мембраны, характеризующиеся повышенной огнестойкостью, что позволяет использовать их в составе пакета материалов в строительных конструкциях. Для придания мембранным материалам дополнительных теплоотражающих свойств перспективно применение металлических и металлосодержащих слоев, использование которых позволяет уменьшить толщину пакета теплоизоляционных материалов и повысить энергоэффективность зданий и сооружений.

1.4 Методы модификации и функционализации технических текстильных материалов и мембран

Теплоизоляционные материалы в вентилируемых фасадах и подкровельных системах в соответствии с СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» должны быть защищены от воздействия вентилируемого воздуха и влаги

гидроизоляционными паропроницаемыми материалами [101, 102]. С целью повышения энергоэффективности зданий для данных материалов актуально придание теплоотражающих свойств. В целях увеличения срока эксплуатации актуально придание также биостойкости к воздействию микроскопических грибов и ряда других специальных свойств [103].

Для создания пленочных и текстильных материалов, обладающих теплоотражающими свойствами, применяются различные подходы, среди которых распространение получили использование теплоотражающих частиц, а также слоев, преимущественно получаемых путем нанесения металлических и металлсодержащих покрытий [104–117].

В изобретении [104] мембранный материал, обладающий паропроницаемыми и водоупорными свойствами, содержит мембрану, на одну из сторон которой нанесен металлический слой осаждением из газовой фазы путем испарения и конденсации алюминия. Для этого алюминиевую проволоку нагревали в тигле в высоком вакууме 2×10^{-6} торр при температуре 1220°C , мембрану перемещали над тиглем со скоростью, обеспечивающей формирование покрытия на обращенной к тиглю стороне мембраны. Металлическое покрытие может иметь толщину от 4 до 120 нм и обеспечивает отражение ИК-излучения. Метод применим для мембран на основе вспененного политетрафторэтилена, обладающих достаточно высокой термостойкостью.

Авторами [105] предложено получение теплоотражающего материала на основе металлизированной полимерной пленки. Для защиты металлического слоя он ламинирован защитным слоем из полимерной пленки. Благодаря металлическому покрытию достигается отражение порядка 80 % потока теплового излучения, при этом данные материалы являются паронепроницаемыми.

В изобретении [106] теплоотражающий материал содержит наружный слой, выполненный из алюминиевой фольги, соединенный с внутренним полимерным пленочным или текстильным слоем. Материал обладает высокой теплоотражающей способностью и отражает до 95 % теплового потока. Алюминиевая фольга характеризуется низкой стойкостью к механическим

повреждениям, а материал рекомендован для использования в изделиях одноразового применения.

Авторами [107] предложен материал строительного назначения, на одной из сторон которого с образованием воздушного зазора закреплен теплоизолирующий слой, выполненный из металла или материала с металлическим покрытием. Количество теплоизолирующих слоев может быть более одного, а достигаемая эффективность по энергосбережению составляет не менее 50 %.

В изобретении [108] для получения теплоотражающего текстильного слоистого материала на внешнюю поверхность наносится металлическое покрытие из меди, латуни, нитрида титана или алюминия толщиной 30–250 нм. Материал обладает повышенной теплоотражающей способностью с коэффициентом отражения до 0,95.

Авторами [109] предложен теплоизоляционный материал, имеющий вспененный полимерный слой на основе полиэтилена, полипропилена или каучука, покрытый с одной или двух сторон теплоотражающим слоем. Данный слой представляет собой полированную алюминиевую фольгу или металлизированную полимерную пленку и обеспечивает отражение ИК-излучения, при этом приводит к повышению теплопроводных свойств материала.

В изобретении [110] описан материал, отражающий тепловое излучение, состоящий из волокнистого слоя и теплоотражающего слоя в виде металлизированной полимерной пленки. В качестве материала металлического покрытия рекомендовано использовать алюминий, хром, никель или другие металлы, обеспечивающие высокую отражающую способность. Для металлизации используются полимерные пленки на основе полиэтилентерефталата и полиимида. Теплоотражающий слой может быть размещен как с одной стороны волокнистого слоя, так и с обеих сторон.

В работе [111] описан теплоизоляционный строительный элемент, включающий теплоотражающий слой из металлизированной полипропиленовой пленки. Полезная модель относится к области строительства и может быть использована для повышения энергоэффективности малоэтажных сооружений.

Авторами [112] описан многослойный материал, имеющий в своем составе теплоотражающий слой из металлизированной перфорированной полимерной пленки. Изобретение относится к теплоизоляционным материалам и может быть использовано для защиты техники, а также в других отраслях производства.

В работе [113] авторами получен многослойный гибкий теплоизоляционный материал, содержащий волокнистые слои, кашированные с использованием адгезива алюминиевой фольгой. Толщина фольги составляет 35–55 мкм, что обусловлено тем, что фольга меньшей толщины обладает недостаточной прочностью, а при толщине более 55 мкм значительно снижается гибкость материала. Материал может быть использован для снижения теплопотерь путем отражения остаточного ИК-излучения в промышленности и теплоэнергетике.

В изобретении [114] для получения гибкого теплоотражающего материала на текстильный материал наносится термопластичный полимер и металлическое покрытие, например, алюминиевое, а в изобретении [115] подобный материал имеет фольгированное покрытие. Наличие металлических слоев на внутренней поверхности многослойных функциональных материалов обеспечивает высокую теплоотражающую способность, что позволяет использовать их для производства чехлов, тентов и в других технических целях.

Авторами [116] для получения материалов с теплоотражающими свойствами предложено наносить на их поверхность полимерную композицию, содержащую алюминиевую пасту. Покрытие формируется путем холодного отверждения, обеспечивает стойкость материалов к тепловому потоку до 29 кВт/м². Нанесение данной композиции на текстильный материал приводит к увеличению поверхностной плотности материала не более чем на 30 г/м².

В изобретении [117] представлено описание волокнистого материала, содержащего теплоотражающие слои, выполненные на основе растворов наполненного фторкаучука и теплоотражающего порошка металла. В качестве порошка металла предлагается использовать алюминий, содержание которого в покрытии может варьироваться. Представленный материал обладает коэффициентом ослабления ИК-излучения не менее 78 %.

Таким образом, для мембранных текстильных материалов, применяемых в качестве гидроизолирующего и паропроницаемого слоя в конструкциях кровель и фасадов, актуально придание теплоотражающих свойств за счет нанесения металлических и металлсодержащих покрытий. Интерес также представляет возможность придания ряда специфических свойств, таких как фунгицидные. На теплоотражающую способность материалов определяющее влияние оказывает материал покрытия и микрорельеф поверхности. При этом в производстве теплоотражающих многофункциональных, в том числе мембранных материалов, важное значение имеет нанесение покрытий с использованием методов, не приводящих к нарушению структуры и проницаемости материалов.

Перспективную группу методов нанесения металлических и металлсодержащих покрытий на поверхность материалов различного состава и структуры представляют вакуумные методы. Наиболее экономичным и технологически простым методом вакуумной металлизации является процесс термического испарения-конденсации [118, 119]. Метод вакуумного дугового напыления также получил распространение для нанесения функциональных металлсодержащих покрытий, в том числе из тугоплавких металлов [120–122]. Данные методы обеспечивают высокую скорость напыления, но их использование ограничено для материалов с низкой температурой плавления, в частности большинства многотоннажных синтетических волокнистых и пленочных материалов.

Метод магнетронного распыления успешно применяется для нанесения тонких металлических покрытий на полимерные материалы [123, 124]. Основными преимуществами метода являются высокая равномерность получаемых покрытий и возможность нанесения покрытий на материалы с низкой температурой плавления [125–127]. Данный метод позволяет наносить на полимерные материалы и изделия покрытия из алюминия, меди, титана, а также других металлов, их сплавов и соединений, таких как оксиды, нитриды и карбиды [128, 129].

В работе [130] для получения теплоотражающих металлсодержащих покрытий методом магнетронного распыления осуществляют подготовку

поверхности с помощью ионной очистки и последовательное осаждение адгезионного оксидного подслоя, теплоотражающего металлического покрытия и защитного прозрачного оксидного слоя.

Для металлизации материалов на основе полиолефинов методом магнетронного распыления применяются дополнительные методы подготовки поверхности для увеличения адгезии материала подложки к наносимому покрытию. Адгезия металлических покрытий зависит от топологии поверхности полиолефиновых материалов [131] и наличия на их поверхности полярных функциональных групп [132, 133].

Одним из методов повышения адгезионного взаимодействия между функциональным металлическим покрытием и полимерными волокнистыми и пленочными материалами является их предварительная плазменная модификация. Авторами работы [134] исследовано влияние предварительной обработки в плазме тлеющего разряда на адгезию полимерных пленок к алюминиевому покрытию. Предварительная модификация приводит к повышению свободной поверхностной энергии полимерных материалов и их адгезии к металлическому покрытию в 3–6 раз.

В работах [132, 133] используется обработка полимерных материалов в плазме высокочастотного (ВЧ) разряда пониженного давления, приводящая к повышению адгезии волокнистых и пленочных полимерных материалов к алюминиевым и медным покрытиям. Повышение адгезионного взаимодействия происходит за счет образования на поверхности полиолефиновых материалов полярных функциональных групп, взаимодействующих с металлом напыляемого покрытия с образованием металлоорганических соединений. Перспективным является применение многофункционального вакуумного оборудования, позволяющего последовательно проводить ВЧ плазменную модификацию поверхности и нанесение металлического покрытия в едином вакуумном цикле [134].

Таким образом, на сегодняшний день для повышения энергоэффективности зданий и строительных конструкций актуально использование мембранных

текстильных материалов с теплоотражающими свойствами. Придание данным материалам теплоотражающих свойств возможно путем нанесения на их поверхность металлических и металлсодержащих слоев. Для нанесения тонких металлических покрытий, не нарушающих структуру полимерных материалов, перспективно использование метода магнетронного распыления с подготовкой поверхности для увеличения адгезии материала подложки к наносимому покрытию с помощью плазмы ВЧ разряда пониженного давления.

1.5 Задачи диссертации

Проведенный обзор литературных источников продемонстрировал высокую активность в России и за рубежом в области исследований и разработки мембранных технических текстильных материалов с теплоотражающими свойствами, что обусловлено высоким спросом на данную продукцию при отсутствии на рынке достаточного количества аналогов. Данные материалы применимы в строительстве зданий и сооружений, в частности, для кровельных систем и фасадов в качестве паропроницаемого, водо- и ветрозащитного, теплоотражающего слоя.

На сегодняшний день в России наблюдается потребность в собственном производстве технических текстильных материалов с мембранными и теплоотражающими свойствами, о чем свидетельствуют следующие факты:

- отсутствие на российском рынке технических текстильных материалов, сочетающих мембранные и теплоотражающие свойства;
- активное внедрение в России современных технологий строительства с применением технических текстильных материалов;
- подготовка проектов государственных стандартов в области технических текстильных материалов для строительства;
- применение технических текстильных материалов, сочетающих мембранные и теплоотражающие свойства, позволит повысить

энергоэффективность зданий и сооружений с одновременным снижением материалоемкости.

Диссертационная работа направлена на решение актуальной задачи разработки мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами за счет применения паропроницаемых гидроизоляционных полимерных мембран и методов вакуумной металлизации.

Целью работы является разработка мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами, обладающего высокими эксплуатационными характеристиками.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Анализ областей применения, методов получения ламинированных текстильных материалов, методов создания и модификации паропроницаемых и теплоотражающих текстильных материалов.

2. Выбор объектов, методов исследования и оборудования для получения паропроницаемых полимерных мембран, методов металлизации и ламинирования текстильных материалов.

3. Экспериментальные и теоретические исследования влияния технологических параметров производства паропроницаемой полимерной мембраны, методов металлизации и особенностей ламинирования на эксплуатационные свойства мембранных технических текстильных материалов.

4. Разработка технологических рекомендаций по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами, включающих методику получения полимерной мембраны с улучшенными эксплуатационными свойствами, параметры нанесения теплоотражающего покрытия и особенности ламинирования мембраны с неткаными полотнами.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ МЕМБРАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА С ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

В главе приведены выбор и описание объектов исследования, описано технологическое оборудование для получения полимерной мембраны для ламинирования технических текстильных материалов, представлено экспериментальное оборудование для плазменной модификации и вакуумной металлизации. Описаны методы исследований и испытаний мембранных материалов. Представлены методы математической обработки экспериментальных данных и математического моделирования.

2.1 Выбор объектов исследования

Для создания мембранного технического текстильного материала предложено разработать гидроизоляционную паропроницаемую пленку на основе полиолефинов. Процесс получения паропроницаемой гидроизоляционной пленки включал получение неориентированной пленки-полуфабриката методом выдувной экструзии из расплава на основе гранулированных полиолефиновых (ПП-ПЭ) компаундов, наполненных дисперсными частицами CaCO_3 . В качестве основных компонентов возможно использование сырья зарубежного и отечественного производства, от таких производителей как GEMA ELEKTRO PLASTIK (Турция) [136]; FI PLAST COSSA POLIMERI GROUP (Италия) [137]; A. Schulman GmbH (Германия) [138]; ООО «АПО АЛЕКО-ПОЛИМЕРЫ» (г. Ростов-на-Дону) [139].

Основные показатели свойств полимерных компаундов с дисперсными наполнителем, применяемых для наработки пленки полуфабриката, на основе спецификаций производителей представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные показатели свойств полимерных компаундов с дисперсными наполнителем CaCO₃

Наименование показателя	Величина показателя	Метод определения и контроля
Предел текучести расплава, г/10 мин	2,0–3,0	ISO 1133; ASTM D 1238
Плотность, г/см ³	1,51–1,55	ISO 1183; ASTM D 792
Содержание CaCO ₃ , %	60–75	ISO 3451; ASTM D 5630
Заявляемый производителем размер частиц CaCO ₃ , мкм	0,6–3,0	ASTM D 3360
Способ переработки	Выдувная экструзия	-

Методом выдувной экструзии из расплава на основе дисперсно-наполненного компаунда получали соэкструзионную непористую пленку-полуфабрикат с соотношением толщин слоев 20/60/20. Использовали промышленную установку выдувной экструзии VAREX (VARiable EXtrusion, Windmoller & Holscher GmbH, Германия) [140], расположенную на базе ООО «ДАНАФЛЕКС-НАНО», г. Казань. Основные характеристики пленки-полуфабриката представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Основные характеристики соэкструзионной непористой пленки-полуфабриката с дисперсным наполнителем

Показатель свойств	Значение
Толщина пленки, мкм	58 ± 5 %
Ширина пленки, мм	600
Поверхностная плотность, г/м ²	80

В качестве несущего и защитного слоев мембранного технического текстильного материала использовали нетканые полотна производства АО

«Полиматиз», ОЭЗ «Алабуга». В качестве прототипа мембранного слоя использовалась полипропиленовая мембрана производства ООО «ДАНАФЛЕКС-НАНО». Основные характеристики нетканых полотен представлены в таблице 2.3, полипропиленовой мембраны в таблице 2.4.

Таблица 2.3 – Характеристики ПП нетканых материалов

Наименование характеристики	Значение	
	Марка 1	Марка 2
Марка	Марка 1	Марка 2
Производитель	АО «Полиматиз», ОЭЗ «Алабуга»	АО «Полиматиз», ОЭЗ «Алабуга»
Тип нетканого материала	спанбонд/ мелтблаун/спанбонд	спанбонд/ мелтблаун/спанбонд
Поверхностная плотность, г/м ²	17 ± 2 (11/3/11)	70 ± 2
Ширина полотна, мм	1600	1600

Таблица 2.4 – Характеристики ПП мембраны

Наименование характеристики	Значение
Производитель	ООО «ДАНАФЛЕКС-НАНО»
Полимер мембраны	Полипропилен
Поверхностная плотность, г/м ²	20 ± 1
Ширина полотна, мм	1515

2.2 Опытно-промышленное оборудование для получения паропроницаемых полимерных мембран

Для формирования пористой структуры мембраны соэкструзионную непористую пленку-полуфабрикат подвергали одноосному растяжению в продольном направлении по технологии MDO на пилотной ориентационной линии Dr. Collin MDO-II 600 (COLLIN Lab & Pilot Solutions GmbH, Германия) научно-технического центра (НТЦ) ООО «ДАНАФЛЕКС-НАНО», г. Казань [141].

Пилотная линия состоит из 3 основных агрегатов: модуль растяжения пленки, терморегуляционный модуль, намотчик (рисунок 2.1).

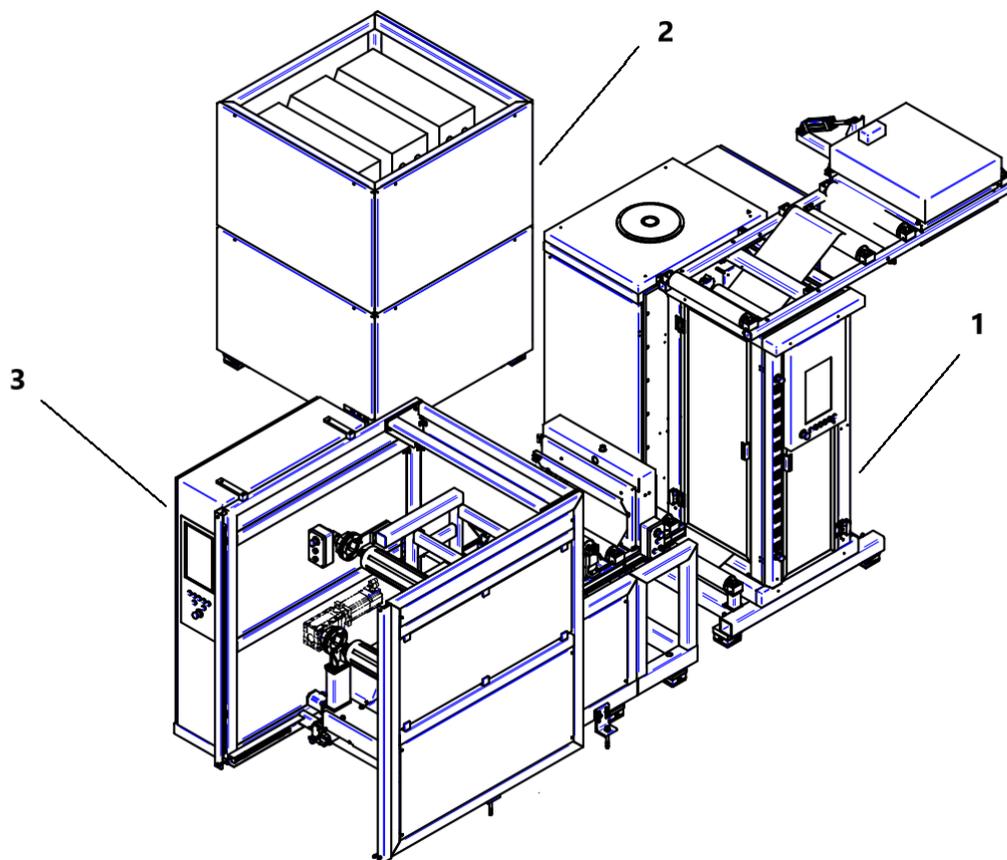


Рисунок 2.1 – Внешний вид пилотной ориентационной линии MDO-II 600: 1 – модуль растяжения пленки; 2 – терморегуляционный модуль; 3 – намотчик

Подача (размотка) полотна пленки-полуфабриката осуществляется размотчиком с пневматически-фиксирующим валом для шпули с внутренним диаметром 76 мм. Размотчик оснащен системой поддержания постоянного натяжения полотна. Материал поступает на ИК-нагреватель, который поддерживает температурный профиль полотна, аналогичный технологии MEAUS до узла MDO. Ориентация пленочного материала происходит непосредственно в модуле растяжения, оснащенном валами различного назначения. Данный модуль осуществляет перемотку и ориентацию полимерного полотна с заданными значениями линейной скорости, натяжения и температурного профиля. Скорость движения валов поддерживается цепными механизмами серводвигателей для каждой группы валов. Терморегулирование валов модуля растяжения в заданном

диапазоне температур осуществляется блоком термостатирования, в качестве теплоносителя используется техническая вода. Намотка ориентированной пористой пленки в рулон осуществляется намотчиком, а также контактными салазками для равномерного распределения полотна на ролике. Натяжение между узлами поддерживается системой валов.

Условия формирования, фиксации и стабилизации ориентированной структуры пористого полотна определяются этапами и режимами технологического процесса производства. Пленка ориентируется системой валов модуля растяжения (MDO). Схема расположения валов модуля MDO представлена на рисунке 2.2.

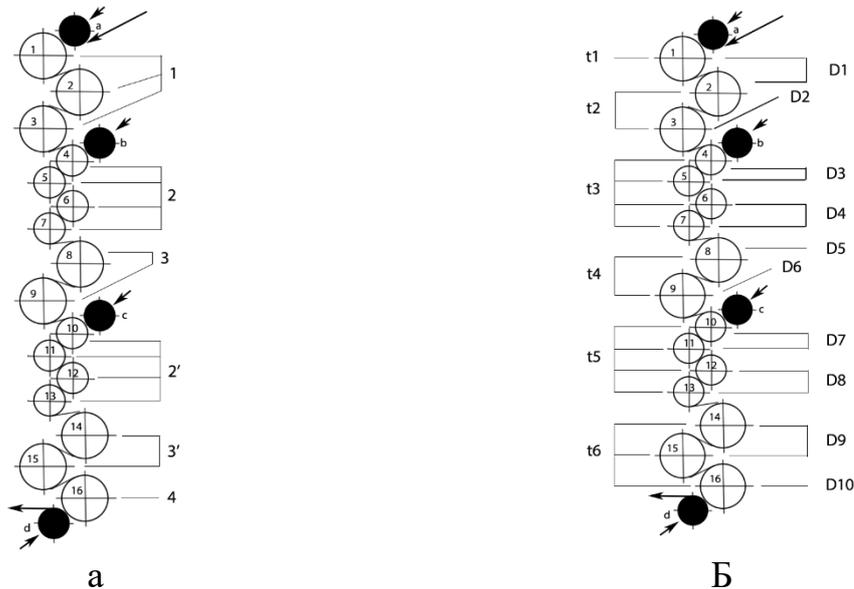


Рисунок 2.2 – Схема расположения валов модуля MDO: а – схема технологических секций: 1 – секция преднагрева; 2, 2' – секции растяжения; 3, 3' – секции термостабилизации (annealing), 4 – секция охлаждения; б – схема температурных профилей (t_1 – t_6) и скоростей вращения валов (D_1 – D_{10}); 1–16 – металлические нагреваемые валы; а–д – обрезиненные прижимные валы

Валы модуля MDO сгруппированы по функциональному назначению в секции или зоны (рисунок 2.2а), отличаются по температуре и скорости вращения (рисунок 2.2б). Секция преднагрева (поз. 1, рисунок 2.2а) расположена непосредственно после ИК-нагревателя и включает валы 1–3 диаметром 144 мм,

независимые между собой по температуре и скорости вращения, и один прорезиненный прижимной пневматический вал.

Секции растяжения (поз. 2 и 2', рисунок 2.2а) представлены двумя идентичными группами валов (4–7 и 10–13) диаметром 120 мм. Каждая секция включает две пары валов с общим температурным контуром и двумя независимыми цепными двигателями для создания разности скорости вращения между валами каждой тянущей пары.

Секции термостабилизации (поз. 3 и 3', рисунок 2.2а) представлена двумя парами нагреваемых валов (8, 9 и 14, 15) диаметром 144 мм с одним контуром температуры и независимыми приводами.

Секция охлаждения представлена одним охлаждающим валом (16) диаметром 144 мм и прижимным пневматическим обрешиненным валом. Терморегуляция и скорость вращения охлаждающего вала регулируются независимо от предыдущей секции MDO.

Намотка ориентированного полотна осуществляется на шпулю внутренним диаметром 152 мм, пневматически зафиксированную на намоточном валу через зазор прижимной каретки намотчика (на рисунке 2.2 не указаны). Контроль технологических параметров линии MDO производится с помощью портативной сенсорной консоли, расположенной на фронтальной стороне MDO-II 600.

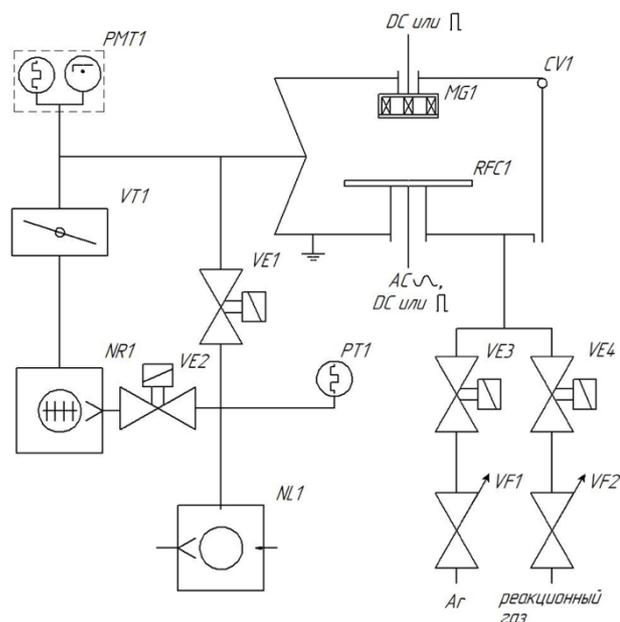
2.3 Экспериментальное оборудование для плазменной модификации и вакуумной металлизации мембранного технического текстильного материала

Обработку образцов мембранных технических текстильных материалов в плазме ВЧЕ разряда пониженного давления и нанесение металлических покрытий в едином вакуумном цикле проводили в многофункциональной модульной вакуумной установке PlasmaModular (производства ООО «ПИ ВИ ЭС», г. Казань)

ресурсного центра ООО «ФЕРРИ ВАТТ», г. Казань [142]. Внешний вид и функциональная схема вакуумной установки представлены на рисунке 2.3.



а



б

Рисунок 2.3 – Многофункциональная модульная вакуумная установка PlasmaModular: а – внешний вид установки; б – функциональная схема установки: CV1 – рабочая вакуумная камера; VT1 – высоковакуумный затвор; NR1 – турбомолекулярный вакуумный насос; NL1 – форвакуумный насос; PMT1, PT1 – вакуумные датчики; VE1 – VE4 – электромагнитные клапаны; VF1, VF2 – регуляторы расхода газа; Mg1 – магнетрон; RFC1 – активный ВЧ-электрод; DC – постоянный ток; AC – переменный ток

Многофункциональная модульная вакуумная установка PlasmaModular включает в себя рабочую вакуумную камеру, системы вакуумной откачки, подачи рабочих газов, водяного охлаждения и управления с блоками питания. Нанесение металлических покрытий методом магнетронного распыления осуществляется с помощью круглого планарного магнетрона с электропитанием от униполярного источника APPEL-M-10PDC-1000-2.

Для подачи рабочих газов предусмотрено две линии, по одной из которых осуществляется подача реакционных газов для предварительной ВЧЕ плазменной

модификации, а по второй – подача рабочего инертного газа – аргона в процессе магнетронного распыления.

Основные технические характеристики многофункциональной модульной вакуумной установки PlasmaModular представлены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Основные технические характеристики многофункциональной модульной вакуумной установки PlasmaModular

Характеристика, единицы измерения	Значение
Предельное остаточное давление, Па	7×10^{-4}
Рабочее давление процесса ВЧЕ плазменной модификации, Па	0,8–45,0
Рабочее давление процесса магнетронного распыления, Па	0,1–1,0
Диаметр мишени магнетрона, мм	80
Номинальная мощность, кВт	20
Потребляемая мощность, кВт	7
Габаритные размеры вакуумной камеры, Д×Ш×В, мм	400×400×250
Габаритные размеры установки, Д×Ш×В, мм	500×1200×1500

Модульная конструкция установки PlasmaModular позволяет проводить ВЧЕ плазменную обработку и нанесение металлического покрытия методом магнетронного распыления в едином вакуумном цикле.

2.4 Методы исследований и испытаний мембранного технического текстильного материала

Экспериментальные исследования и испытания образцов мембранных технических текстильных материалов проводили с применением стандартных и специальных методов. Пробы исследуемых образцов перед испытаниями кондиционировали в течение 24 ч при температуре 20 ± 3 °С и относительной влажности воздуха 65 ± 5 % в соответствии с ГОСТ 10681-75 [143].

Поверхностную плотность ($г/м^2$) мембранных технических текстильных материалов определяли в соответствии с ГОСТ 3811-72 [144].

Прочность при растяжении в продольном и поперечном направлении полимерных мембран определяли по ASTM D882 [145] на испытательной машине Autograph AG-500N Xplus750 (10kN), Shimadzu (Япония) [146].

Разрывную нагрузку (Н) и относительное разрывное удлинение (%) мембранных технических текстильных материалов определяли по ГОСТ Р 53226-2008 [147] на испытательной машине Autograph AG-500N Xplus750 (10kN), Shimadzu (Япония).

Для определения *коэффициента термической усадки (%)* полимерных мембран использовали ГОСТ Р 54106-2010 [148] и ASTM D2732-14 [149]. Коэффициент термической усадки (КТУ) полимерной мембраны рассчитывали в процентах как отношение линейных размеров образца (вдоль или поперек полотна) после термического воздействия при 80 °С в течение 30 с к исходным линейным размерам [149]:

$$\text{КТУ} = \frac{l_0 - l_t}{l_0} \times 100\%, \quad (2.1)$$

где l_0 – исходные линейные размеры образца; l_t – линейные размеры образца после термического воздействия.

Паропроницаемость ($г/м^2 \times 24ч$) мембранных технических текстильных материалов определяли на приборе PERMATRAN-W® MODEL 101 К [150] в соответствии с ASTM D6701-2021 [151].

Водоупорность (мм вод.ст.) мембранных текстильных материалов и полимерных мембран определяли по ГОСТ ISO 811-2021 [152] на приборе FX3000 HydroTester IV (Швейцария) [153].

Определение *стойкости к истиранию* металлического покрытия производилось на приборе Rub Tester 2000 SUTHERLAND (Danilee Co., США) по ГОСТ Р 51552-99 [154].

Для определения *коэффициента теплоотражения* мембранных технических текстильных материалов использовали тепловизор марки Testo 875-2i

(Testo SE & Co. KGaA, Германия) [155], расчет проводили по ГОСТ Р 56734–2015 [156].

Исследование *газопроницаемости по воздуху (л/мин) и распределение сквозных пор по размеру* для полимерных мембран и мембранных текстильных материалов проводили методом газожидкостной порометрии на приборе POROLUX100 (IB-FT GmbH, Германия) [157].

Экспериментальные исследования структуры образцов мембранных технических текстильных материалов осуществляли с использованием аналитических методов исследования.

Для исследования поверхности и срезов многослойных мембранных технических текстильных материалов использовали *метод конфокальной лазерной сканирующей микроскопии в отраженном свете* (микроскоп Olympus OLS LEXT OLS-4100, Olympus, Япония) [158].

Методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) исследовали микроструктуру поверхности и поперечных срезов образцов полимерных мембран (микроскоп Merlin, Carl Zeiss, Германия) [159].

Объемную пористую структуру образцов полимерных мембран исследовали методом *микротомографии* на рентгеновском микротомографе GE v|tome|xm300 (Waygate Technologies, США) [160].

Исследование молекулярного строения образцов полимерных мембран проводили *методом инфракрасной (ИК) спектроскопии* на ИК-Фурье спектрометре Vertex 70 совмещенном с ИК микроскопом HYPERION 2000 (Bruker, Германия) [161].

Для анализа изменений надмолекулярной упорядоченности мембранных текстильных материалов использовали *метод рентгеноструктурного анализа (РСА)*. Для получения дифрактограмм использован рентгеновский автоматический порошковый дифрактометр D2 Phaser (Bruker, Германия) [162], для обработки дифракционных спектров применяли программный пакет DIFFRAC.SUITE [163].

Исследование термических характеристик мембранных материалов проводили методом *дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК)* на

приборе DSC 204 F1 Phoenix (NETZSCH, Германия) [164]. В качестве определяемых физических величин выбраны температура и удельная теплота плавления, а также температура стеклования, которая может использоваться для характеристики структурных изменений полимерных материалов.

2.5 Методы математического моделирования и статистической обработки результатов экспериментальных исследований

Для статистической обработки результатов прямых измерений с многократными наблюдениями использовали стандартные методы обработки результатов наблюдений в соответствии с ГОСТ 8.207-76 [165].

Для моделирования процесса одноосной ориентации полимерной мембраны для мембранного технического текстильного материала применяли метод молекулярной динамики. Моделирование проводили с использованием программного пакета LAMMPS [166], для визуализации результатов численных расчетов использовали программное обеспечение Atomify [167] и VMD [168].

В методе молекулярной динамики состояние моделируемой системы в определенный момент времени (t) описывается положением (r) и скоростью (s) частиц (N):

$$r_i(t) = \{x_i(t), y_i(t), z_i(t)\}, \quad (2.2)$$

$$S_i(t) = \{u_i(t), v_i(t), w_i(t)\}, \quad (2.3)$$

где x, y, z – координаты частиц; u, v, w – скорости частиц; $i = 1, \dots, N$.

Для описания изменения взаимного расположения частиц моделируемой системы используются системы классических уравнений движения Ньютона:

$$m_i \frac{dv_i}{dt} = F_i(r_i, v_i, t), \quad (2.4)$$

$$\frac{dr_i}{dt} = v_i, \quad (2.5)$$

где m_i – масса i -ой частицы.

Для описания межчастичного взаимодействия используются зависимости потенциальной энергии системы от координат всех частиц системы:

$$U(r_i, \dots, r_N) = \sum_{i=1}^N U_1(r_i) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N U_2(r_i, r_j) + \frac{1}{6} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N U_3(r_i, r_j, r_k) + \dots, \quad (2.6)$$

где U_1 – потенциал, учитывающий внешнее поле или граничные условия, U_2 – потенциал, учитывающий парное взаимодействие между частицами, U_3 – потенциал, учитывающий межчастичное взаимодействие двух частиц в присутствии третьей и т.д.

В результате интегрирования уравнений движения в процессе моделирования происходит генерация траекторий частиц моделируемой системы. Использование методов молекулярной динамики для моделирования полимерных систем позволяет получить информацию о процессах, происходящих на атомно-молекулярном уровне.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕМБРАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА С ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

В главе представлены результаты разработки мембранного технического текстильного материала, обладающего теплоотражающими свойствами. Для ламинирования текстильного материала экспериментально получена паропроницаемая водонепроницаемая полимерная мембрана. Предложена методика формирования многослойного ламината. Исследовано влияние металлизации на теплоотражающие свойства мембранного технического текстильного материала. Проведен комплекс исследований и испытаний свойств образцов мембранных ламинатов с теплоотражающими свойствами. Экспериментально изучено влияние структуры на комплекс свойств мембранных текстильных материалов с теплоотражающим покрытием. Результаты исследований, представленные в главе, опубликованы в работах [169–182].

3.1 Разработка паропроницаемой гидроизоляционной мембраны для мембранного технического текстильного материала

Для получения мембранных текстильных материалов применяются различные технологии и методы производства (п. 1.2). Наиболее широко распространены многослойные текстильные материалы, содержащие полимерные мембраны с контролируемой паропроницаемостью. Паропроницаемые полимерные мембраны производят по технологии MDO из компаундов на основе полиолефинов с дисперсным неорганическим наполнителем, например, карбонатом кальция (п. 1.3, п. 2.1). При этом технологические параметры MDO и рецептура полимерного компаунда определяют функциональные и эксплуатационные характеристики получаемых мембран.

На базе НТЦ компании ООО «ДАНАФЛЕКС-НАНО» (г. Казань) с помощью пилотной ориентационной линии MDO-II 600 (Dr. Collin, Германия) в опытно-промышленных условиях из соэкструзионной непористой пленки-полуфабриката получены образцы полимерных мембран.

Регулирование технологических параметров процесса MDO осуществляли в целях достижения наибольших значений паропроницаемости мембраны (5 000–10 000 г/м²×24 ч) при коэффициенте термической усадки полотна в продольном направлении не более 8 %. Поверхностная плотность ориентированной пленки должна составлять 20 ± 1 г/м². В качестве регулируемых технологических параметров выбраны температурные профили валов преднагрева – t1 и t2 и тянущей пары первой секции растяжения – t3, валы 1–3 и 4–7, соответственно (см. схему рисунок 2.2). Остальные параметры процесса MDO – температурные профили и скорости вращения валов приняты постоянными (таблица 3.1)

Таблица 3.1 – Параметры процесса MDO (согласно схеме – рисунок 2.2)

Секция MDO	Номера валов	Параметр процесса			
		Температурный профиль валов, °С		Линейная скорость перемещения пленки, м/мин	
		Обозначение	Значение	Обозначение	Значение
Секция преднагрева (секция 1)	1	t1	варьируется	D1	4,90
	2	t2	варьируется		
	3				
Первая секция растяжения (секция 2)	4, 5	t3	варьируется	D3	5,13
	6, 7			D4	25,64
Первая секция термо-стабилизации (секция 3)	8	t4	106	D5	23,30
	9			D6	22,57
Вторая секция растяжения (секция 2')	10, 11	t5	65	D7	22,58
	12, 13			D8	22,59
Вторая секция термо-стабилизации (секция 3')	14, 15	t6	30	D9	22,61
Секция охлаждения (секция 4)	16	t6	30	D9	22,61

С целью определения технологических параметров MDO, обеспечивающих максимальный коэффициент вытяжки пленки с отсутствием обрыва на тянущей паре при скорости размотки полотна не менее 5 м/мин, получены экспериментальные образцы мембран при варьировании температурных профилей валов преднагрева и тянущей пары первой секции растяжения (таблица 3.2). Опытным путем установлено, что при температурах секции преднагрева ниже 75–85 °С и первой секции растяжения ниже 85–90 °С наблюдается механическое разрушение пленки, поскольку данные температурные профили не обеспечивают достаточной для вытяжки пластификации пленки-полуфабриката.

Таблица 3.2 – Перечень экспериментальных образцов мембран, полученных при варьировании значений параметров процесса MDO

Образец	Температура валов, °С		
	Секция преднагрева (секция 1)		Первая секция растяжения (секция 2)
	t1	t2	t3
Образец №1	75	80	85
Образец №2	78	83	88
Образец №3	80	85	90
Образец №4	83	88	93
Образец №5	86	91	96
Образец №6	92	97	102

Определено влияние технологических параметров MDO (таблица 3.2) на поверхностную плотность и коэффициенты термической усадки (КТУ) в продольном (КТУ_{MD}) и поперечном (КТУ_{TD}) направлении полимерных мембран (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Влияние технологических параметров MDO на поверхностную плотность и коэффициенты термической усадки полимерных мембран

Образец	Поверхностная плотность, г/м ²	КТУ _{MD} , %	КТУ _{TD} , %
Образец №1	19,24	8	0
Образец №2	19,70	8	0
Образец №3	19,35	8	0
Образец №4	19,00	7	0
Образец №5	19,00	6	0
Образец №6	19,40	5	0

Целевая поверхностная плотность сформированной паропроницаемой мембраны составляет 19–21 г/м² (таблица 2.4). Полученные экспериментальные образцы по показателям поверхностной плотности соответствуют техническим требованиям к подобной продукции. Результаты, представленные в таблице 3.3, свидетельствуют о том, что повышение температуры тянущей пары в пределах 85–102 °С не приводит к значительным изменениям поверхностной плотности исследуемых образцов. Разброс значений поверхностной плотности связан с разнотолщинностью пленки-полуфабриката в процессе выдувной экструзии в пределах 3–4 %.

При температурах секции преднагрева 75–85 °С и первой секции растяжения 85–90 °С коэффициент термической усадки ориентированной мембраны составляет максимальное значение – 8 %, что связано с накоплением напряжений в структуре. При температурах секции преднагрева в пределах 83–97 °С и первой секции растяжения – 93–102 °С значения коэффициента термической усадки в продольном направлении снижаются с увеличением температуры тянущей пары MDO, что определяется терморелаксацией структуры при повышении температуры в процессе вытяжки.

Для оценки влияния профиля температуры секции преднагрева и первой секции растяжения на функциональные и эксплуатационные свойства, получаемых полимерных мембран, определены значения показателей паропроницаемости, газопроницаемости по воздуху, водоупорности, а также прочности на разрыв в

продольном и поперечном направлениях. Полученные результаты представлены на рисунках 3.1–3.5.

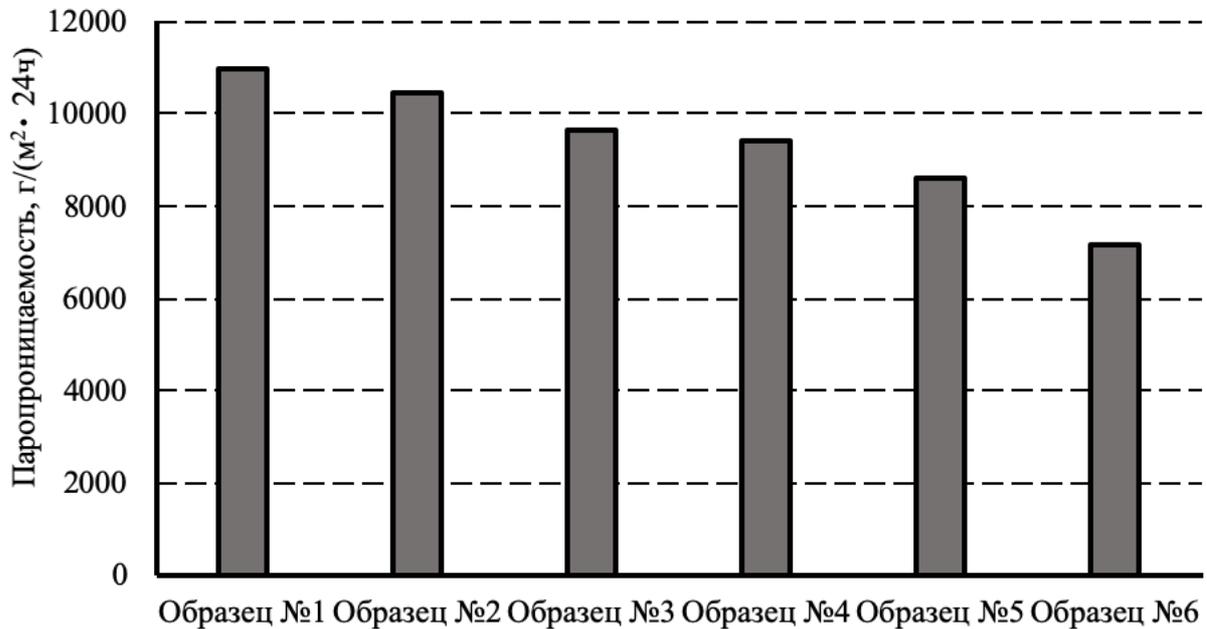


Рисунок 3.1 – Влияние параметров процесса MDO на паропроницаемость полимерных мембран

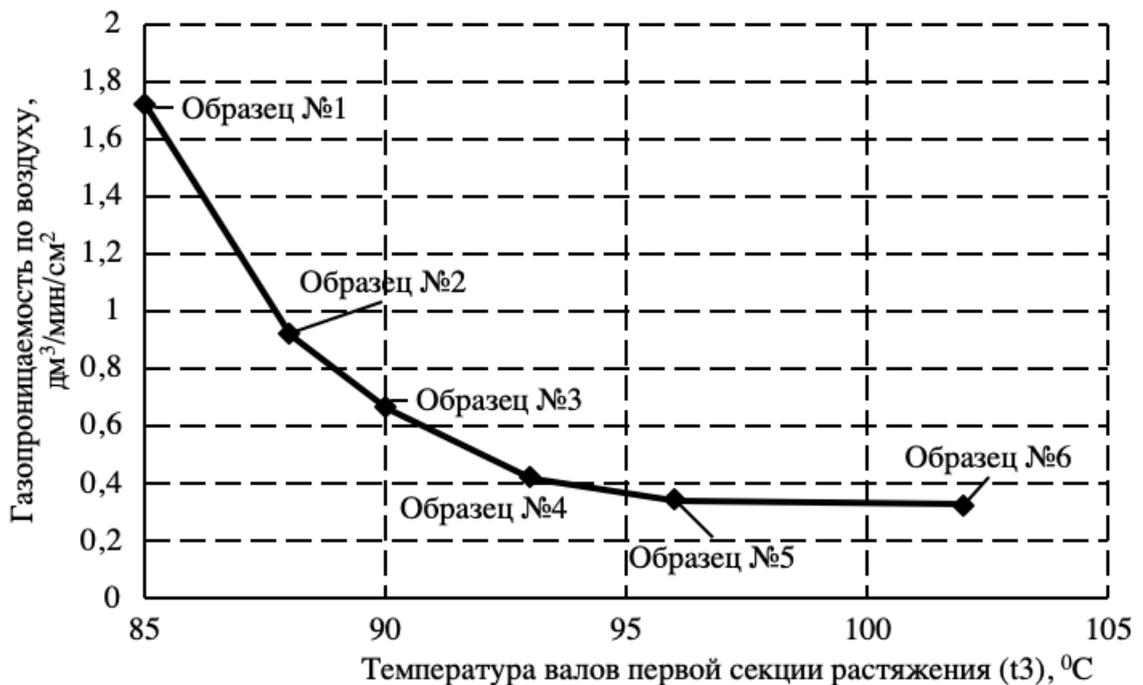


Рисунок 3.2 – Влияние температуры валов первой секции растяжение на газопроницаемость по воздуху полимерных мембран при давлении 5 бар

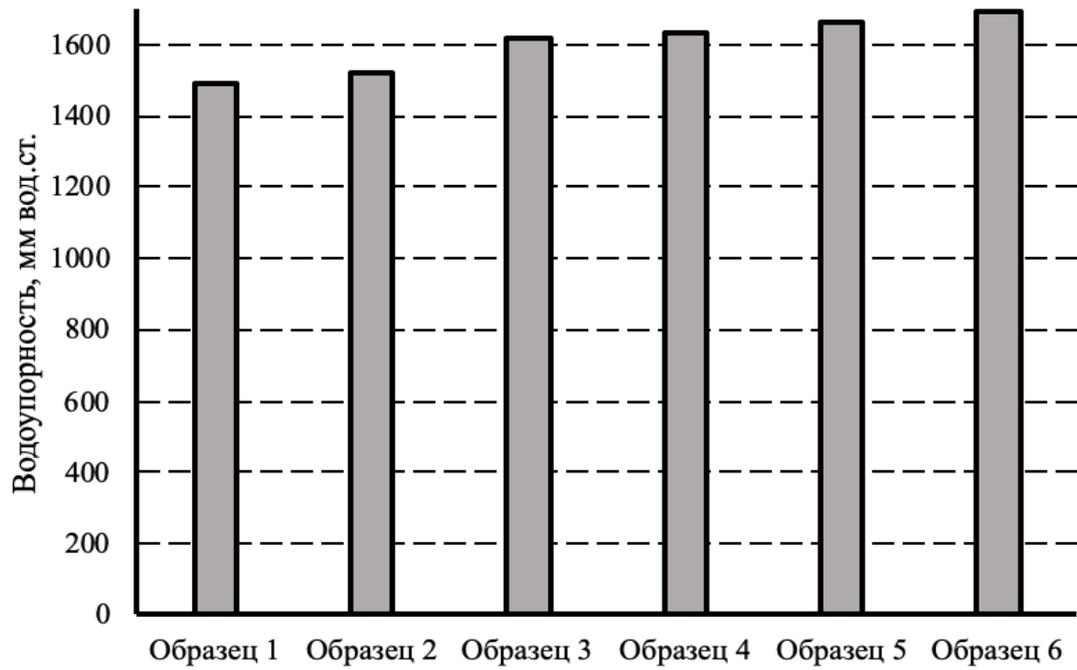


Рисунок 3.3 – Влияние параметров процесса MDO на водоупорность полимерных мембран

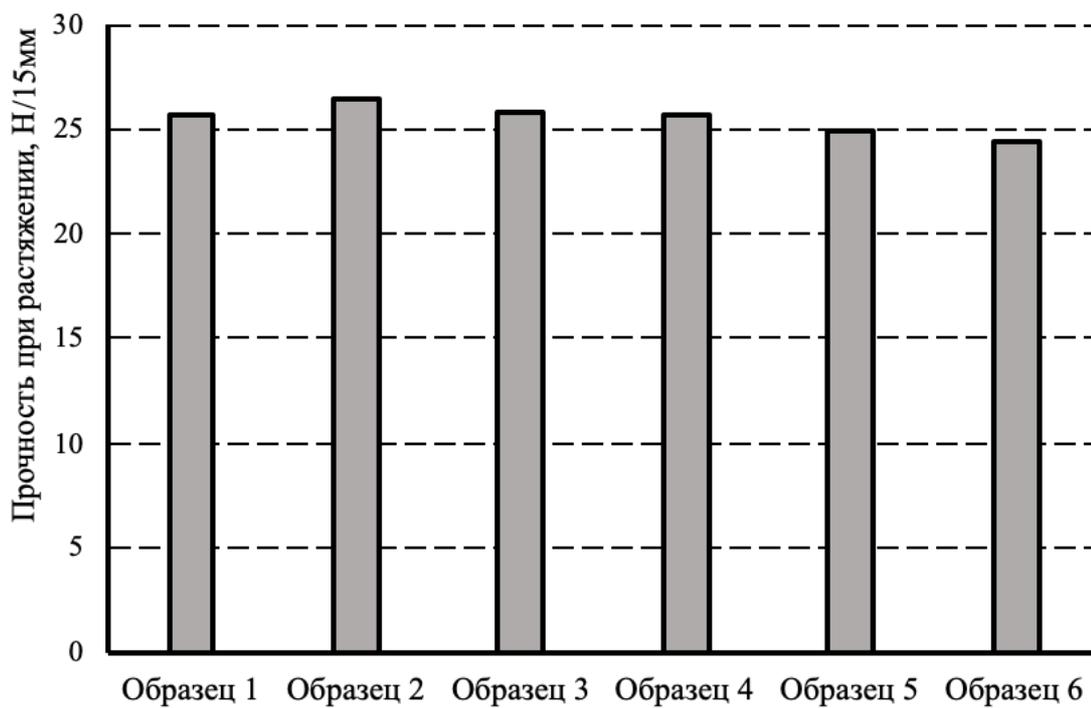


Рисунок 3.4 – Влияние параметров процесса MDO на предел прочности полимерных мембран при растяжении в продольном направлении

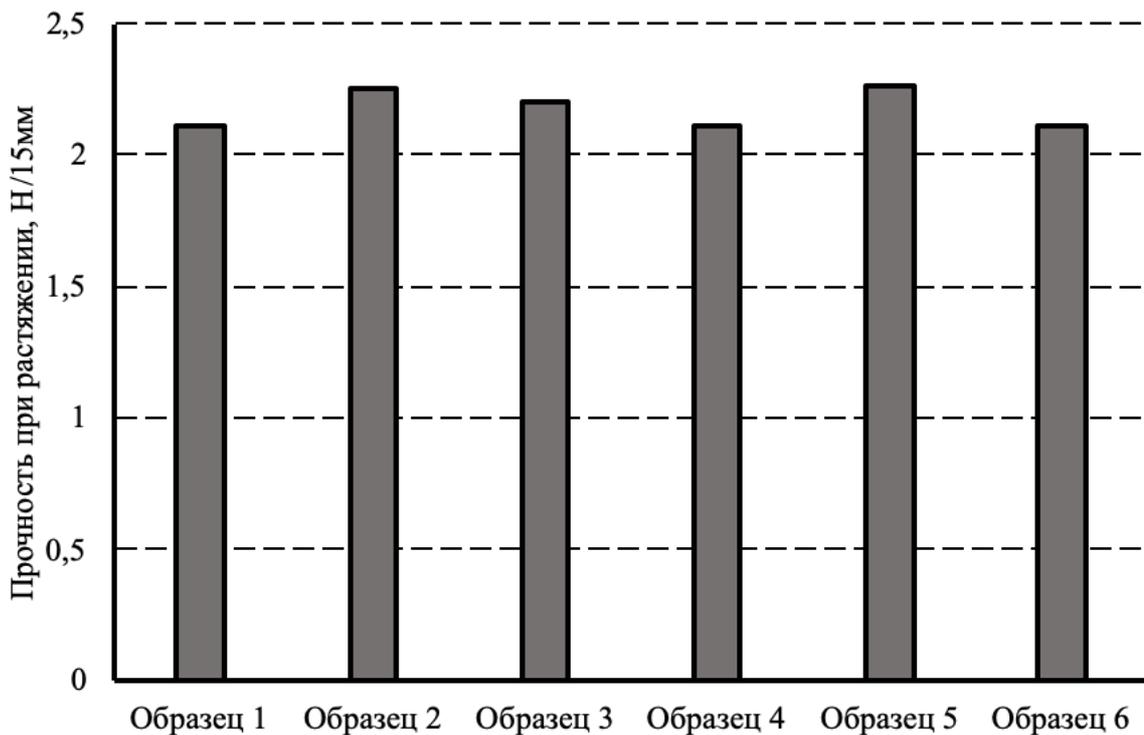


Рисунок 3.5 – Влияние параметров процесса MDO на предел прочности полимерных мембран при растяжении в поперечном направлении

Результаты оценки свойств полимерных мембран позволяют сделать вывод, что наибольшей паро- и газопроницаемостью по воздуху характеризуются образцы, полученные при температуре валов первой секции растяжения (t_3) 85 °С (образец №1, рисунки 3.1, 3.2). При этом для всех исследуемых образцов полимерных мембран характерна водоупорность свыше 1200 мм вод.ст. (рисунок 3.3).

Как видно из результатов, представленных на рисунках 3.4 и 3.5, процесс одноосной ориентации определяет анизотропию механических свойств мембран, их прочность в продольном направлении на порядок выше, чем в поперечном. При повышении температуры ориентации наблюдается незначительное снижение прочности при растяжении полимерных мембран в продольном направлении. Для образцов, обладающих наибольшей паро- и газопроницаемостью (образец №1), прочность на разрыв в продольном направлении составляет 25,68 Н/15 мм, в поперечном направлении – 2,11 Н/15 мм (рисунки 3.4, 3.5).

Таким образом, на основе комплекса проведенных исследований установлено, что температура валов первой секции растяжения технологического процесса MDO, оказывает существенное влияние на функциональные и эксплуатационные свойства получаемых полимерных мембран. Определены технологические параметры MDO, позволяющие получать полимерные мембраны, обладающие высокими показателями паропроницаемости и прочностными характеристиками. На основании полученных результатов для дальнейших исследований наибольший интерес представляет полимерная мембрана, для получения которой использованы следующие параметры MDO: температура вытяжки 85 °С, коэффициент вытяжки 5,5 (образец №1).

Для оценки влияния одноосной ориентации на изменение структуры исследуемых полимерных мембран использованы методы рентгеноструктурного анализа (РСА), дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК), ИК-Фурье спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Методом РСА исследованы изменения упорядоченности структуры мембраны при ориентации в процессе MDO. Результаты РСА неориентированной пленки показали присутствие фаз полимера и неорганического наполнителя (рисунок 3.6). Поиск по библиотеке (JCPDS) показал наличие в образце изотактического полипропилена (JCPDS 00-059-1501), полиэтилена высокой плотности (JCPDS 00-060-0984), кальцита (JCPDS 01-089-1304) и сопутствующих компонентов природного мела, таких как доломит (JCPDS 01-071-1662), кварц (JCPDS 00-001-0662), мусковит (JCPDS 00-006-0263).

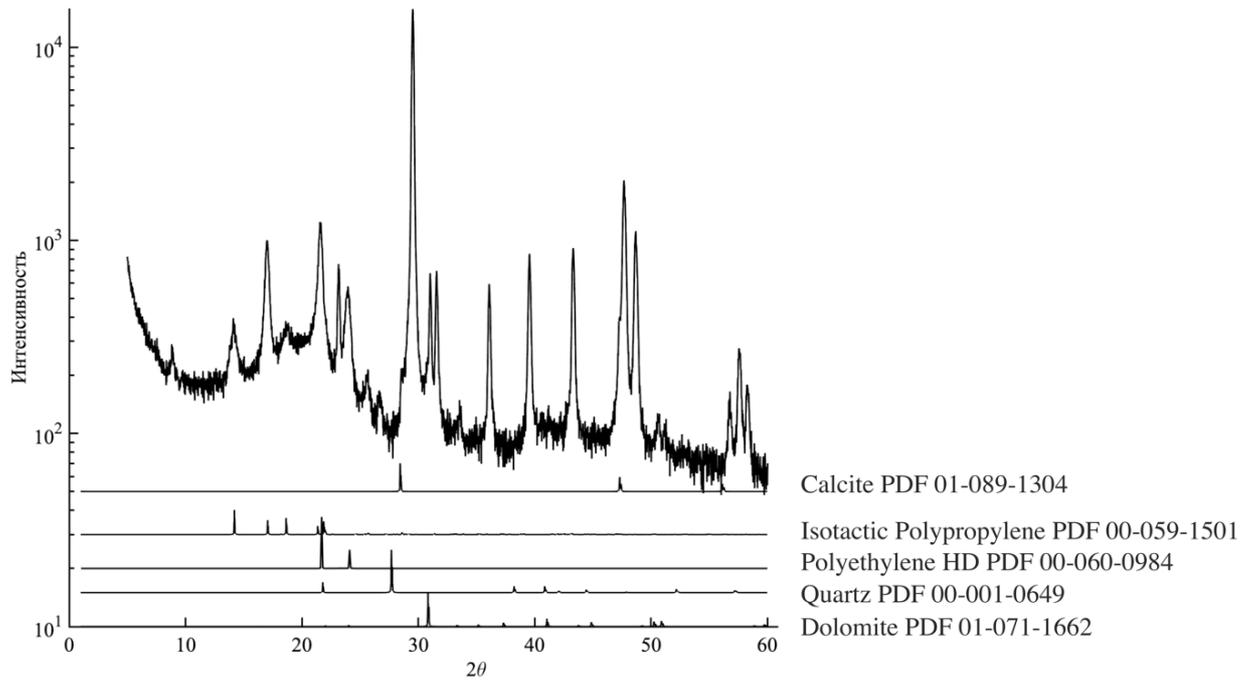


Рисунок 3.6 – Результаты РСА неориентированной пленки

Результаты РСА образцов полимерной мембраны до и после одноосной ориентации представлены на рисунках 3.7 и 3.8.

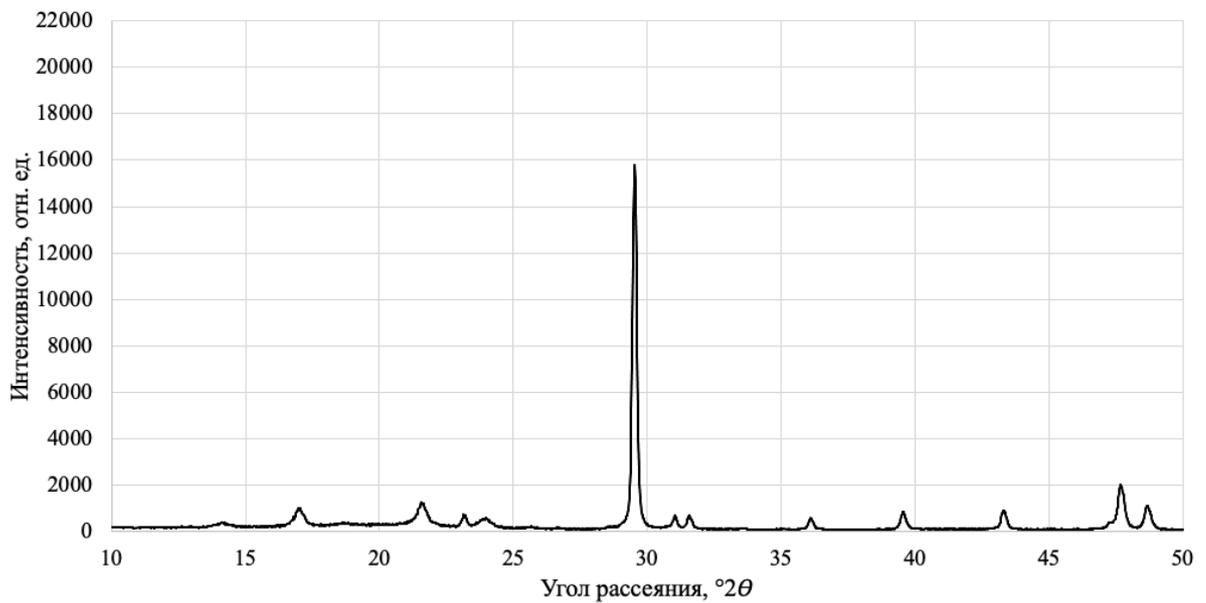


Рисунок 3.7 – Результаты РСА образца неориентированной полимерной пленки

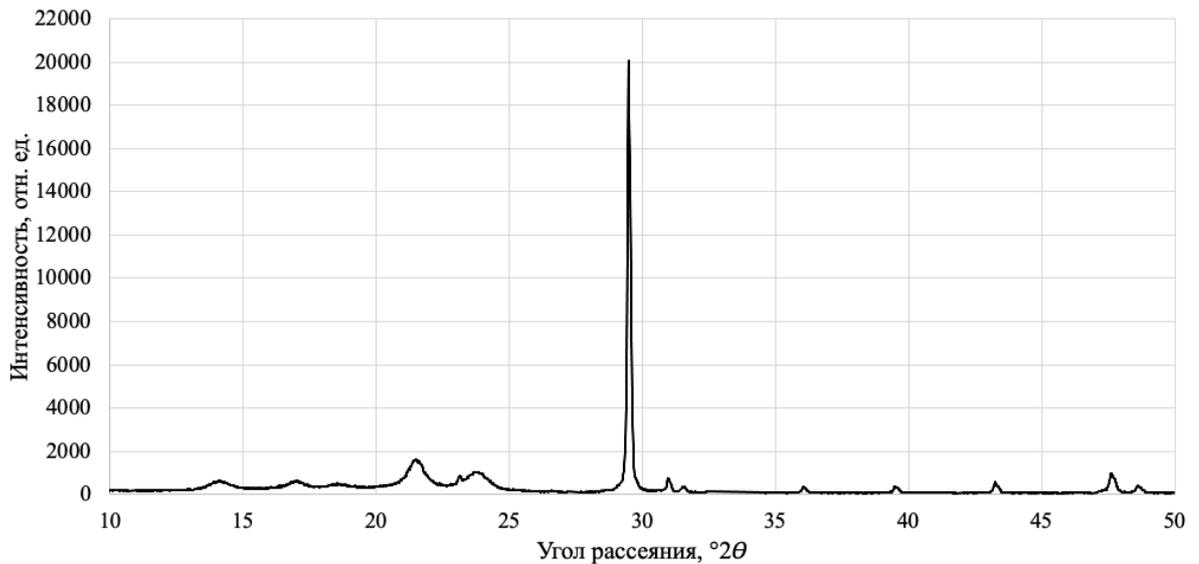


Рисунок 3.8 – Результаты РСА образца полимерной мембраны после процесса MDO (образец № 1)

Несмотря на сложность однозначной трактовки структурных изменений в многофазном образце проведено сопоставление рентгеновских рефлексов в угловых координатах, характерных преимущественно для полипропилена – $14,1^{\circ}2\theta$ и $21,5^{\circ}2\theta$ [183]. Результаты представлены на рисунке 3.9.

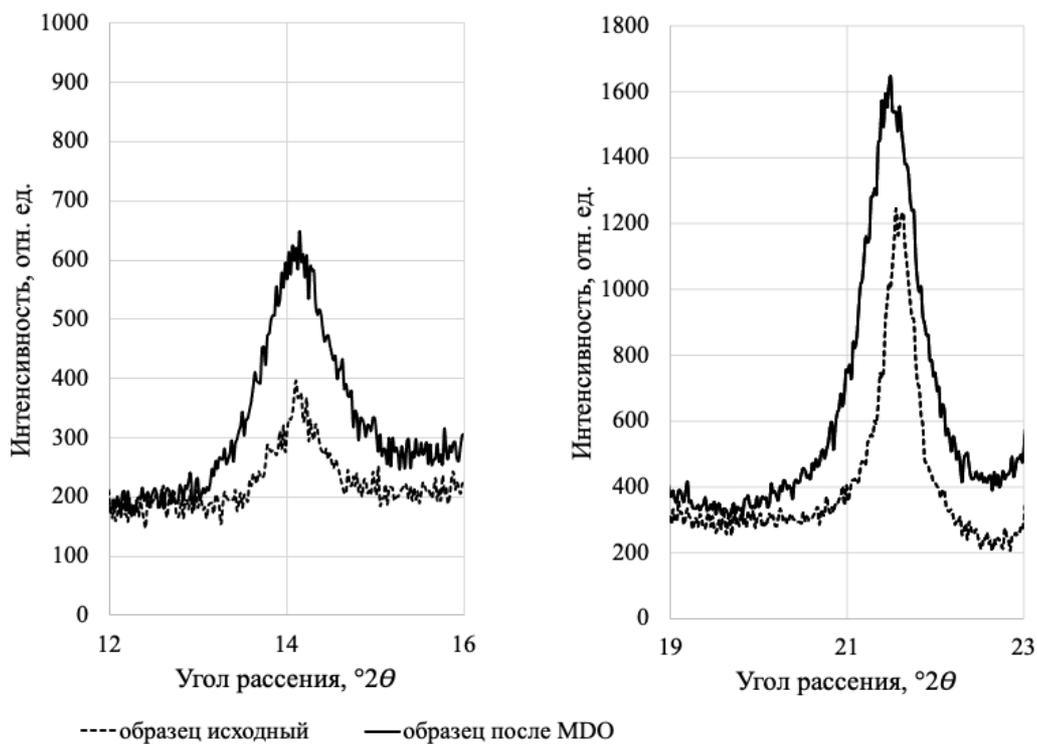


Рисунок 3.9 – Результаты наложения фрагментов дифрактограмм образцов полимерных пленок до и после процесса MDO

Результаты рентгеноструктурного анализа позволяют оценить влияние одноосной ориентации на структуру полимерной мембраны. Для образцов после MDO наблюдается упорядочивание структуры полимера, что подтверждается повышением на 31–54 % интенсивности основных дифракционных максимумов, характерных для полипропилена (JCPDS 00-059-1501), при этом значительного изменения межплоскостных расстояний не происходит.

Результаты ДСК образцов полимерных мембран до и после процесса MDO представлены на рисунке 3.10.

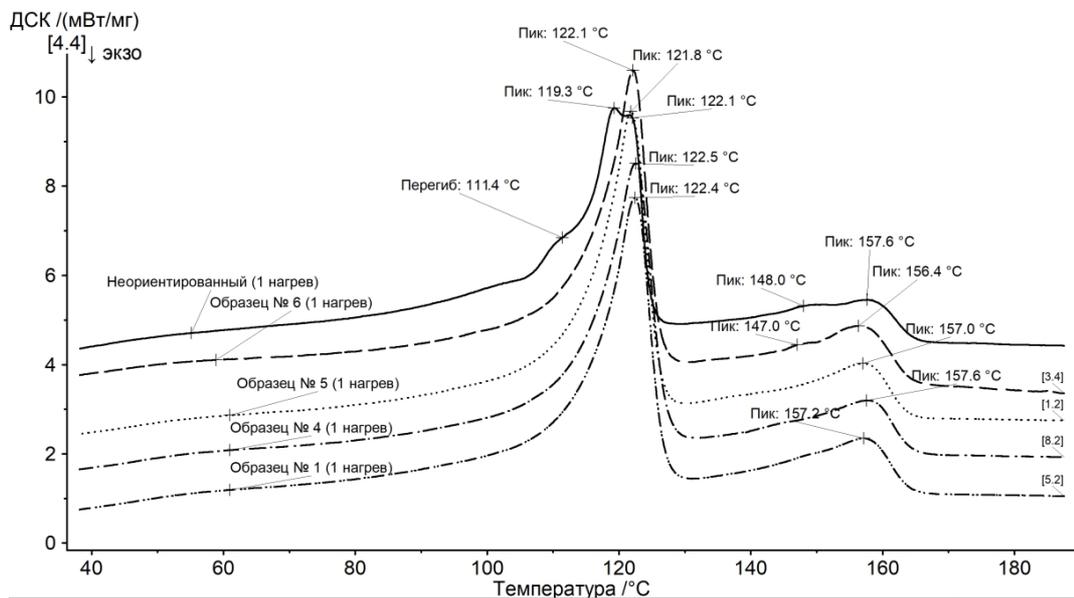


Рисунок 3.10 – Результаты ДСК анализа образцов полимерных мембран

Наложение кривых ДСК образцов пленки-полуфабриката и мембран, полученных при разных режимах MDO, позволяют выявить характерные эндотермические рефлексии вблизи температур плавления полиэтиленового (121,8–122,5 °C) и полипропиленового (156,4–157,6 °C) компонентов. Особенности процесса ориентации полимерного материала также наглядны на кривых ДСК. Образец пленки-полуфабриката демонстрирует множественные рефлексии и перегибы в окрестности главных пиков плавления, в частности:

– в окрестности пика плавления ПЭ присутствует плечо при температуре 111,4 °C и дуплет рефлексии при температурах 119,3 °C и 121,8 °C;

– в окрестности пика плавления ПП присутствует отчетливое плечо при 148,0 °С и рефлекс при 157,6 °С.

На кривых ДСК образцов после ориентации прослеживается тенденция к исчезновению перегибов с выявлением четких рефлексов при температурах плавления ПЭ и ПП в последовательности образцов от №6 до №1, что соответствует снижению температуры вытяжки в процессе MDO.

Таким образом, в образце неориентированной пленки присутствуют разнообразные надмолекулярные образования, что авторами [184] связывается с полиморфной надмолекулярной структурой, в частности, образованной сферолитами и рядами ламелей. Тенденция изменения формы термоаналитических кривых и исчезновения перегибов у ориентированных образцов в направлении снижения температуры ориентации до 85 °С связана с формированием равномерной фибриллярной структуры.

Повторный нагрев пленок в условиях инертного азота показывает релаксацию структуры мембран после плавления и восстановление полиморфной кристаллической структуры, близкой к состоянию таковой у неориентированной пленки (рисунок. 3.11).

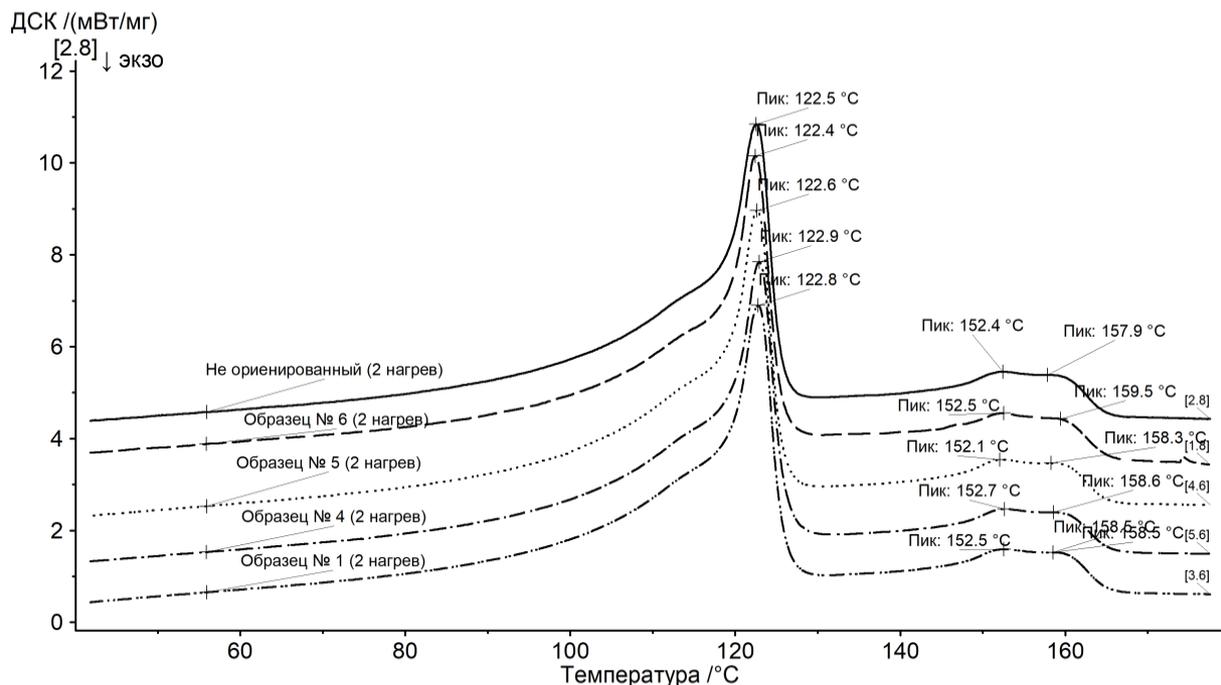


Рисунок 3.11 – Результаты ДСК анализа образцов полимерных мембран после повторного нагрева до 220 °С

Для установления влияния процесса ориентационной вытяжки на изменение химической структуры полимерных мембран проведены исследования методами ИК-Фурье спектроскопии.

ИК-спектры образцов мембран и исходной пленки-полуфабриката получены на ИК-Фурье спектрометре Bruker Vertex-70, совмещенном с ИК-микроскопом HYPERION 2000, с приставкой НПВО. Результаты представлены на рисунке 3.12.

Полученные спектры демонстрируют как полосы поглощения, характерные для ПП, ПЭ и компонентов природного мела, так и некоторые отличия, связанные с процессами ориентации образцов в продольном направлении [185–187].

На ИК-спектрах образцов идентифицируется присутствие кальцита по рефлексам в диапазонах волновых чисел $1450\text{--}1410\text{ см}^{-1}$, $880\text{--}860\text{ см}^{-1}$, $740\text{--}680\text{ см}^{-1}$ [188]. Высокое содержание в материале CaCO_3 приводит к наложению ИК-рефлексов характерных для кальцита, ПП и ПЭ.

На спектрах всех образцов присутствуют характерные для ПП полосы поглощения при волновых числах 998 см^{-1} , 973 см^{-1} , которые принято относить к полосам регулярности, а также использовать в качестве характеристических частот для определения кристаллической структуры ПП [189]. Рефлекс при 998 см^{-1} определяется вращательными колебаниями CH_2 и CH_3 групп, валентными колебаниями связи С-С и внеплоскостными крутильными колебаниями групп CH_2 в кристаллической фазе ПП [190]. В спектрах полученных образцов данный рефлекс присутствует, но не демонстрирует существенных изменений интенсивности при ориентации пленок.

Рефлекс при 973 см^{-1} связан с маятниковыми колебаниями групп CH_3 , валентными колебаниями связи С-С в аморфной фазе ПП. На полученных спектрах у ориентированных образцов, в большей степени у образца № 1, наблюдается снижение интенсивности данного рефлекса, что свидетельствует об уменьшении доли разупорядоченной аморфной фазы ПП при ориентации [190].

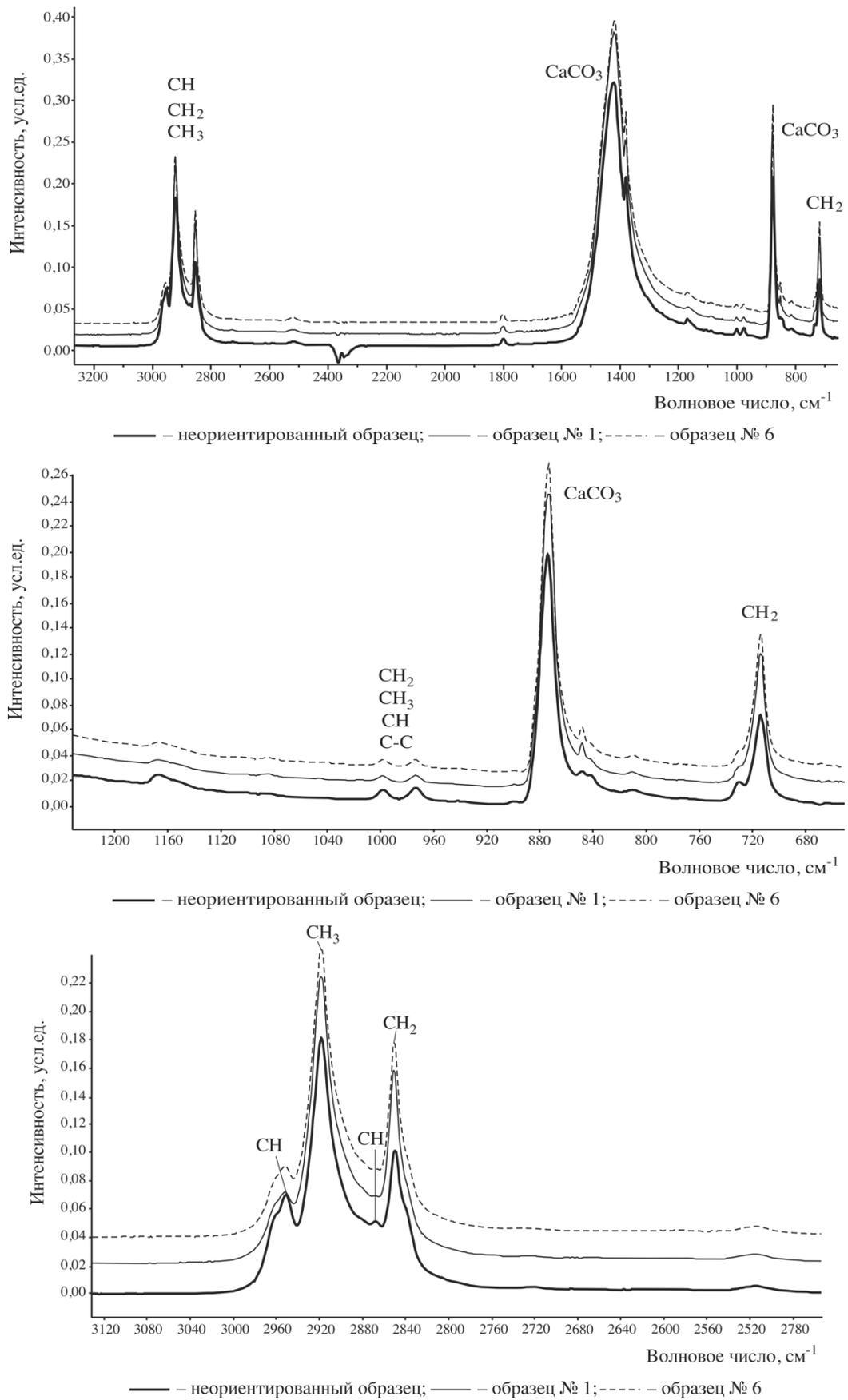


Рисунок 3.12 – ИК-спектры образцов пленок и мембран

Структурные изменения ПП компонента после одноосной ориентации образцов также наблюдаются по снижению интенсивности рефлексов 2867 см^{-1} и 2950 см^{-1} , отвечающих колебаниям СН и СН_2 групп основной цепи, и по увеличению интенсивности рефлексов при 2850 см^{-1} , отвечающих за валентные симметричные колебания СН_3 групп и 2920 см^{-1} , отвечающих за валентные асимметричные колебания СН_2 групп, которые, в свою очередь, зависят от стереорегулярности цепи [191].

О повышение степени кристалличности ПЭ компонента образцов при одноосной ориентации можно судить по увеличению относительной интенсивности рефлексов при 713 см^{-1} и 730 см^{-1} , соответствующих маятниковым колебаниям СН_2 групп ПЭ [192].

Таким образом, результаты ИК-Фурье спектроскопии показывают, что одноосная ориентация образцов приводит к изменению структуры полимерных пленок, переориентации макромолекул полимеров, повышению количества выпрямленных цепей и снижению дефектности кристаллитов, что согласуется с данными РСА и ДСК.

Для исследования пористой структуры полимерных мембран, полученных с использованием MDO-технологии, применялись методы СЭМ и микротомографии.

Для исследования морфологии поверхности экспериментальных объектов методами СЭМ выбраны образцы № 1, 5 и 6, наиболее существенно отличающиеся по температурным профилям процесса MDO. Исследования методами СЭМ проводились на высокоразрешающем автоэмиссионном сканирующем электронном микроскопе Merlin Carl Zeiss (Германия) при ускоряющем напряжении 5 кВ в режиме детектирования вторичных электронов. Для исключения электризации на поверхность объектов исследования напылялся углеродный слой. Результаты представлены на рисунке 3.13.

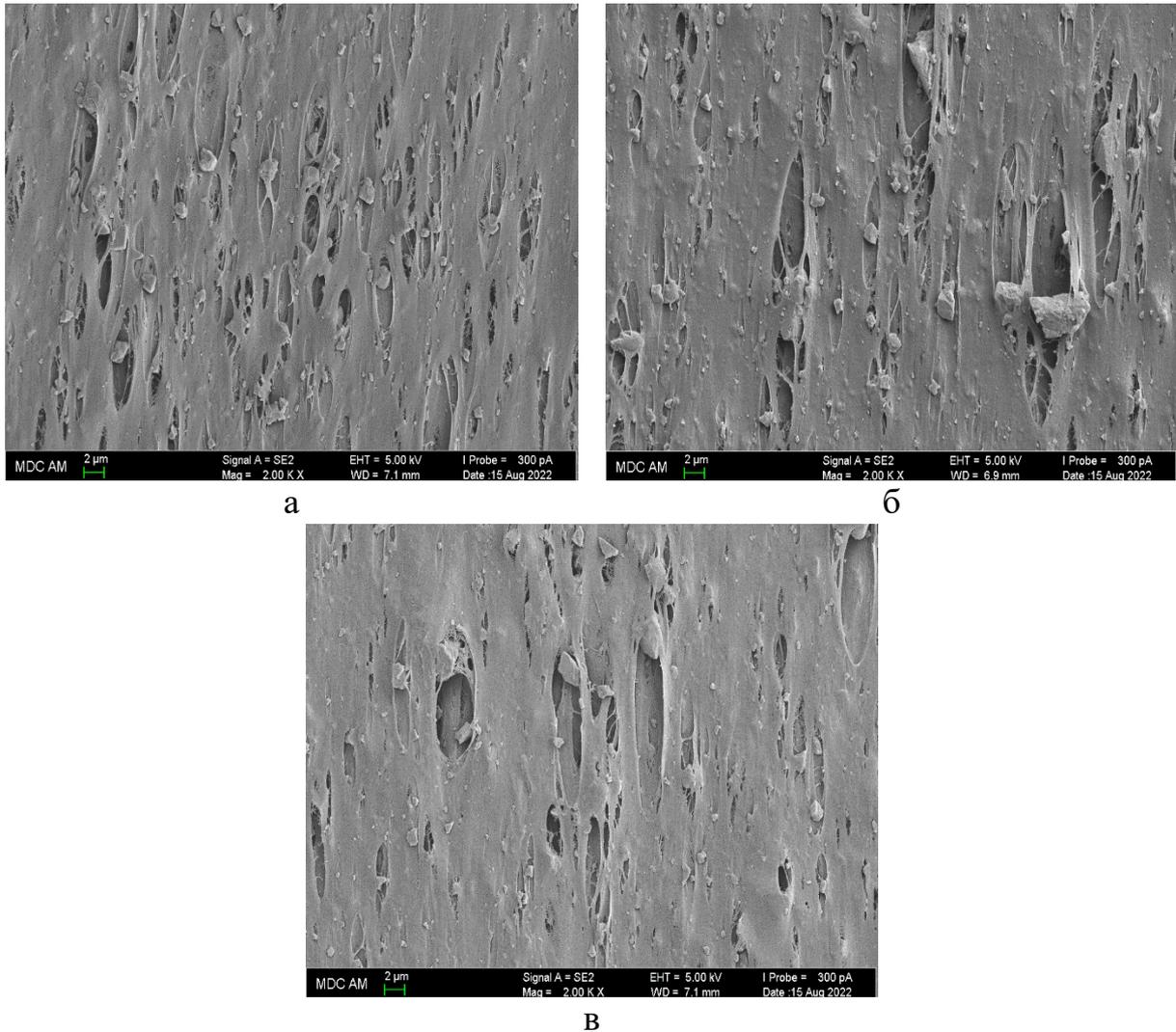


Рисунок 3.13 – Результаты СЭМ образцов полимерных мембран: а – образец №1; б – образец №5; в – образец №6

На изображениях СЭМ наглядны различия в морфологии пористой структуры образцов мембран, ориентированных при разных температурных профилях процесса MDO. Образец №1 (температура первой секции растяжения – 85 °С), показавший оптимальное сочетание паропроницаемости и механической прочности, характеризуется равномерным распределением пор по поверхности с латеральными размерами 4–6 мкм вдоль направления ориентации, 0,5–1 мкм – поперек (рисунок 3.13а). Морфология поверхности образца №5 (температура первой секции растяжения – 96 °С) существенно отличается от таковой для образца №1, с повышением температуры секции растяжения до 96 °С наблюдается объединение пор по площади отдельных «слоев» в более крупные, размерами 3–10 мкм, при этом в окрестности укрупненных пор наблюдается сжатие и

исчезновение более мелких (рисунок 3.13б). Микроструктура образца №6 (рисунок 3.13в) отражает усиление тенденции формирования крупных пор с размерами 4–12 мкм при одновременном уменьшении количества и исчезновении мелких пор с размерами 1–3 мкм вследствие дальнейшего повышения температуры тянущей пары секции растяжения MDO до 102 °С.

Количественный анализ размера пор вдоль направления ориентации на основе результатов СЭМ проведен с применением программного обеспечения Olympus Stream Basic™ (Япония), рисунок 3.14.

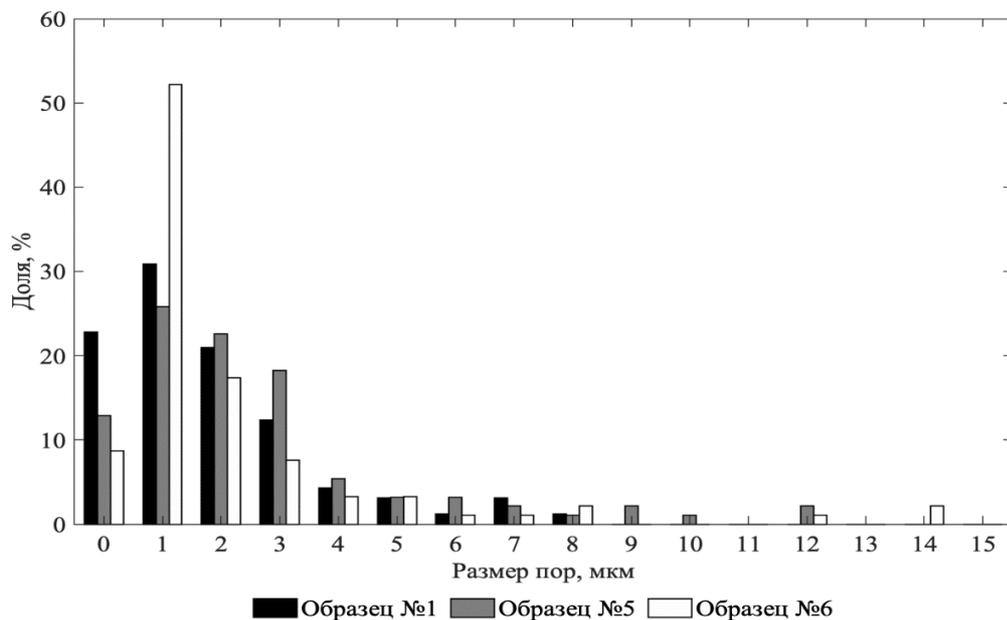


Рисунок 3.14 – Распределение пор по латеральным размерам вдоль направления ориентации на поверхности мембран (с применением ПО Olympus Stream Basic™)

Результаты показали, что образец №1 характеризуется разбросом размеров пор на поверхности вдоль направления ориентации 0,06–8,49 мкм, образец №5 – 0,17–11,96 мкм, образец №6 – 0,11–13,84 мкм. Таким образом, наблюдается отчетливая тенденция увеличения размера пор по площади при повышении температуры преднагрева и вытяжки мембраны в процессе MDO. Данная тенденция наиболее отчетливо видна на гистограммах распределения поверхностных пор по размерам вдоль направления ориентации (рисунок 3.14).

Морфологию сквозных пор, обеспечивающих транспорт пара через мембрану, можно наблюдать на основе результатов газо-жидкостной порометрии. Дифференциальное распределение сквозных пор по размерам на основе корректирующей дифференциальной кривой поромера представлено на рисунке 3.15.

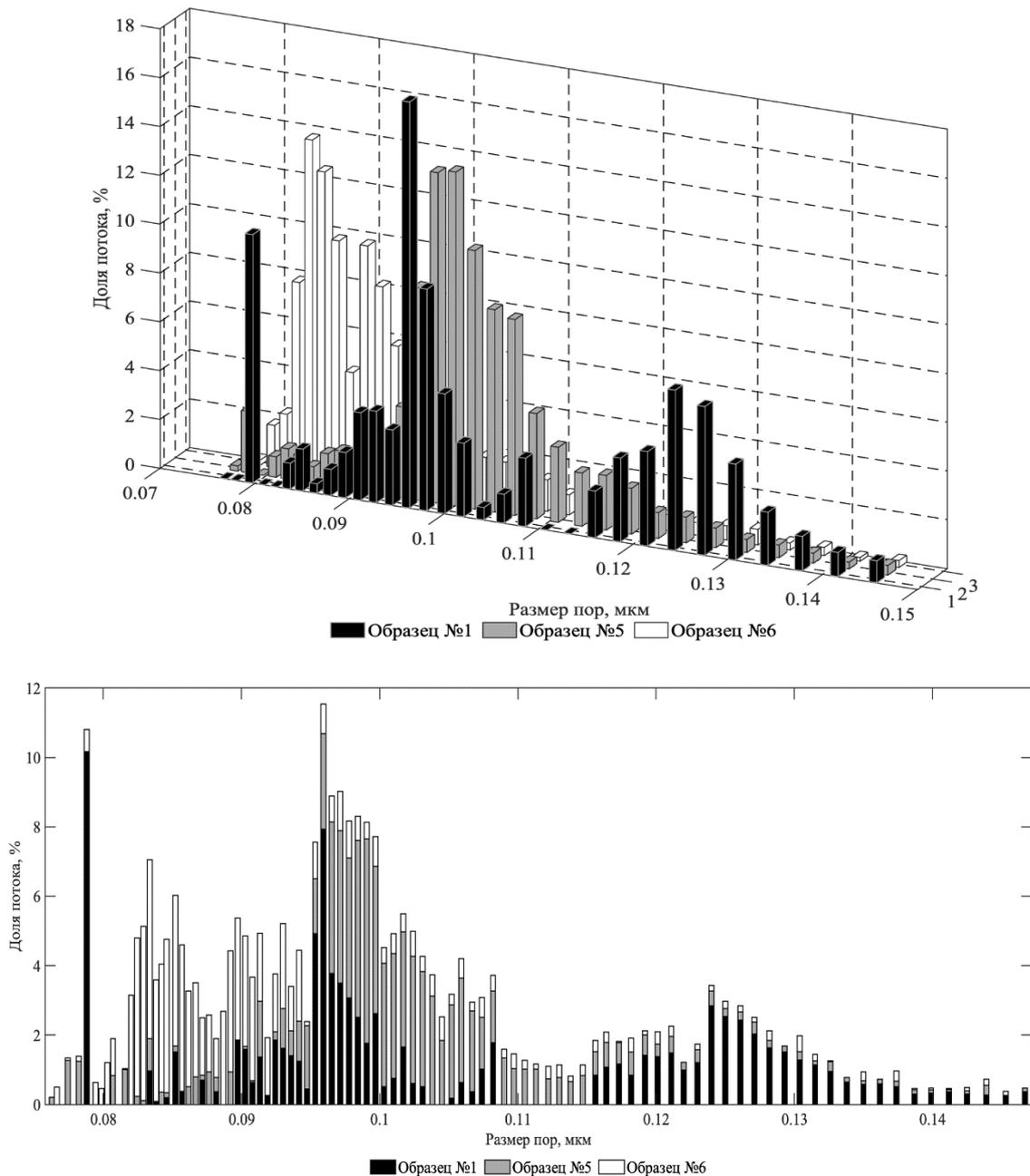


Рисунок 3.15 – Дифференциальное распределение сквозных пор по размерам на основе результатов газо-жидкостной порометрии (корректирующая дифференциальная кривая)

Результаты газо-жидкостной порометрии (рисунок 3.15) показали следующее:

- образец №1 характеризуется, как минимум, тремя диапазонами размеров транспортных пор: 0,078–0,080 мкм, 0,090–0,100 мкм и 0,115–0,140 мкм, на которые приходятся 10,17 %, 40,51 % и 29,72 % потока, соответственно;

- образец №5 демонстрирует наибольшую долю потока для пор в диапазоне размеров 0,095–0,110 мкм, охватывающую 68,16 %;

- образец №6 имеет преобладающее количество транспортных пор в диапазоне размеров 0,082–0,095 мкм с долей потока 74,96 %.

На основе сопоставления результатов СЭМ поверхности материала и газо-жидкостной порометрии можно заключить, что видимые на поверхности мембран поры размером до 15 мкм в процессе одноосной ориентации взаимно деформируются и смещаются в объеме материала, образуя систему слоистых пор, объединенных сквозными каналами намного меньших размеров – до 0,150 мкм. Именно сквозные или транспортные поры обеспечивают паропроницаемые свойства полученных мембран.

Отличительной особенностью образца № 1, обладающего наилучшими значениями паропроницаемости, относительно образцов № 5 и № 6, является наличие большого количества сквозных каналов в диапазоне размеров 0,115–0,140 мкм. Таким образом, можно предположить, что улучшенную паропроницаемость образца №1 формируют сквозные каналы именно этого размерного диапазона.

Для исследования расположения пор по толщине мембраны методом СЭМ исследован поперечный срез образца №1 (рисунок 3.16).

Как видно по СЭМ изображению среза мембраны, пористая структура в целом равномерна по объему и образована чередованием полостей с неорганическим наполнителем в «шахматном порядке», не образующем сквозных разрывов по толщине.

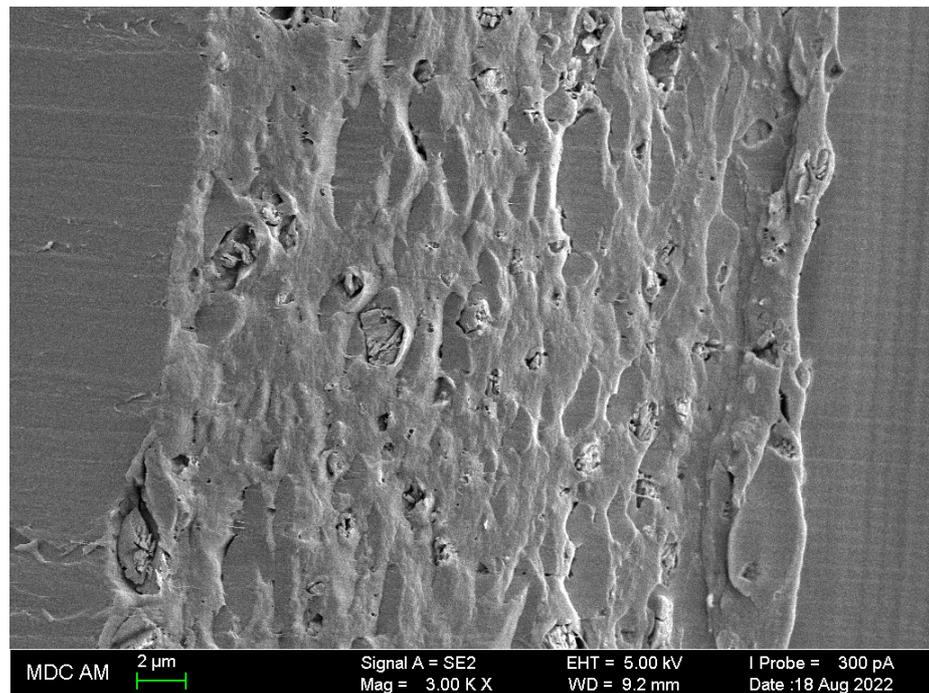


Рисунок 3.16 – Результаты СЭМ поперечного среза образца полимерной мембраны (образец №1)

Для оценки объемной структуры полимерной мембраны провели исследование структуры на рентгеновском микротомографе GE v|tome|xm300 (Waygate Technologies, США). Съемку проводили с разрешением 650 нм во всех направлениях. Результаты представлены на рисунке 3.17.

В силу низкого разрешения и особенностей метода рентгеновской томографии однозначно локализовать поры по результатам томографии невозможно. Однако, наглядно, что пористость характеризуется объемной равномерностью. Объемная пористость полимерной мембраны, рассчитанная по результатам томографии, составляет 46,3 %, при этом объемная пористость исходя из отношения объемной плотности пленки-полуфабриката и полимерной мембраны, составляет 41,2 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что в результате одноосной вытяжки в структуре полимерных пленок происходит образование сложной системы пор, равномерно распределенных в объеме. Результаты томографии согласуются с результатами СЭМ поперечных срезов.

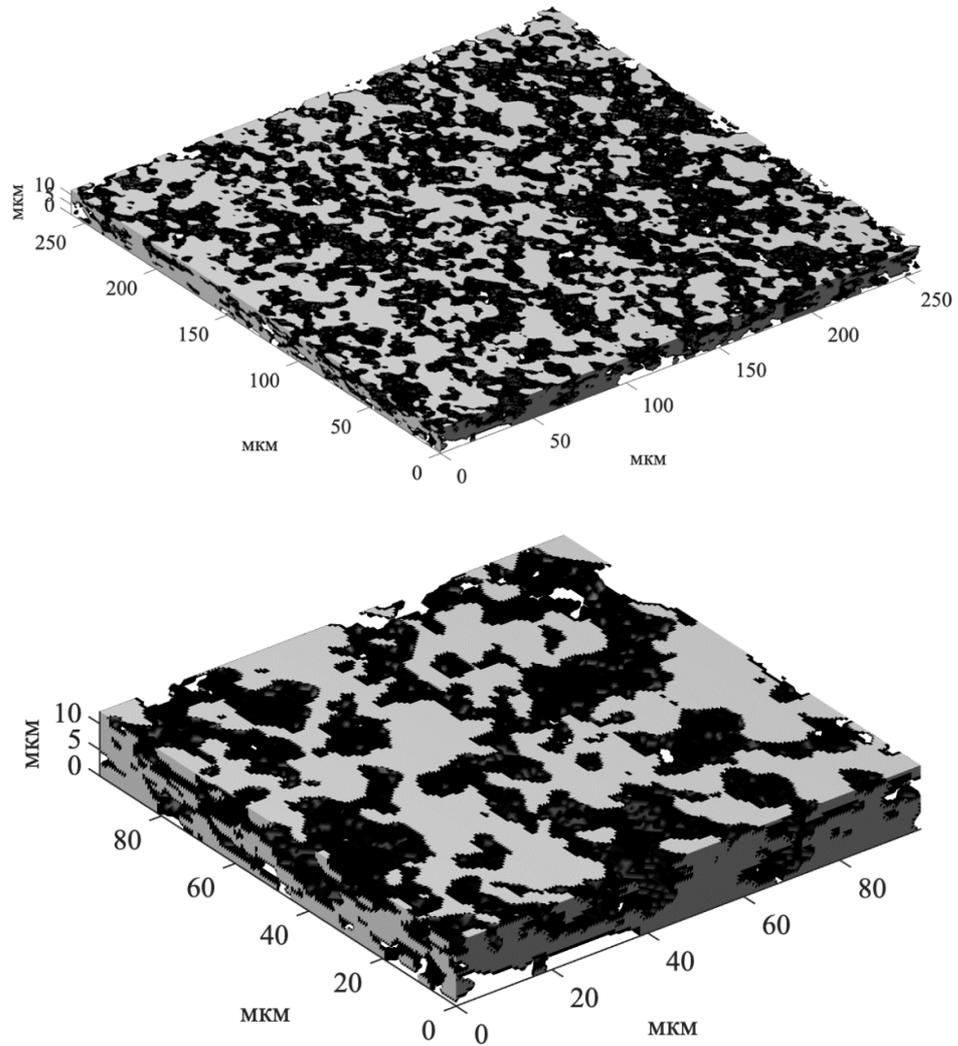


Рисунок 3.17 – Результаты микротомографии образца №1 полимерной мембраны

Обобщая результаты разных методов исследования пористой структуры можно отметить, что образец № 1 обладает равномерной в объеме пористой структурой, образованной взаимно смещенными по толщине мембраны щелевидными порами с достаточно узким распределением латеральных размеров и сквозными каналами в диапазонах размеров 0,078–0,080 мкм, 0,090–0,100 мкм и 0,115–0,140 мкм, при этом улучшенную паропроницаемость обеспечивает наличие большого количества сквозных каналов в диапазоне размеров 0,115–0,140 мкм.

Процесс одноосной ориентации оказывает существенное влияние на структуру полимерной мембраны, что подтверждается аналитическими методами исследования. Методом PCA установлено, что у ориентированных образцов

повышается степень упорядоченности структуры, что выражается в повышении интенсивности основных дифракционных максимумов полипропилена на 31–54 %. Влияние температуры вытяжки пленки на ее термическое поведение показывают результаты ДСК. Неориентированная пленка обладает полиморфной надмолекулярной структурой, у ориентированных образцов при снижении температуры вытяжки до 85 °С формируется равномерная фибриллярная структура. Результаты ИК-Фурье спектроскопии показывают, что одноосная ориентация образцов приводит к изменению структуры полимерных пленок, переориентации макромолекул полимеров, повышению количества выпрямленных цепей и снижению дефектности кристаллитов.

Температура вытяжки при одноосной ориентации влияет на распределение размеров пор на поверхности и в объеме материала. Наблюдается тенденция увеличения размера пор по площади материала при повышении температуры преднагрева и вытяжки мембраны в процессе MDO с одновременным уменьшением размеров сквозных каналов. Получаемая пористая структура в целом равномерна по объему и образована сложной системой пор с объемной долей около 46 %. Образец полимерной мембраны, обладающий наилучшим сочетанием паропроницаемости и механической прочности, характеризуется наиболее равномерной пористой структурой с узким распределением размеров по площади и полимодальной сквозной пористостью с большого количеством сквозных каналов в диапазоне размеров 0,115–0,140 мкм.

Таким образом, в результате комплекса проведенных исследований разработана полимерная мембрана, сочетающая высокие значения паропроницаемости ($11\,000\text{ г/м}^2 \times 24\text{ ч}$), гидроизоляционные свойства (значение водоупорности 146 мБар) с высокими прочностными характеристиками (предел прочности в продольном направлении 25,68 Н), при толщине 20–23 мкм и поверхностной плотности 20 г/м^2 , что позволяет использовать ее в качестве функционального слоя для создания мембранного технического текстильного материала (п. 3.3, 3.4). Полученная мембрана отличается высокими показателями паропроницаемости за счет формирования при одноосной ориентации в структуре

полимерного материала сложной слоистой системы пор с латеральными размерами до 2 мкм и сквозных каналов диаметром до 0,14 мкм при объемной пористости 46 %.

3.2 Математическая модель процесса одноосной ориентации полимерной мембраны для мембранного технического текстильного материала

Методы молекулярной динамики применяются для моделирования структуры и свойств полимерных материалов, что позволяет устанавливать взаимосвязь между характеристиками молекулярных систем и свойствами материалов. Молекулярная динамика позволяет детально изучить механизмы изменений молекулярной структуры, происходящие в ходе получения и модификации материалов [193–198]. Известны работы в области молекулярно-динамического моделирования процессов деформации аморфных полимеров, описывающие явления упругости, текучести и деформационного упрочнения [199, 200]. Интерес представляет установление взаимосвязи между параметрами деформации и свойствами моделируемых полимерных систем.

Метод молекулярной динамики является методом дискретных элементов, а моделируемые системы представляют собой совокупность частиц или атомов, изменение траектории которых описывается уравнениями динамики с учетом парных и многочастичных взаимодействий [201, 202]. Для моделирования полимерных систем, которые характеризуются большой протяженностью макромолекул, распространение получили как модели объединенного атома [197], так и полноатомные модели, где в качестве дискретных элементов рассматриваются отдельные атомы [198].

Идентификация потенциалов межчастичного взаимодействия осуществляется с учетом химического состава и структуры, а также особенностей взаимодействий между частицами в моделируемой системе. Для полноатомных

моделей полимерных материалов применение нашли многочастичные потенциалы, которые учитывают ковалентные связи в макромолекулах [203–206]. Для описания углеродных и углеводородных систем может быть использован потенциал Бреннера [203]. Многочастичные потенциалы REBO и AIREBO используются для моделирования полимерных систем и включают описание сопряженных связей [205, 206]. Потенциал AIREBO включает составляющую, описывающую невалентные торсионные взаимодействия:

$$E^{AIREBO} = E_{ij}^{REBO} + E_{ij}^{LJ} + \sum_{k \neq i,j} \sum_{l \neq i,j,k} E_{kijl}^{tors}, \quad (3.1)$$

где E_{ij}^{REBO} – реактивный эмпирический потенциал порядка связи REBO; E_{ij}^{LJ} – потенциал Леннарда-Джонса, описывающий Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия; E_{kijl}^{tors} – потенциал, описывающий торсионные взаимодействия.

При создании математической модели методом молекулярной-динамики рассмотрен процесс одноосной деформации участка кристаллической фазы ПП. Для получения ориентированных полиолефиновых мембран используют изотактический ПП, обладающий регулярной структурой. Пространственное положение метильных групп определяет вид конформации изотактического ПП [207]. Наиболее стабильной кристаллической модификацией изотактического ПП является α -форма с параллельной упаковкой макромолекул в кристаллических областях полимера [208].

Для кристаллической структуры ПП, как и для других гибкоцепных полимеров, характерно присутствие как ламелей со складчатыми структурами, так и фибриллярных кристаллов с выпрямленными цепями [209]. При этом ориентированное состояние в полимерных материалах характеризуется преимущественным направлением основных цепей макромолекул вдоль оси микрофибрилл, что приводит к анизотропии свойств материала. Наиболее наглядно структуру полимеров в одноосно-ориентированном состоянии представляет модель, в соответствии с которой микрофибриллы имеют достаточно четкие боковые границы, наблюдается продольное чередование кристаллических областей складчатой структуры с менее упорядоченными аморфными

прослойками, для которых характерно преобладание внутрифибриллярных со значительно меньшим числом межфибриллярных проходных цепей (рисунок 3.18) [209].

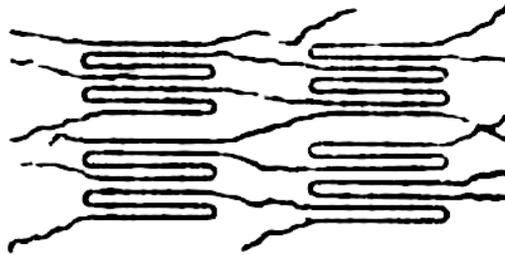


Рисунок 3.18 – Структура микрофибриллы [209]

Надмолекулярная структура полимерных материалов может оказывать существенное влияние на их физико-химические свойства. Малое количество межфибриллярных цепей в кристаллической структуре объясняет относительно малую прочность ориентированных полимерных материалов в направлении, перпендикулярном направлению ориентации.

Для создания математической модели методом молекулярной динамики за начальную конфигурацию моделируемой системы принят участок кристаллической фазы ПП после релаксации при температуре 300 К. Разработана полноатомная модель, включающая 4520 атомов, начальный размер моделируемой ячейки составил $92 \times 76 \times 12 \text{ \AA}^3$, граничные условия приняты периодическими. Межчастичное взаимодействие в макромолекулах ПП описано с применением потенциала AIREBO [206].

Для моделирования выбран процесс одноосной деформации изотактического ПП, температура и скорость деформации соответствовали параметрам MDO для образцов №1 и №6 (таблицы 3.1, 3.2), временной шаг принят равным 0,5 фс. Результаты численных расчетов представлены на рисунках 3.19–3.24.

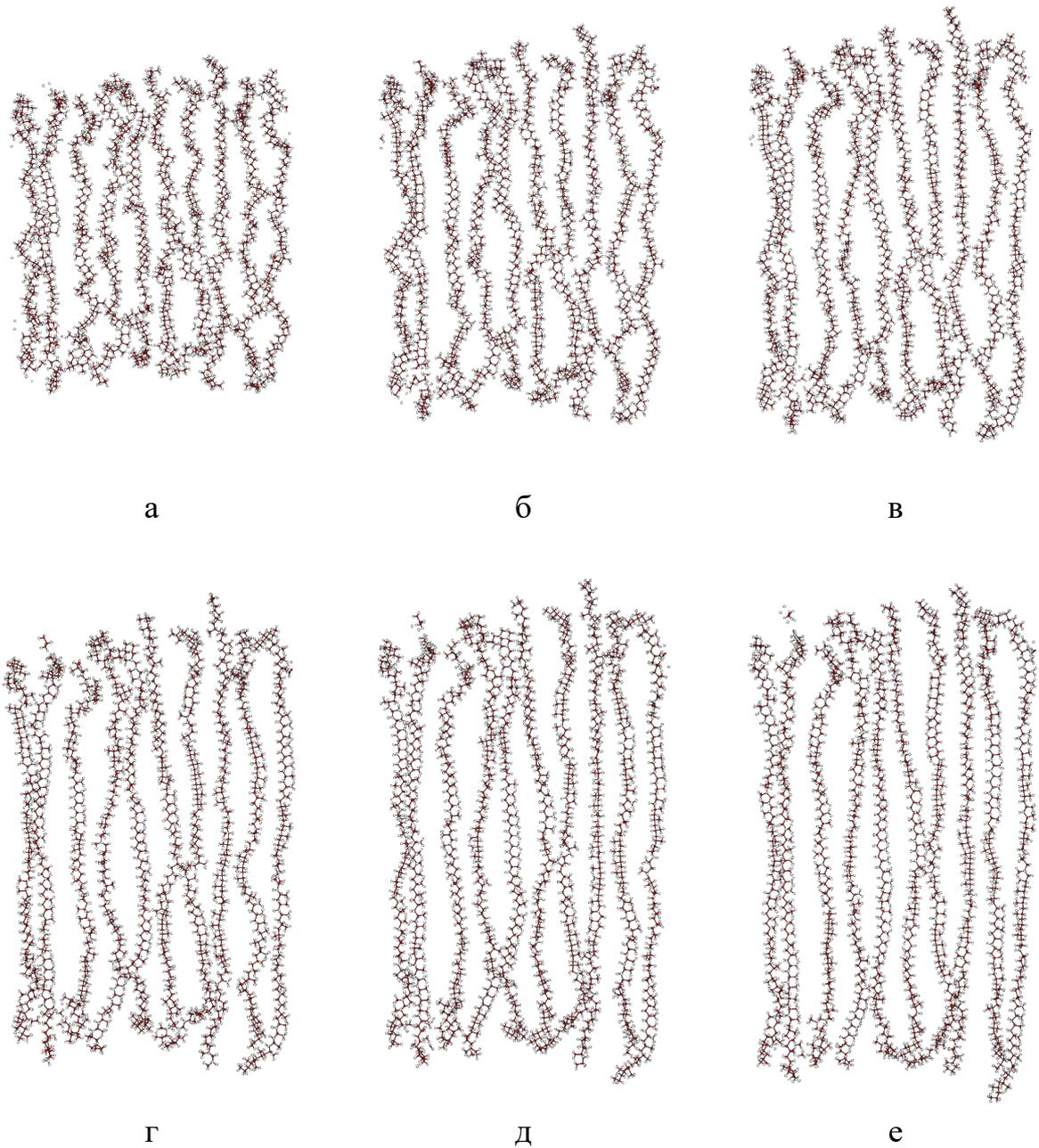


Рисунок 3.19 – Изображение моделируемой области ПП (С – красный, Н – серый) при одноосной деформации при температуре 358 К (образец №1) в момент времени $t = 0$ фс (а), $t = 350$ фс (б), $t = 550$ фс (в), $t = 750$ фс (г), $t = 950$ фс (д), $t = 1125$ фс (е)

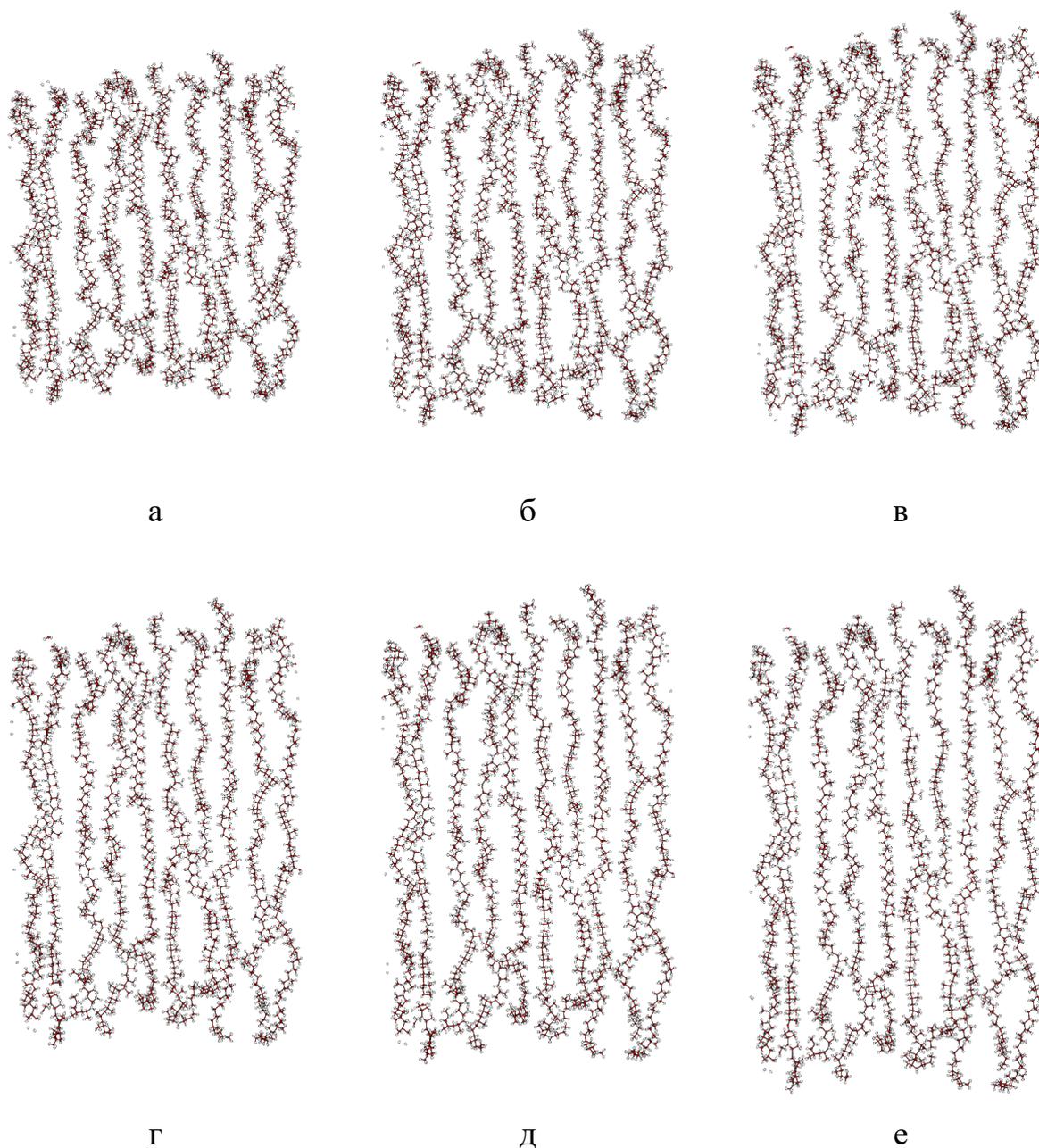


Рисунок 3.20 – Изображение моделируемой области ПП (С – красный, Н – серый) при одноосной деформации при температуре 375 К (образец №6) в момент времени $t = 0$ фс (а), $t = 350$ фс (б), $t = 550$ фс (в), $t = 750$ фс (г), $t = 950$ фс (д), $t = 1125$ фс (е)

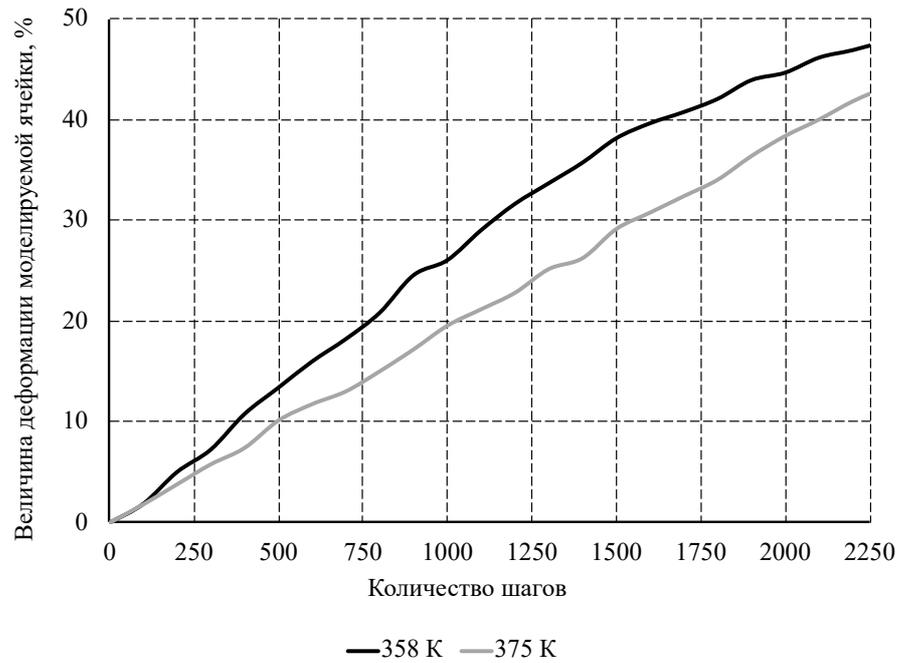


Рисунок 3.21 – Изменение величины деформации моделируемой ячейки вдоль оси деформации (вдоль направления основных цепей полимера)

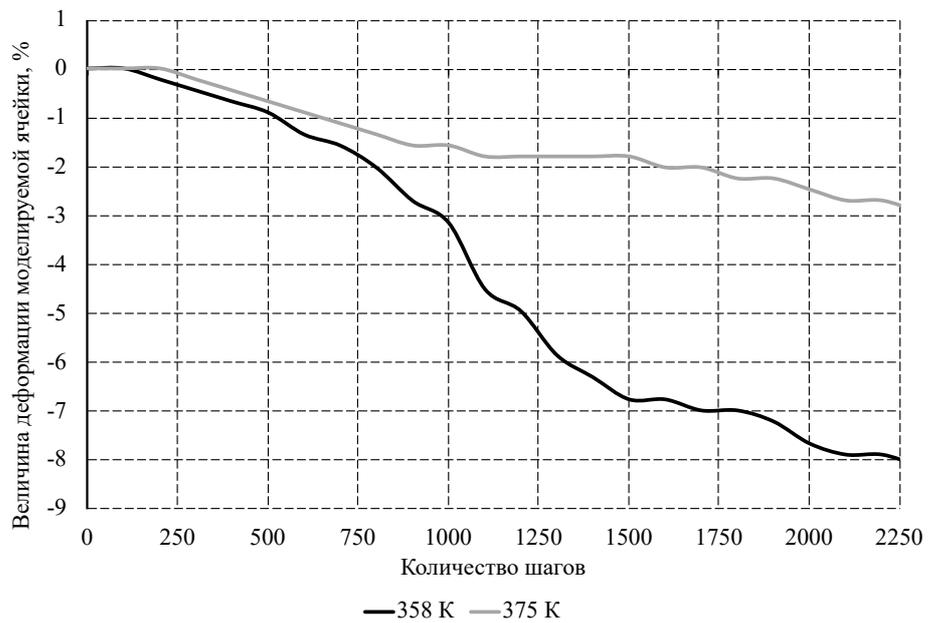


Рисунок 3.22 – Изменение величины деформации моделируемой ячейки поперек оси деформации (поперек направления основных цепей полимера)



Рисунок 3.23 – Изменение потенциальной энергии моделируемой системы при одноосной деформации

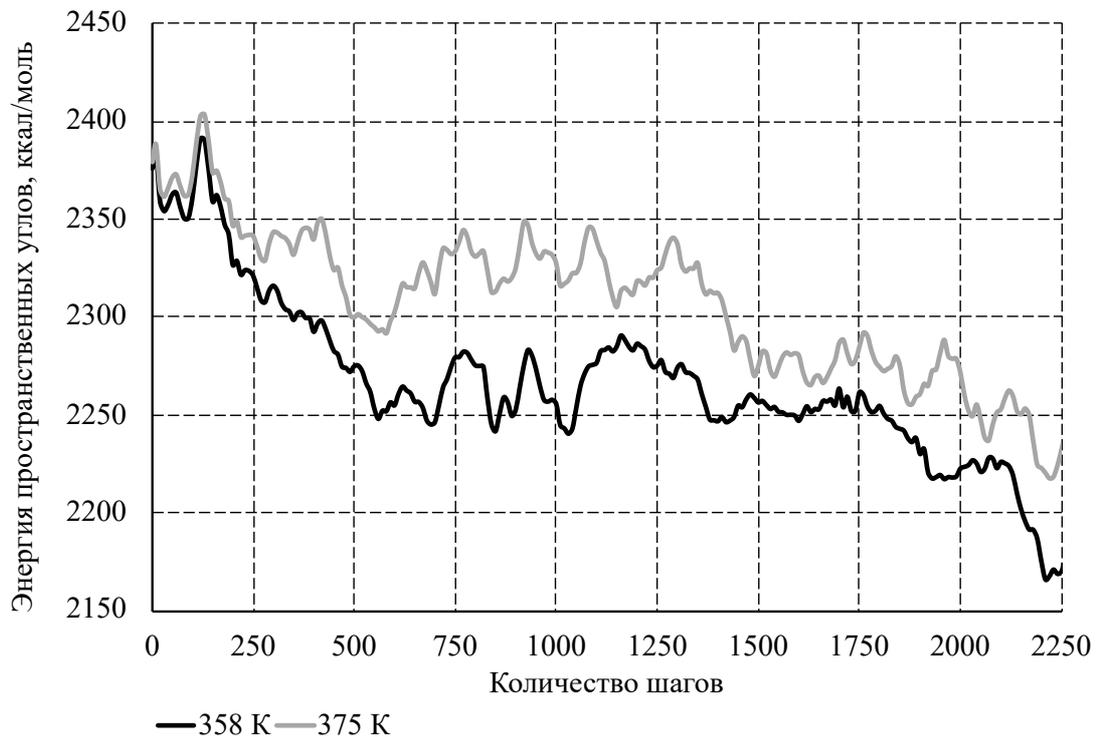


Рисунок 3.24 – Изменение энергии внутреннего вращения вокруг валентных связей (пространственных углов) моделируемой системы при одноосной деформации

Визуализация результатов математического моделирования (рисунки 3.19, 3.20) показала, что одноосная деформации приводит к структурным изменениям ПП, наблюдается изменение конформации, валентных и пространственных углов в макромолекулах полимера. Разрыва ковалентных связей в макромолекулах ПП не происходит. В результате одноосной деформации при температуре 358 К наблюдается наиболее выраженное повышение регулярности структуры полимера по сравнению с одноосной деформацией при температуре 375 К.

По полученным данным изменения величины деформации моделируемой ячейки (рисунки 3.21, 3.22) можно сделать вывод, что в результате одноосной деформации при температуре 358 К происходит наибольшее увеличение деформации моделируемой ячейки вдоль оси вытяжки и уменьшение поперек оси вытяжки, по сравнению с одноосной деформацией при температуре 375 К. Это обусловлено упорядочиванием структуры полимера, в ходе которой происходит ориентация основных цепей макромолекул вдоль оси вытяжки и их наиболее плотная упаковка.

Результаты численных расчетов (рисунки 3.23, 3.24) показали, что при одноосной деформации моделируемой системы происходит уменьшение ее потенциальной энергии и энергии пространственных углов. Снижение потенциальной энергии связано с уменьшением расстояния между макромолекулами при упорядочивании структуры полимера. Потенциальная энергия незначительно увеличивается в упругой области, что может быть обусловлено возникновением несвязанных взаимодействий, при этом дальнейшее ее снижение связано с процессами упрочнения при деформации, распределением энергии за счет пространственного вращения и изменения длин связей для компенсации деформации.

Известно, что энергия, связанная с длиной связи и валентными углами, существенно не изменяется при одноосной деформации полимерных материалов, а большая часть деформации в полимерной системе обеспечивается за счет изменения пространственных углов и несвязанных взаимодействий [199]. Изменение энергии пространственных углов характерно для полимеров при слабых

термических воздействиях (~300–400 К), при этом в процессах деформационного упрочнения происходит ее снижение за счет превращений молекулярных структур в конформации с наиболее низкой энергией.

Молекулярная система после одноосной деформации при температуре 358 К характеризуется наименьшей потенциальной энергией и энергией пространственных углов по сравнению с молекулярной системой после одноосной деформации при температуре 375 К, что связано с достижением наибольшей упорядоченности и ориентации структуры полимера, и согласуется с результатами визуализации численных расчетов.

Результаты молекулярного моделирования в целом согласуются с экспериментальными выводами, полученными в п. 3.1. Одноосная ориентация пленки-полуфабриката при температуре тянущей пары секции растяжения 85 °С (358 К) обеспечивает наибольшую степень упорядоченности и формирования однородной надмолекулярной структуры полимерной мембраны. Происходит формирование объемной, равномерно ориентированной в направлении вытяжки пористой структуры.

3.3 Разработка мембранного технического текстильного материала

В качестве паропроницаемых гидроизоляционных текстильных материалов технического назначения распространение получили многослойные материалы, включающие в себя полимерную мембрану с селективной проницаемостью, а также один или несколько слоев нетканого материала, функцией которых является защита мембраны от внешних механических воздействий [12–15, 47, 48].

Для создания мембранных технических текстильных материалов предложено использовать разработанную гидроизоляционную паропроницаемую мембрану на основе полиолефинов (образец №1, п. 3.1). В качестве волокнистых слоев использованы нетканые материалы, изготовленные по технологии спанбонд (п. 2.1), что обусловлено сочетанием их низкой поверхностной плотности с

высокими эксплуатационными характеристиками, а также коммерческой доступностью.

Предложено разработать двух- (дуплекс) и трехслойные (триплекс) ламинированные мембранные текстильные материалы технического назначения. Схемы расположения отдельных слоев представлены на рисунке 3.25. Соединение слоев предложено проводить методом точечной ультразвуковой (УЗ) сварки полимерных материалов.



Рисунок 3.25 – Схемы расположения слоев в экспериментальных образцах мембранных ламинатов: а – трехслойный ламинат (триплекс); б – двухслойный ламинат (дуплекс)

Для соединения слоев материала использован метод УЗ сварки, отличающийся высокой скоростью процесса и прочностью сварных соединений разнородных полимерных материалов. Для получения опытных образцов ламинатов в лабораторных условиях использовали переносной УЗ сварочный аппарат МФЭ-36 (ООО «Мэлфиз», Россия). Размер пятна сварного скрепления составлял 1,6 мм (рисунок 3.26).

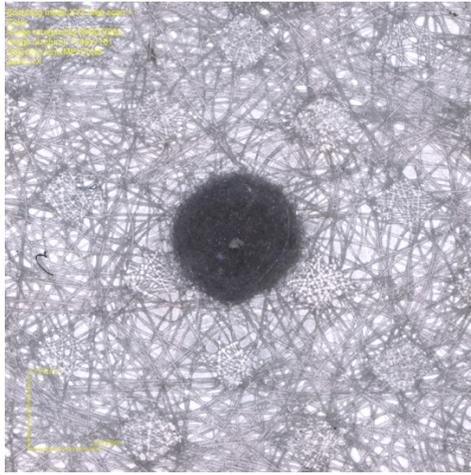
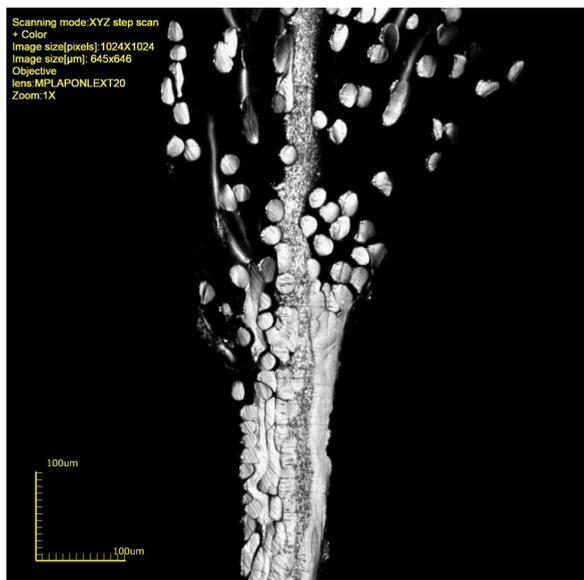
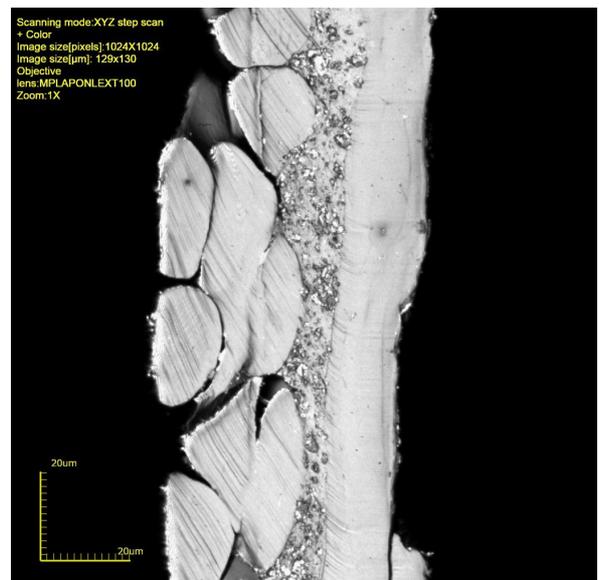


Рисунок 3.26 – Результаты КЛСМ поверхности мембранного текстильного материала в зоне сварного скрепления ($\times 10$)

Поскольку точечная сварка сопровождается локальным плавлением структуры полимерного материала с нарушением системы пор мембраны и сплавлением волокон нетканых полотен (рисунок 3.27), для снижения негативного влияния на целевые свойства ламината применялись схемы распределения точек сварки в гексагональном порядке с расстояниями между точками 5 и 10 мм. Характер соединения полимерных слоев в образцах экспериментальных ламинатов представлен на рисунке 3.28.



а



б

Рисунок 3.27 – Результаты КЛСМ поперечного среза зоны точечной УЗ сварки экспериментального образца трехслойного ламината, с увеличением: а – $\times 120$; б – $\times 600$

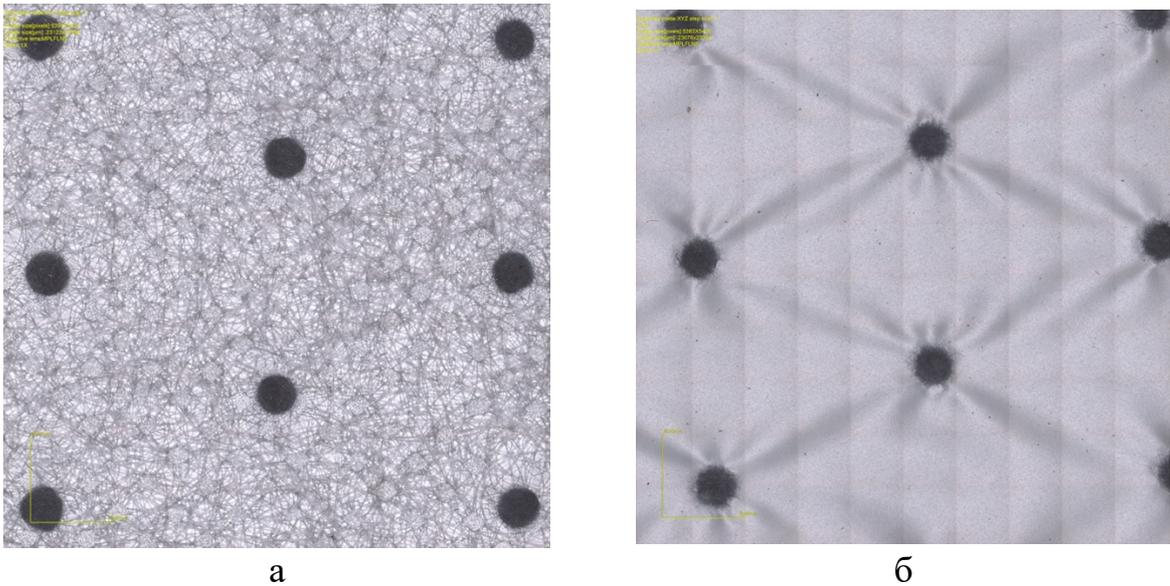


Рисунок 3.28 – Распределение зон точечной УЗ сварки экспериментальных образцов мембранных ламинатов ($\times 3$): а – трехслойный ламинат (триплекс); б – двухслойный ламинат (дуплекс), со стороны мембраны

Для сравнения исследованы участки точечной сварки промышленно изготовленных аналогов – ламинатов фирм АО «Полимализ» (ОЭЗ «Алабуга») и ОАО «СветлогорскХимволокно» (г. Светлогорск, Республика Беларусь). Результаты представлены на рисунках 3.29, 3.30.

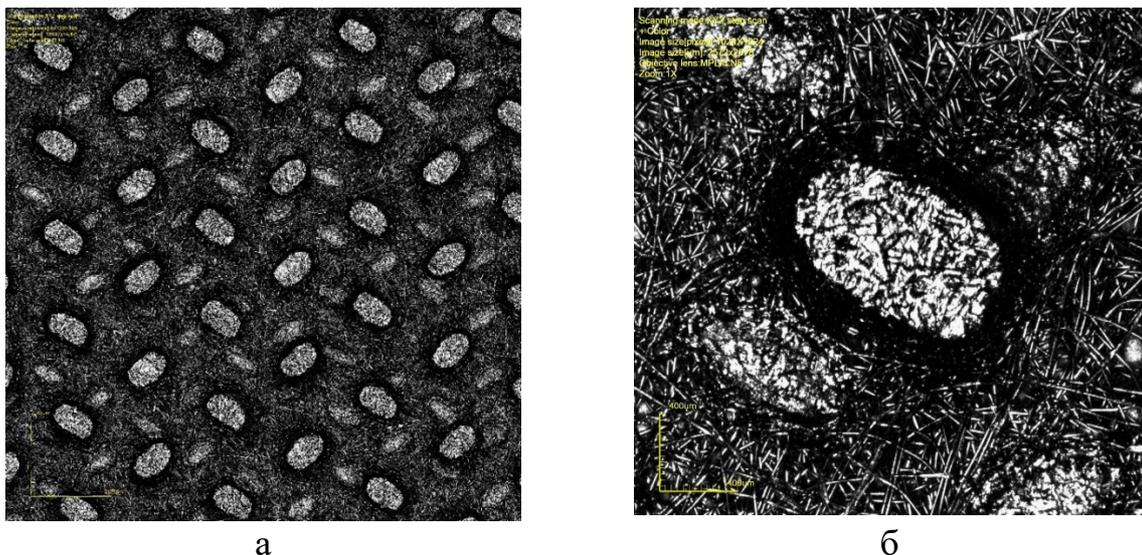


Рисунок 3.29 – Результаты КЛСМ зоны точечной термосварки промышленных образцов ламинатов производства АО «Полимализ»: а – общий вид (триплекс, $\times 5$); б – зона точечной термосварки ($\times 28$)

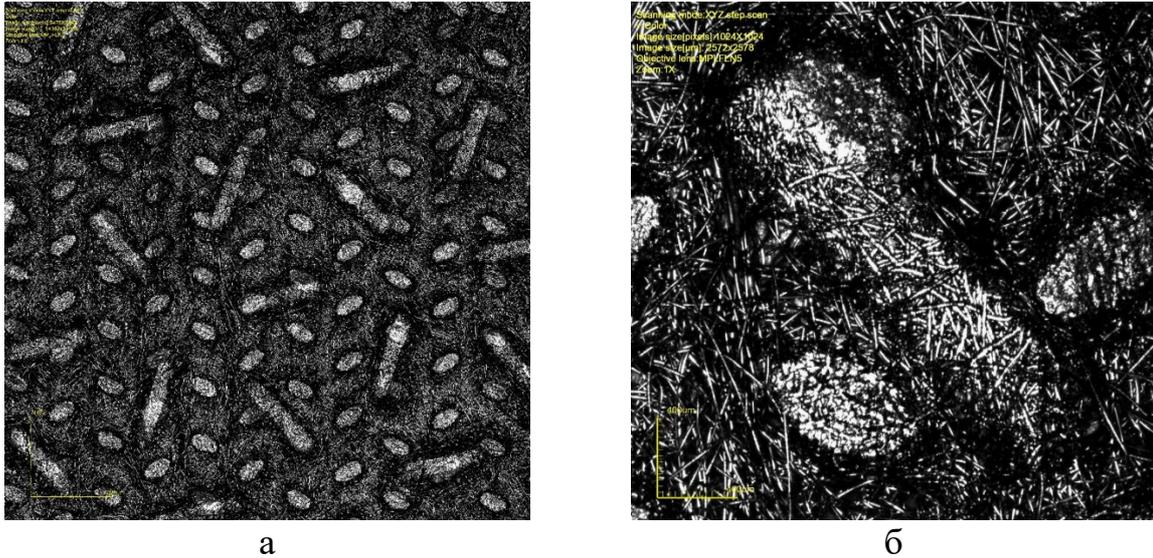


Рисунок 3.30 – Результаты КЛСМ зоны точечной УЗ сварки промышленных образцов ламинатов производства ОАО «СветлогорскХимволокно»: а – общий вид (триплекс, $\times 5$); б – зона точечной сварки ($\times 28$)

С помощью программного обеспечения LEXT конфокального микроскопа Olympus OLS-4000 рассчитаны площади участков сварного скрепления ламинатов. Образец производства АО «Полимализ» имеет эллиптическую форму пятна термоскрепления с размерами полуосей 1,0 мм и 0,6 мм, площадью 0,6 мм². Пятна термоскрепления расположены по площади в виде ячеек в форме равнобедренного треугольника с длиной стороны 2,5 мм. На промышленном ламинате ОАО «СветлогорскХимволокно» выполнена точечная ультразвуковая сварка в виде удлиненного овала с геометрическими размерами 2,2 мм на 0,3 мм и площадью 1,1 мм². Пятна сварки размещены в ячейках в виде равнобедренного треугольника со стороной 2,4 мм. На опытном образце точечная УЗ сварка выполнена в виде круглых пятен диаметром 1,6 мм, площадью 1,7 мм², расположенных в ячейке в виде равнобедренного треугольника со стороной 10 мм. Значения плотности расположения пятен сварки по площади исследованных ламинатов представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Плотность распределения точечной сварки

Наименование материала	Плотность расположения пятен сварки по площади ламината, %
Опытный образец мембранного материала	3,5
Ламинат производства АО «Полиматиз»	9,1
Ламинат производства ОАО «СветлогорскХимволокно»	10,0

Определена прочность сварного скрепления слоев образцов промышленных ламинатов и опытного образца между мембранным и несущим нетканым слоем повышенной плотности, а также между мембраной и защитным нетканым слоем малой плотности. Пробы готовили на механическом резке с шириной рабочей зоны 15 мм согласно ASTM D 882. Испытания проводили на универсальной испытательной машине Autograph AG-500N Xplus750 (10kN) Shimadzu (Япония) при скорости движения верхней траверсы 100 мм/мин с преднагрузкой не более 1 Н. Результаты измерения приведены на рисунке 3.31.



Рисунок 3.31 – Прочность сварного скрепления слоев образцов промышленных ламинатов и опытного образца

Определены значения паропроницаемости промышленных ламинатов и опытного образца согласно ASTM D6701 на приборе MOCON PERMATRAN-W 101K (США) при влажности 60 % и температуре 37 °С, результаты приведены на рисунке 3.32.

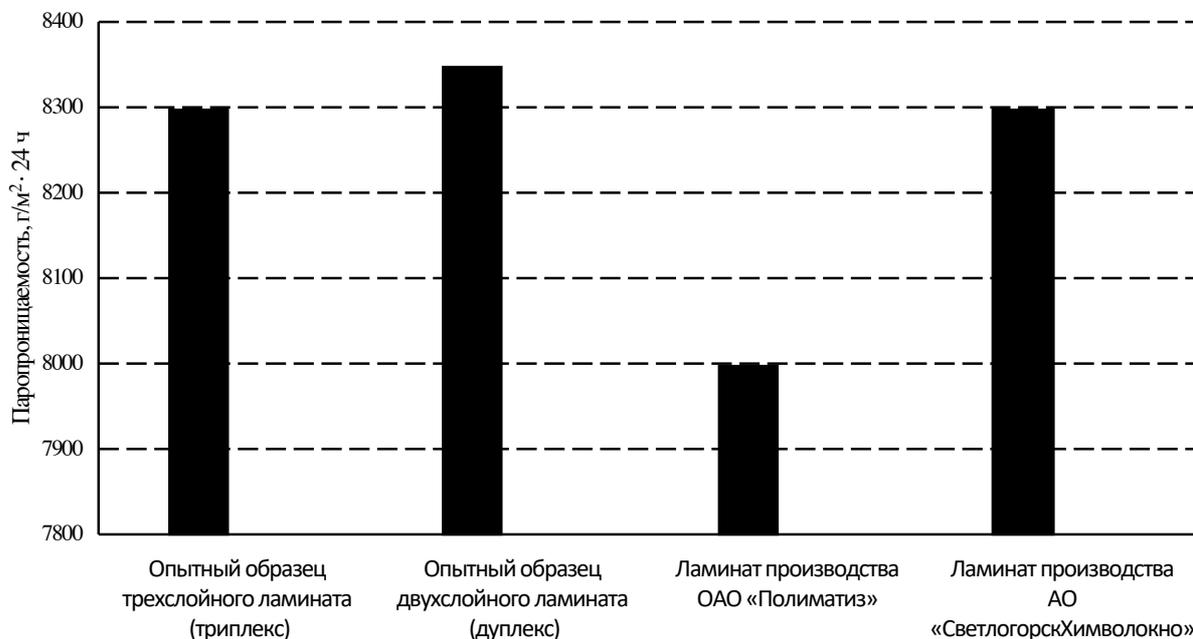


Рисунок 3.32 – Значения паропроницаемости образцов мембранных ламинатов

Как видно из полученных результатов (рисунок 3.32), опытные образцы двух- и трехслойных ламинатов по значениям паропроницаемости превосходят ламинат производства АО «Полимализ» примерно на 4 %. Опытный образец триплекса соответствует по данному показателю образцу ламината производства ОАО «СветлогорскХимволокно».

Результаты определения разрывной нагрузки и относительного удлинения при разрыве представлены на рисунках 3.33, 3.34.

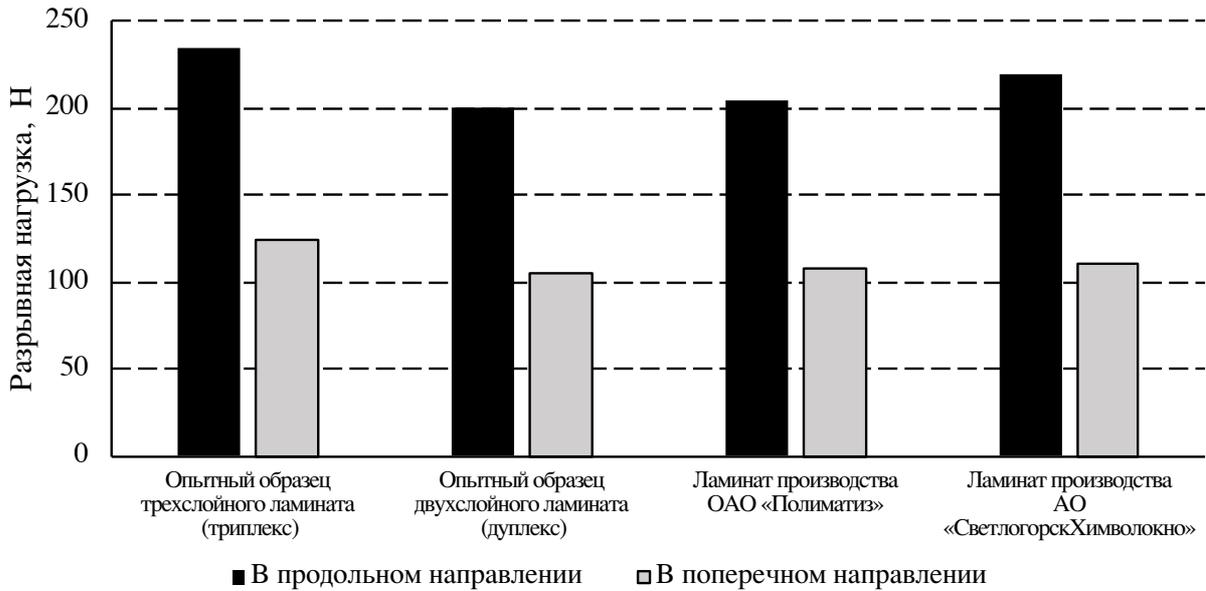


Рисунок 3.33 – Значения разрывной нагрузки образцов ламинатов

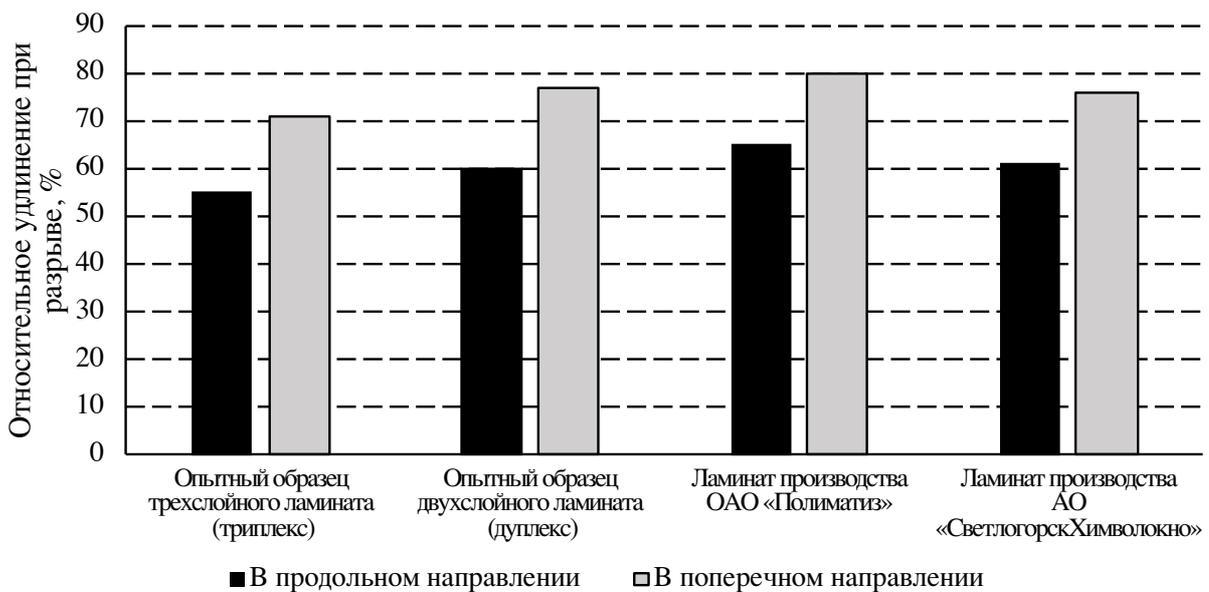


Рисунок 3.34 – Относительное удлинение при разрыве образцов ламинатов

Как видно из результатов физико-механических испытаний опытный образец трехслойного мембранного ламината обладает повышенной механической прочностью в сравнении с промышленными аналогами: нагрузка при разрыве выше на 15–16 % в сравнении с образцом ОАО «Полимагиз», и на 7–13 % превосходит по данному параметру образец АО «СветлогорскХимволокно». Относительное удлинение при разрыве, напротив, у опытного образца ниже, чем у

аналогов: на 11–15 % в сравнении с образцом ОАО «Полиматиз», и на 7–10 % относительно образца АО «СветлогорскХимволокно». Опытный образец двухслойного ламината обладает меньшей в сравнении с аналогами механической прочностью и на 10 % большим по сравнению с опытным образцом триплекса разрывным удлинением.

Испытания на водоупорность образцов ламинатов (рисунок 3.35) показали, что опытный образец триплекса превосходит ламинат АО «Полиматиз» на 23 %, а образец АО «СветлогорскХимволокно» – на 33 %. Опытный образец дуплекса уступает по значениям водоупорности промышленным аналогам.

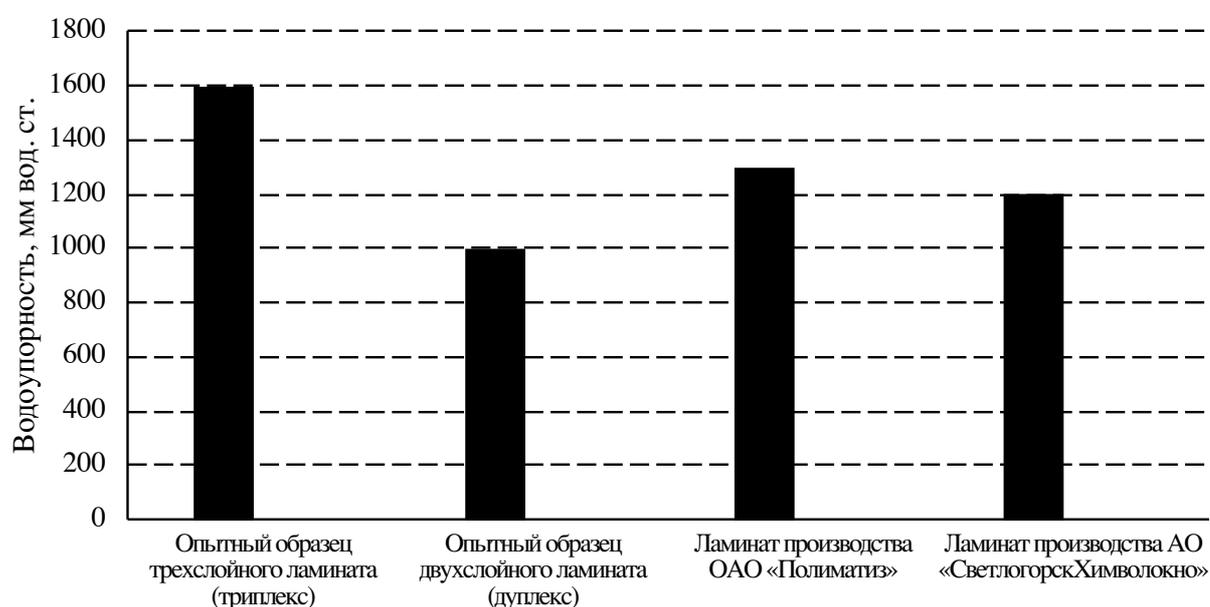


Рисунок 3.35 – Значения водоупорности образцов ламинатов

Исследовано влияние истирающей нагрузки на водоупорность мембранных текстильных ламинатов. Истирание проводили в соответствии с ГОСТ Р 51552-99 на приборе для истирания Rub Tester 2000 SUTHERLAND (Danilee Co., США). Образцы трехслойных ламинатов подвергали истиранию со стороны защитного нетканого слоя, дуплекс испытывался со стороны мембраны. Результаты представлены на рисунке 3.36.

Как видно из результатов, представленных на рисунке 3.36, опытный образец двухслойного ламината отличается малой устойчивостью к истирающей нагрузке со стороны мембраны и теряет 70 % водоупорности при 50 циклах истирания, и

95 % – при 300 циклах. Для образцов триплексов опытного и промышленных аналогов характерно постепенное снижение водоупорности при истирании на 6,3–15,4 % при 50 циклах и 23,1–25,0 % при 300 циклах истирания, что связано с наличием у триплексов защитного нетканого слоя, устойчивого к истиранию.

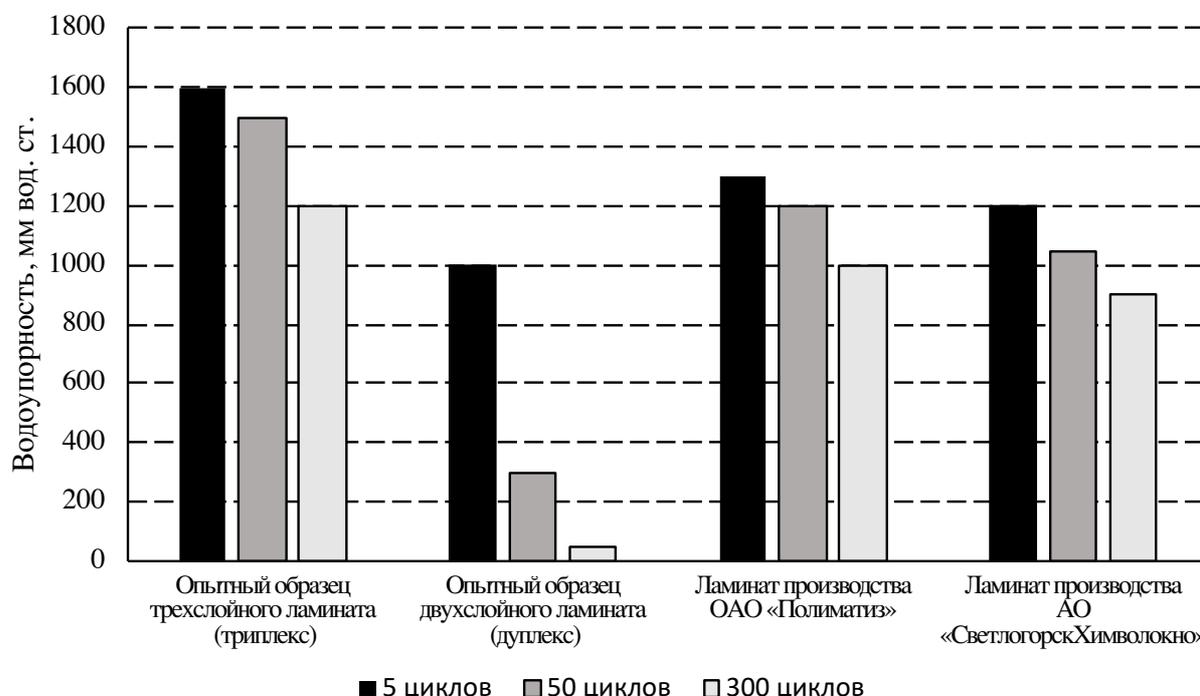


Рисунок 3.36 – Влияние абразивного истирания на водоупорность мембранных текстильных ламинатов

Результаты проведенных испытаний показали, что образцы двухслойных мембранных ламинатов отличаются пониженной механической прочностью и устойчивостью свойств к истиранию. Образцы триплексов за счет наличия дополнительного защитного нетканого слоя обладают устойчивостью к истирающим воздействиям и повышенной механической прочностью, при этом опытный образец ламината обладает сопоставимой с аналогами паропроницаемостью, повышенной до 16 % прочностью, пониженным до 15 % относительным удлинением при разрыве, повышенной до 33 % водоупорностью.

Таким образом, на основе проведенных исследований для получения мембранных текстильных материалов технического назначения наиболее целесообразно использовать трехслойный ламинат с разработанной паропроницаемой мембраной (образец № 1). Данный материал демонстрирует

оптимальное сочетание показателей функциональных свойств с эксплуатационными характеристиками. Основные показатели качества опытного мембранного трехслойного ламината представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Значения показателей эксплуатационных свойств мембранных текстильных материалов

Наименование показателя	Опытный образец трехслойного мембранного ламината (триплекс)	Ламинат производства АО «Полиматиз»	Ламинат производства АО «Светлогорск Химволокно»
Стойкость к истиранию, циклов (до значений водоупорности 1000 мм вод.ст., не менее)	450	300	150
Паропроницаемость, г/(м ² ×24 ч)	8300	8000	8300
Водоупорность, мм вод. ст.	1600	1300	1200
Разрывная нагрузка, Н - в продольном направлении - в поперечном направлении	235 125	205 108	220 111
Относительное удлинение при разрыве, % - в продольном направлении - в поперечном направлении	55 71	65 80	61 76
Раздирающая нагрузка, Н - в продольном направлении - в поперечном направлении	135 112	141 110	137 111
Прочность сварного скрепления слоев между мембраной и несущим нетканым слоем, Н/15 мм	1,85	1,55	1,66

Анализ литературных источников, представленный в главе 1, показал, что среди технических текстильных материалов перспективную группу представляют материалы, которые обеспечивают надежную гидроизоляцию и вместе с этим обладают высокой паропроницаемостью, теплоотражающими и рядом других специальных свойств [48, 52, 53, 66–70]. В связи с этим практический интерес представляет придание разработанным мембранным текстильным материалам дополнительных теплоотражающих свойств, что позволит их использовать в

качестве многофункциональных текстильных материалов в строительных конструкциях (п. 3.4).

3.4 Исследование влияния металлизации на свойства мембранного технического текстильного материала

Для придания текстильным материалам теплоотражающих свойств возможно применение методов металлизации их поверхности, среди которых перспективным является метод магнетронного распыления, позволяющий наносить тонкие равномерные металлические покрытия и характеризующийся высокой производительностью и отсутствием деструктирующего воздействия на поверхность полимерных материалов [50, 114, 123, 124, 128, 129]. При этом для повышения адгезии металлических покрытий к полимерным материалам актуально использование предварительной активации поверхности подложки перед нанесением покрытий методом магнетронного распыления в едином вакуумном цикле [119, 126, 135]. В качестве напыляемого металла целесообразно использование алюминия, что обусловлено его экономической доступностью и высокими свето- и теплоотражающими свойствами [128, 129, 132, 135].

В качестве наиболее рационального состава мембранного текстильного материала для дальнейших исследований предложено использовать трехслойный ламинат (триплекс). В целях придания трехслойному ламинату теплоотражающих свойств предложено наносить алюминиевые покрытия на поверхность мембраны перед скреплением слоев ламината. Схема структуры мембранного текстильного материала технического назначения с металлическим теплоотражающим покрытием представлена на рисунке 3.37.

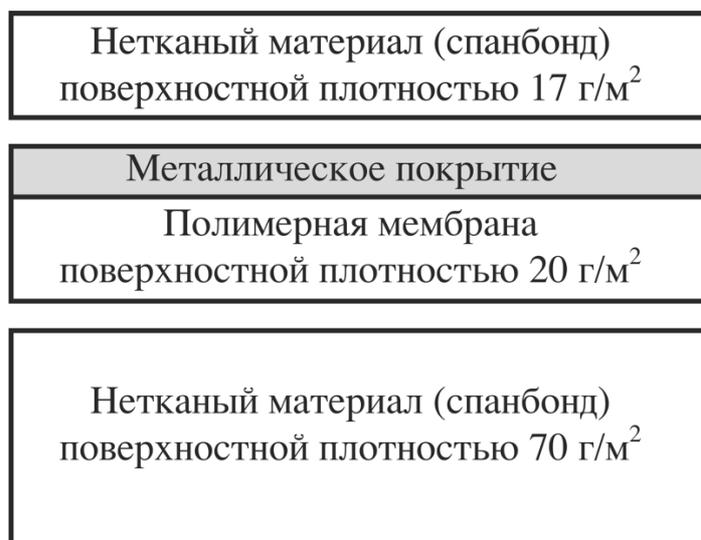


Рисунок 3.37 – Схема структуры ламинированного мембранного текстильного материала технического назначения с металлическим теплоотражающим покрытием

Анализ ранее проведенных исследований показал, что одним из перспективных методов активации поверхности полимерных материалов перед их металлизацией методом магнетронного распыления является использование ВЧЕ плазменной модификации [127, 134, 135]. При этом для повышения технологичности целесообразно наносить металлические покрытия методом магнетронного распыления с предварительной ВЧЕ плазменной модификацией в едином вакуумном цикле [127, 134, 135].

Для плазменной модификации и металлизации полимерной мембраны в едином вакуумном цикле использовали модульную вакуумную установку Plasma Modular производства ООО «ПИ ВИ ЭС», г. Казань. Установка настроена на предварительную активацию поверхности плазмой ВЧЕ-разряда пониженного давления в режиме: удельная мощность ВЧЕ разряда, отнесенная к площади ВЧ-электрода (W_{rf}) – 0,16 Вт/см²; продолжительность обработки (τ_{rf}) – 4 мин; давление в рабочей камере (P_{rf}) – 30 Па; плазмообразующий газ – аргон/воздух (70/30). Данный режим продемонстрировал свою эффективность для предварительной обработки поверхности полиолефиновых материалов перед нанесением

металлического покрытия методом магнетронного распыления, что подробно исследовано в работах [127, 133, 135].

Непосредственно после ВЧЕ плазменной обработке в установке Plasma Modular в едином вакуумном цикле проводили нанесение слоя алюминия методом магнетронного распыления алюминиевой мишени в режимах: удельная мощность магнетрона, отнесенная к площади мишени (W_m) – 25–5 Вт/см²; давление в рабочей камере (P_m) – 0,5 Па; продолжительность процесса металлизации (τ_m) – 0,5–1,5 мин в плазмообразующем газе аргон. В качестве мишени использовали алюминий марки А99 (ГОСТ 11069-2019). Для обеспечения разрушения поверхностной оксидной пленки на распыляемой мишени из алюминия использовался импульсный режим с частотой 20 кГц с коэффициентом заполнения импульсов 80 %.

Толщину наносимого на мембрану металлического покрытия регулировали значениями удельной мощности магнетрона (W_m) и продолжительностью процесса металлизации (τ_m). Толщина покрытия оценивалась методом конфокальной микроскопии по высоте «ступеньки» при металлизации модельных образцов из силикатного стекла. Оценку толщины металлического слоя непосредственно на поверхности пористой полимерной мембраны провести сложно в силу ее развитого рельефа. Для обеспечения высокой равномерности толщины покрытия, как показано в работах [127, 133, 135], расстояние от оси магнетрона выбиралось не более 100 мм. Напыление алюминиевого покрытия проводилось на образцы мембран размерами не более 210×297 мм. Перечень полученных образцов представлен в таблице 3.6.

Отражающая способность алюминиевого покрытия в оптическом диапазоне оценивалась по значениям оптической плотности мембран исходной и с металлическими покрытиями с помощью лабораторной установки TECHKON RT120 [210]. Результаты представлены в таблице 3.7.

Таблица 3.6 – Перечень образцов мембран с металлическим покрытием

Образец мембраны (рецептура)	Режим нанесения покрытия	Толщина алюминиевого покрытия, нм
Образец №1	$W_m = 5 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 0,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	< 20
Образец №1	$W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,0 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	50
Образец №1	$W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	80
Образец №1	$W_m = 25 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 0,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	90
Образец №1	$W_m = 25 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	100
Образец №1	$W_m = 25 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 2,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	120
Образец №3	$W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	80
Образец №3	$W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 2,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	110
Образец №6	$W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	80
Образец №6	$W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 2,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон	110

Таблица 3.7 – Оптическая плотность мембран при разной толщине алюминиевого покрытия

Толщина покрытия, нм	Оптическая плотность образца, усл. ед.
Без покрытия	0,47
< 20	0,95
50	1,30
80	2,30
100	2,40
110	2,45
120	2,45

Как видно из результатов (таблица 3.7), наибольшие, установленные на лабораторной установке ТЕСНКОМ RT120 значения оптической плотности образцов – 2,45 усл.ед. соответствуют толщине алюминиевого слоя 110 нм и с увеличением толщины не изменяются.

Оценку адгезии металлического слоя к подложке определяли по ASTM D3359 – 09 [211] с помощью липкой ленты 3М 610. Оценку проводили визуально по переносу слоя металла с поверхности мембраны на клеевой слой испытательной липкой ленты. Устойчивость металлического покрытия к сухому и мокрому трению определяли по ГОСТ 9733.27-83, оценку проводили визуально по шкале серых эталонов по ГОСТ 9733.0-83. Результаты приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Оценка адгезии металлического покрытия к поверхности мембраны

Толщина алюминиевого покрытия, нм	Предварительная ВЧЕ-плазменная активация поверхности	Балльная оценка адгезии металлического покрытия к подложке	Устойчивость металлического покрытия к сухому трению, баллы	Устойчивость металлического покрытия к мокрому трению, баллы
20	-	2	3	3
	+	4	4	4
50	-	2	3	3
	+	4	4	4
80	-	2	3	3
	+	4	4	4
100	-	1	2	2
	+	3	3	3
110	-	1	2	2
	+	3	3	3
120	-	1	2	2
	+	2	3	3

Результаты, представленные в таблице 3.8, показывают, что применение предварительной ВЧЕ плазменной активации позволяет повысить адгезию алюминиевого слоя к полимерной поверхности. Однако при повышении толщины покрытия свыше 80 нм наблюдается постепенное снижение адгезии покрытия к подложке, что, вероятно, связано с накоплением напряжений в системе при повышении температуры и проявлении усадки подложки в процессе металлизации. Данный эффект подтверждается результатами, полученными методом КЛСМ (рисунок 3.38а и 3.38г).

Результаты КЛСМ металлизированных мембран представлены на рисунке 3.38.

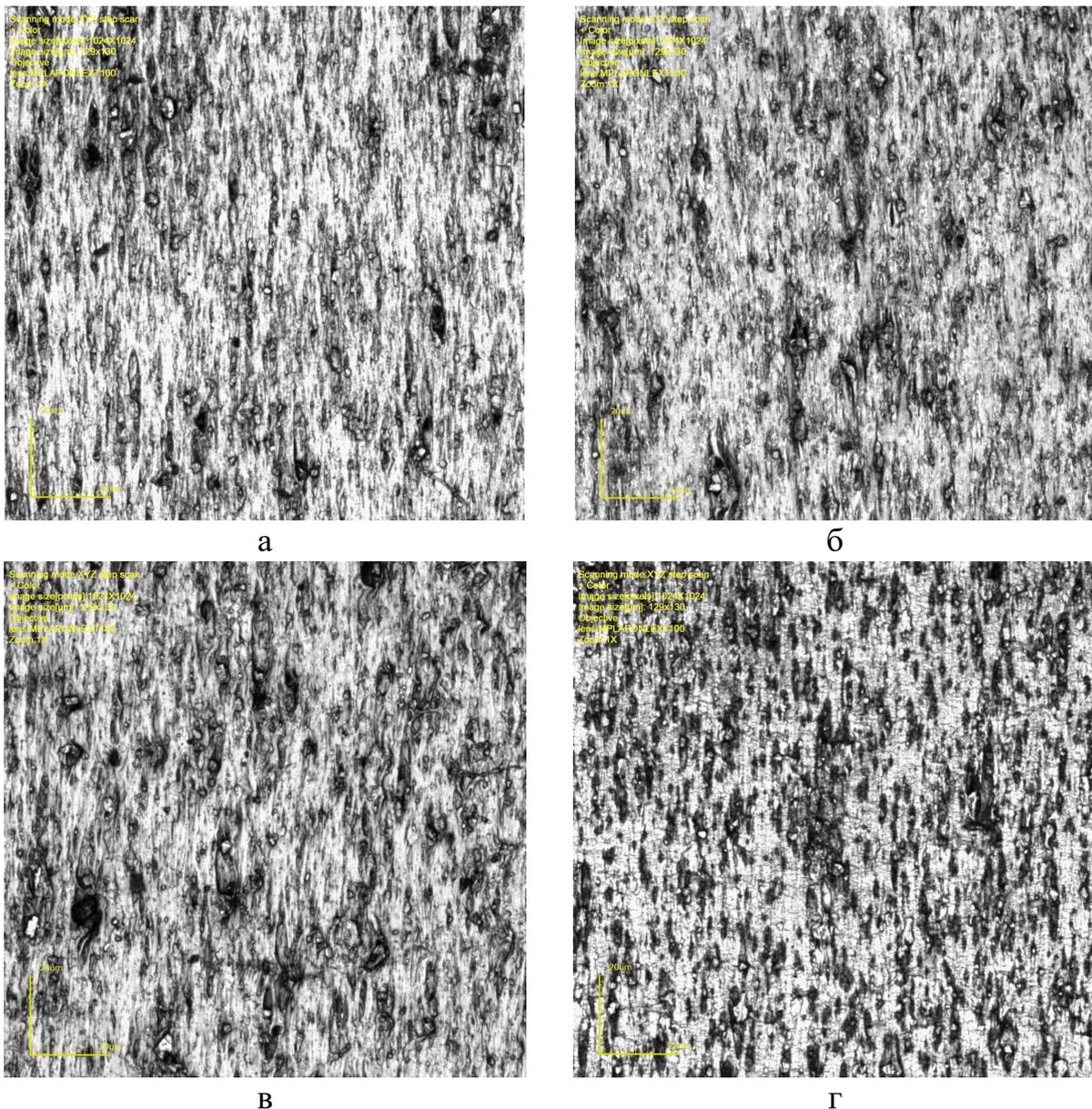


Рисунок 3.38 – Результаты КЛСМ образцов металлизированных мембран ($\times 60$):

а – мембрана (образец № 1), металлизированная в режиме $W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон;

б – мембрана (образец № 3), металлизированная в режиме $W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон;

в – мембрана (образец № 6), металлизированная в режиме $W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон;

г – мембрана (образец № 1), металлизированная в режиме $W_m = 25 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 0,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон

Как видно из полученных изображений, процесс металлизации существенно повысил контрастность КЛСМ съемки в режиме лазерного освещения, что позволило наглядно представить пористую структуру образцов. По результатам КЛСМ видны отличия пористой структуры поверхности образцов, полученных при разной температуре вытяжки в процессе MDO. Образец №1 (рисунок 3.38а) отличается высоко ориентированной структурой пор вдоль направления вытяжки, с увеличением температуры вытяжки (образец №3 и образец №6, рисунки 3.38б и 3.38в, соответственно) степень ориентации пористой структуры снижается. При использовании режима металлизации с высокими значениями удельной мощности магнетрона наблюдается значительная термоусадка мембраны, что отчетливо заметно по изменению пористой структуры (рисунок 3.38г). Усадка полимерной пленки сопровождается появлением множества дефектов металлического слоя.

На основе значений оптической плотности и отсутствию признаков термоусадки образцов для дальнейших исследований выбран режим нанесения алюминиевого покрытия: $W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон с предварительной ВЧЕ плазменной обработкой поверхности в режиме $W_{rf} = 0,16 \text{ Вт/см}^2$; $\tau_{rf} = 4 \text{ мин}$; $P_{rf} = 30 \text{ Па}$; плазмообразующий газ аргон/воздух (70/30).

Влияние процесса металлизации на пористую структуру образцов мембран исследовано методом газо-жидкостной порометрии. Результаты представлены на рисунке 3.39.

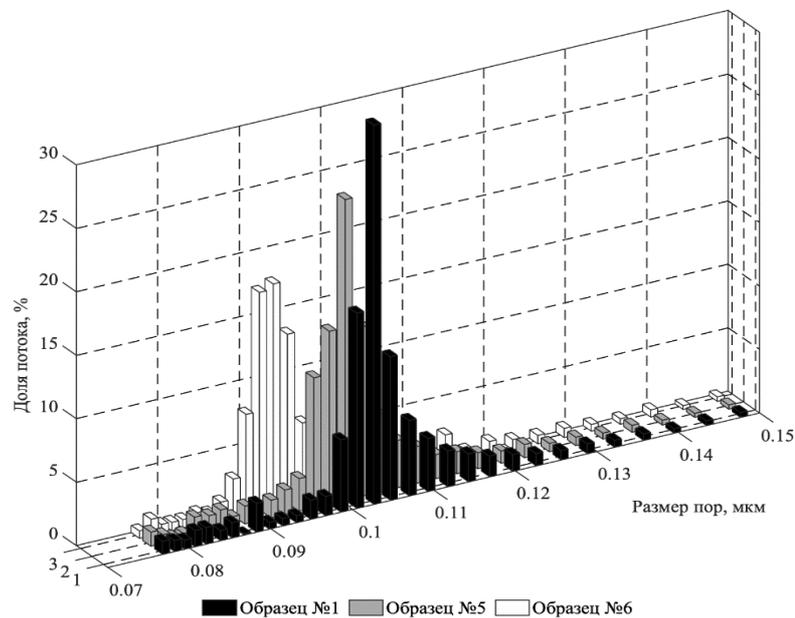
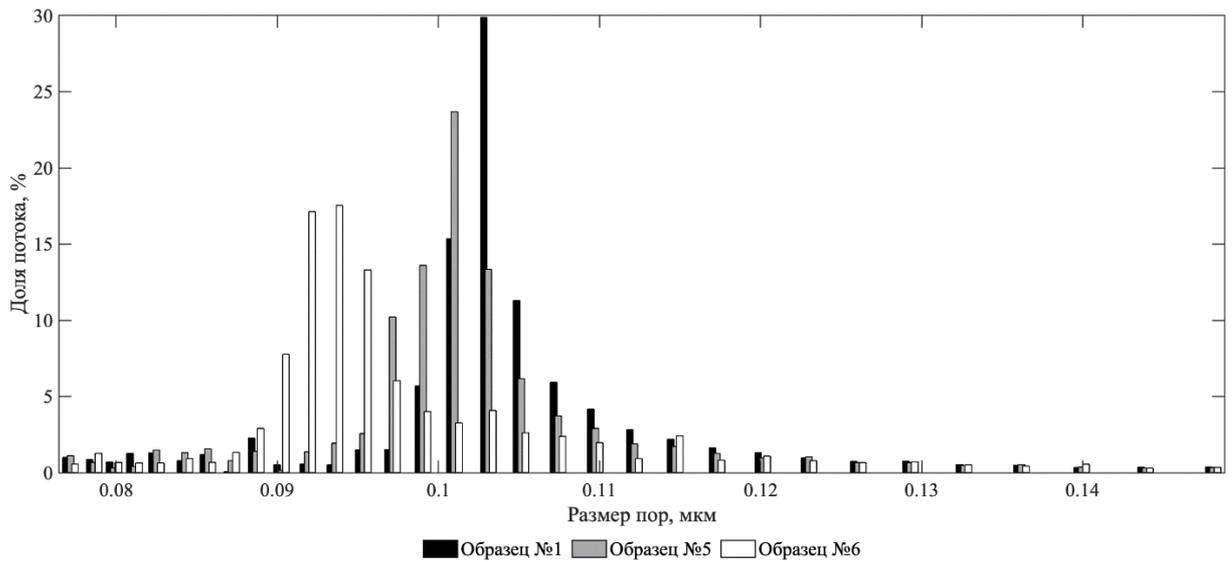


Рисунок 3.39 – Дифференциальное распределение сквозных пор по размерам на основе результатов газо-жидкостной порометрии (корректирующая дифференциальная кривая) образцов металлизированных мембран

Результаты газо-жидкостной порометрии (рисунок 3.39) изменения структуры транспортных пор мембраны:

- образец №1 после металлизации демонстрирует два характерных размерных диапазона транспортных пор 0,077–0,092 мкм с долей потока 10,16 % и 0,092–0,140 с долей потока 87,91 %, преобладает размер транспортных пор около 0,104 мкм с долей потока 30 %;

- образец №5 демонстрирует наибольшую долю потока для пор в диапазоне размеров 0,090–0,130 мкм, охватывающую 68,16 % с преобладающим размером пор 0,100 мкм с долей потока 23,69 %.

- образец №6 имеет преобладающее количество транспортных пор в диапазоне размеров 0,082–0,115 мкм с долей потока 85,07 % с преобладающим размером пор 0,093 мкм с долей потока 17,54 %.

Таким образом, после металлизации мембрана, полученная по методике для образца № 1, характеризуется наибольшим размером сквозных пор и их количеством, что определяет ее высокую паропроницаемость.

На основе металлизированных мембран получены образцы трехслойных ламинатов (триплексов). Внешний вид и КЛСМ-изображение образца представлены на рисунке 3.40.

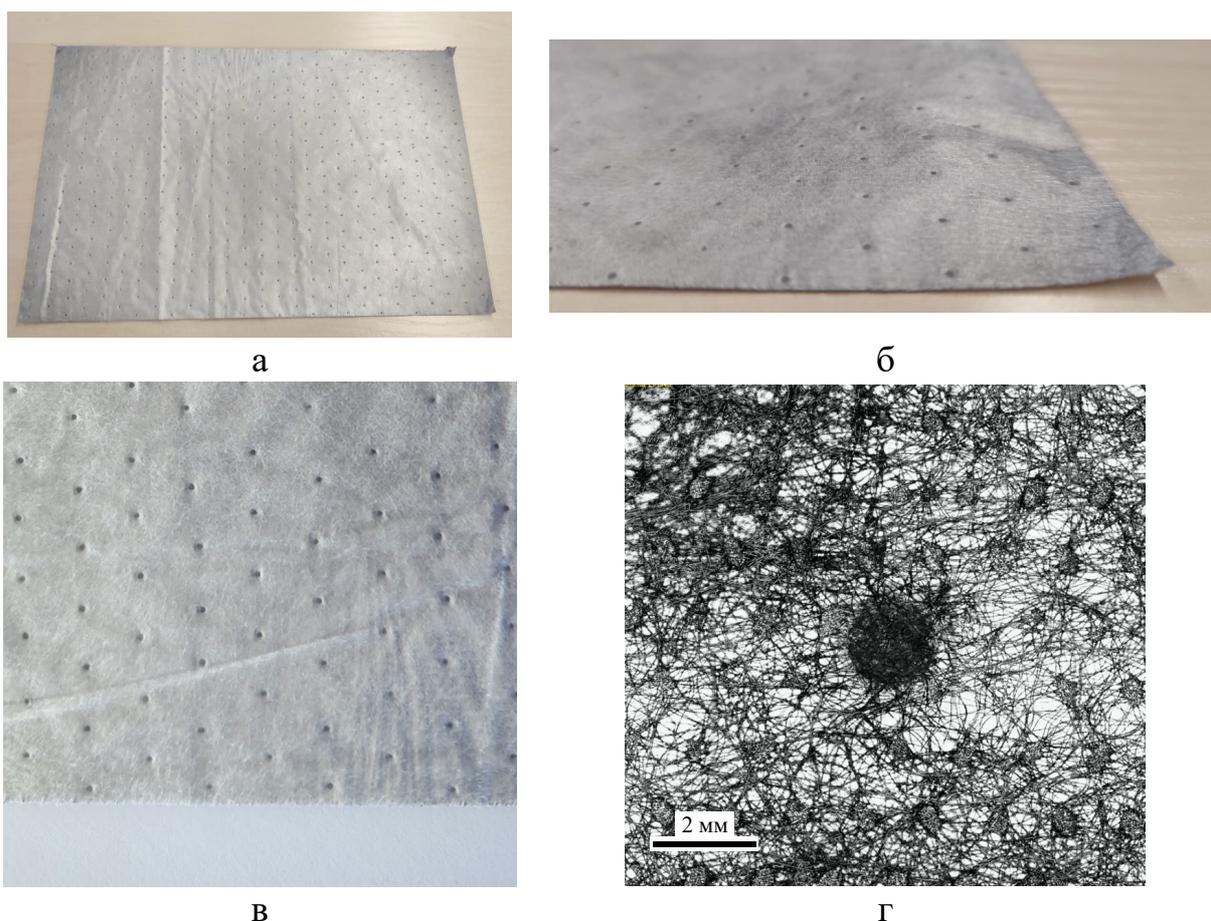


Рисунок 3.40 – Образец мембранного трехслойного ламината с алюминиевым слоем: а, б, в – внешний вид образца; г – КЛСМ-изображение поверхности образца

Исследовано влияние металлизации на функциональные и эксплуатационные свойства мембранных текстильных материалов, результаты представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Значения показателей эксплуатационных свойств мембранных текстильных материалов с металлическим слоем

Наименование показателя	Опытный трехслойный ламинат с не металлизированной мембраной по рецептуре образца №1	Опытный трехслойный ламинат с металлизированной мембраной по рецептуре образца №1
Стойкость истиранию, циклов (до значений водоупорности 1000 мм вод.ст., не менее)	450	450
Паропроницаемость, г/(м ² ×24 ч)	8300	7800
Водоупорность, мм вод. ст.	1600	1600
Разрывная нагрузка, Н - в продольном направлении - в поперечном направлении	235 125	250 135
Относительное удлинение при разрыве, % - в продольном направлении - в поперечном направлении	55 71	50 65
Раздирающая нагрузка, Н - в продольном направлении - в поперечном направлении	135 112	135 112
Прочность сварного скрепления слоев между мембраной и несущим нетканым слоем, Н/15 мм	1,85	1,85

Как видно из полученных результатов (таблица 3.9), процесс металлизации мембран не значительно влияет на показатели эксплуатационных свойств трехслойных ламинатов: значения паропроницаемости снижаются на 6 %; нагрузка при разрыве повышается на 6–8 %; относительное удлинение при разрыве снижается на 8–9 %. Значения водоупорности и ее стабильность при истирающей нагрузке, а также значения раздирающей нагрузки и прочность сварного скрепления слоев сохраняются неизменными.

Исследовано влияние металлизации мембраны на теплоотражающие свойства трехслойных текстильных ламинатов. Исследования проводили на лабораторной установке, состоящей из инфракрасного источника (ИК-лампа ЭРА ИКЗК 220-250 R127 мощностью 250 Вт, г. Белгород); кронштейна для закрепления образца материала и тепловизора testo 875-2i (Testo SE & Co. KGaA, Германия).

ИК-источник размещался за вертикально закрепленным образцом материала на расстоянии 30 см со стороны защитного нетканого слоя. Съемку термограммы производили через 180 секунд работы ИК-источника на расстоянии 1 м от образца со стороны несущего нетканого слоя. Съемка проводилась при температуре воздуха 25 °С. Обработку термограмм проводили с применением ПО testo IRSoft (Testo SE & Co. KGaA, Германия). Результаты представлены на рисунке 3.41.

Образец без металлического слоя нагревался за 180 секунд до температуры выше 100 °С (рисунок 4.41а). Образец с металлизированной мембраной с толщиной металлического покрытия менее 20 нм значительно отличается по способности пропускать ИК-излучение. Температура с внешней стороны образца при работе ИК-источника в течение 180 секунд не превышала 75 °С (рисунок 4.41б). Наименьшими зарегистрированными значениями температуры внешней поверхности образца после 180 секунд работы ИК-источника обладает образец мембранного ламината, содержащий металлический слой толщиной 80 нм. Температура с внешней стороны образца не повышалась в течение эксперимента выше 50 °С (рисунок 4.41в).

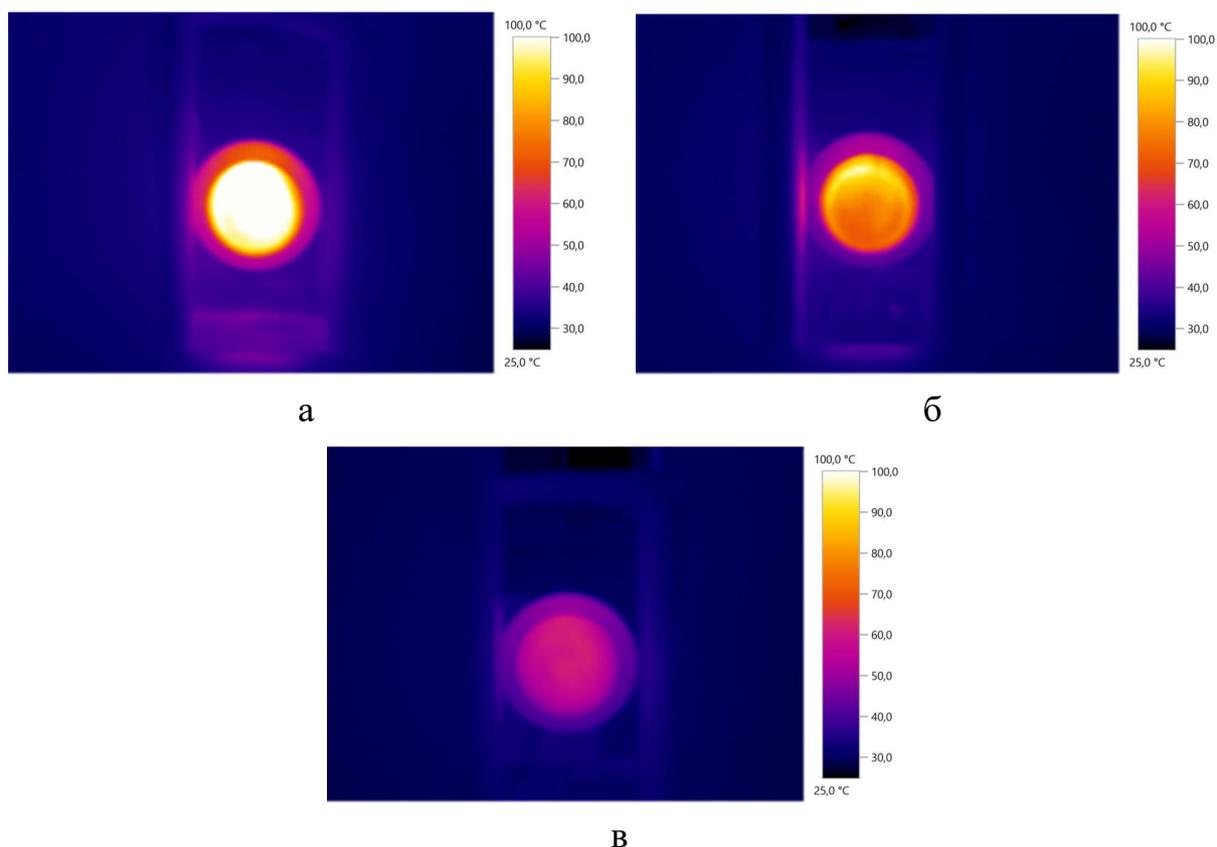


Рисунок 3.41 – Термограммы образцов ламинатов, снятые через 3 мин работы ИК-источника: а – образец с не металлизированной мембраной; б – образец с мембраной, металлизированной в режиме: $W_m = 5 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 0,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон (толщина алюминиевого покрытия $< 20 \text{ нм}$); в – образец с мембраной, металлизированной в режиме: $W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон (толщина алюминиевого покрытия 80 нм)

Таким образом, при температуре источника 115 °C значения отраженной температуры для не металлизированного образца составила 15 °C , для образца с металлическим слоем толщиной до 20 нм – 40 °C , для образца с металлическим слоем толщиной 80 нм – 65 °C . На основе значений отраженных температур образцов согласно закону Стефана–Больцмана (формулы (3.2)–(3.5)) проведен оценочный расчет коэффициентов отражения теплового излучения материалов (таблица 3.10) [212, 213]:

$$\Phi_0 = \sigma T^4, \quad (3.2)$$

где Φ_0 – суммарный тепловой поток с единицы поверхности абсолютно черного тела, Вт/м²;

σ – постоянная Стефана–Больцмана, $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²×К⁴);

T – абсолютная температура поверхности, изучаемого объекта, К.

$$\Phi = \varepsilon_T \sigma T^4, \quad (3.3)$$

где Φ – суммарный тепловой поток с единицы реального объекта, Вт/м²;

ε_T – интегральный коэффициент излучения (черноты) реального объекта.

$$\rho = \frac{\Phi_{\text{отраженный}}}{\Phi_{\text{падающий}}}, \quad (3.4)$$

где ρ – коэффициент отражения;

$\Phi_{\text{отраженный}}$ – отраженный поток излучения, Вт/м²;

$\Phi_{\text{падающий}}$ – падающий поток излучения, Вт/м².

$$\varepsilon + \rho + \tau = 1, \quad (3.5)$$

где ε – интегральный коэффициент излучения объекта;

τ – коэффициент пропускания.

Таблица 3.10 – Результаты оценочного расчета коэффициентов отражения и пропускания ИК-излучения полученных образцов ламинатов

Образец	Абсолютная температура источника (T_0), К	Абсолютная температура, отраженная образцом (T), К	Интегральный коэффициент излучения материала (ε), отн. ед. [156]	Постоянная Стефана–Больцмана (σ), Вт/(м ² ×К ⁴) [213]	Коэффициент отражения (ρ), отн. ед.	Коэффициент пропускания (τ), отн. ед.
Ламинат без металлического слоя	393	288	0,16	$5,67 \times 10^{-8}$	0,29	0,55
Ламинат с металлическим слоем, толщиной менее 20 нм	393	313	0,07	$5,67 \times 10^{-8}$	0,40	0,53
Ламинат с металлическим слоем, толщиной 80 нм	393	338	0,07	$5,67 \times 10^{-8}$	0,55	0,38

Полученные результаты свидетельствуют о том, что нанесение металлического покрытия способствует значительному повышению теплоотражающих свойств мембранных ламинатов. Нанесение слоя алюминия толщиной 80 нм приводит к повышению значений коэффициента отражения ИК-излучения на 90 %. Наряду с повышением теплоотражающих свойств процесс металлизации мембран не оказывает значительного влияния на показатели эксплуатационных свойств ламинатов: значения паропроницаемости снижаются на 6 %; нагрузка при разрыве повышается на 6–8 %; относительное удлинение при разрыве снижается на 8–9 %. Значения водоупорности и ее стабильность при стирающей нагрузке, значения раздирающей нагрузки и прочность сварного скрепления слоев сохраняются неизменными.

Таким образом, в качестве мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами рекомендовано использовать трехслойный ламинат, состоящий из несущего ПП нетканого полотна (спанбонд) с поверхностной плотностью 70 г/м²; паропроницаемой полимерной мембраны, наполненной на 60 мас.% дисперсным кальцитом, одноосно-ориентированной при температуре тянущей пары линии MDO – 85 °С с коэффициентом вытяжки 5,5, поверхностной плотностью 20 г/м²; на мембрану рекомендовано наносить методом магнетронного распыления теплоотражающий слой из алюминия толщиной 80 нм; для защиты поверхности теплоотражающей мембраны от механических воздействий рекомендовано использовать нетканое ПП полотно (спанбонд) с поверхностной плотностью 17 г/м². Скрепление слоев ламината рекомендовано проводить методом точечной УЗ-сварки с плотностью распределения пятен скрепления по поверхности не выше 3,5 %.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МЕМБРАННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРИАЛА С ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ

В главе приведены рекомендации по технологии производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами. В перечень технологических рекомендаций входят производство паропроницаемой пористой мембраны с последующим нанесением металлического теплоотражающего покрытия, а также процесс ламинирования методом точечной УЗ сварки с неткаными материалами в качестве несущего и защитного слоев. Рекомендовано промышленное оборудование для получения паропроницаемой мембраны, оборудование для нанесения на мембрану теплоотражающего покрытия, а также оборудование для скрепления мембраны с неткаными полотнами в трехслойный ламинат. Произведена оценка экономической эффективности производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами. Данные, приведенные в главе, опубликованы в статье [214].

4.1 Описание оборудования для производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами

Производство ориентированной пористой мембраны для мембранного ламината рекомендовано осуществлять на экструзионной выдувной или плоскощелевой линии. Производственный процесс включает в себя экструзию полуфабриката, формирование пористой структуры при одноосном растяжении полотна (в режимах, апробированных на пилотной линии MDO), отделку (нанесение металлического покрытия методом магнетронного распыления), обрезку кромки.

Экструзию и одноосное растяжение пленочного полуфабриката предлагается осуществлять на многослойной соэкструзионной линии, оснащенной узлом одноосной ориентации в продольном направлении (MDO) – VAREX (Германия) производительностью в диапазоне 300–800 кг/ч (таблица 4.1, рисунок 4.1).

Таблица 4.1 – Основные технические характеристики соэкструзионной линии, оснащенной узлом одноосной ориентации в продольном направлении VAREX

Наименование параметра и единица измерения	Величина
Управление технологическим процессом	Автоматическое
Потребляемая мощность, кВт, не более	500
Габаритные размеры, мм	18000 × 15000 × 4200
Масса, кг, не более	15000
Узел экструзии	
Производительность, кг/ч	300–800
Диапазон ширины полотна, мм	1600–2600
Щелевой зазор головки, мм	1,25–2,25
Температурный профиль экструдера, °С	50–280
Количество соэкструзионных слоев	3
Количество дозаторов на слой	3–5
Узел ориентации (MDO)	
Ширина полотна, мм	1200–2100
Зазор между тянущей парой, мм	30–60
Температурные профили секций MDO, °С	50–160
Количество секций	4
Теплоноситель	Вода
Максимальная степень вытяжки	1:10

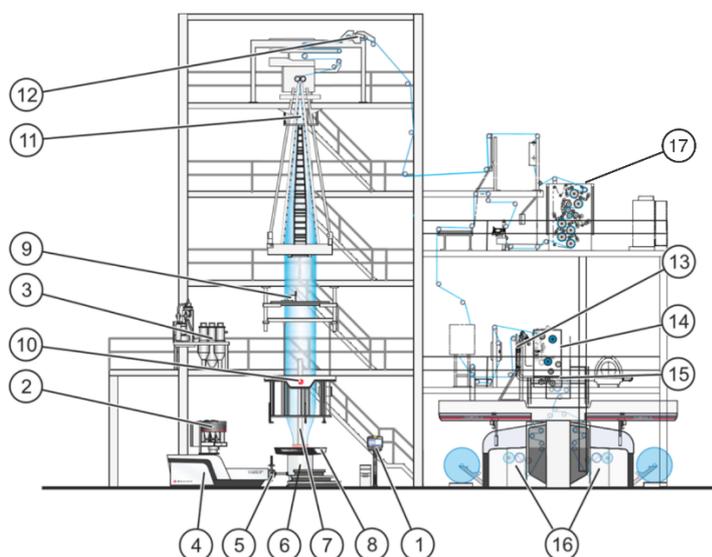


Рисунок 4.1 – Внешний вид экструзионной линии VAREX: 1 – главный пульт управления; 2 – дозирующее устройство; 3 – всасывающая система подачи; 4 – экструдер; 5 – устройство смены сит; 6 – выдувная головка; 7 – система внутреннего охлаждения; 8 – система наружного охлаждения; 9 – толщиномер; 10 – калибровочный короб; 11 – устройство вытягивания пленки; 12 – устройство измерения ширины; 13 – регулятор хода полотна; 14 – секция активации поверхности коронным разрядом; 16 – намотчик; 17 – узел продольной ориентации (MDO)

Гранулят транспортируется всасывающей системой подачи из бункеров хранения в дозирующую систему, в которой каждый компонент взвешивается отдельными весовыми агрегатами. Непосредственно перед попаданием в экструдер гранулят подается шнеками в смесительную камеру, где осуществляется смешивание всех компонентов.

Для изготовления выдувных пленок в основном применяются одношнековые экструдеры, их назначение заключается в подаче, пластификации и гомогенизации гранулированных сырьевых материалов (на основе термопластов). Экструдеры выдавливают расплав под высоким давлением для формирования пленочного рукава в экструзионный агрегат (выдувную головку).

Охлаждение потока расплава от температуры экструзии до температур кристаллизации осуществляется посредством равномерного обдува пленочного

рукава охлаждающим воздухом изнутри и снаружи. Охлаждение пленки основано на принципе воздухообмена путем подачи холодного воздуха и отсоса теплого через патрубки.

Пленочный рукав проходит через калибровочный короб вертикально снизу-вверх, при этом несущие балки с направляющими сегментами охватывают пленку по окружности и поддерживают ее, тем самым стабилизируя и придавая форму. Сканирование толщины и профиля пленки осуществляется бесконтактно емкостным датчиком толщиномера, установленным в измерительной головке на вращающейся траверсе.

Устройство вытягивания пленки состоит из вытягивающего модуля и складывающего устройства. Пленочный рукав вытягивается из выдувной головки и складывается в пленочное полотно (плоское складывание). При этом все устройство вытягивания пленки совершает регулярные вращательные движения вперед-назад (реверсирование) вокруг центральной оси пленочного рукава с целью распределения допусков толщины пленки по всей ширине полотна.

Измеритель ширины определяет ширину плоско сложенного пленочного полотна. Сканирование ширины производится двумя инфракрасными световыми барьерами отражательного типа (сканирующими головками), установленными в измерительных балках. Программное обеспечение машины отображает измеряемые величины и посредством корректировки размеров калибровочного короба регулирует ширину плоско сложенного пленочного рукава.

Неориентированное полотно поступает через систему валов в узел продольной ориентации (рисунок 4.2), натяжение полотна поддерживается валом, оснащенным тензодатчиком. В классическом исполнении узел MDO имеет четыре секции, отличающиеся по своему функционалу. Секция преднагрева представлена двумя последовательно расположенными металлическими валами. Ее функция заключается в равномерном повышении температуры материала до температуры ориентации, так чтобы пленка не имела жестких складок и других температурных дефектов. Секция ориентации представлена двумя металлическими валами (быстрым и медленным) «тянущей пары», работающими при зазоре от 20 до 60 мм.

После секции ориентации полотно поступает на секцию термофиксации, представленную двумя последовательно установленными металлическими валами. В ходе термофиксации внутри ориентированного материала под действием температуры и понижения скорости вращения валов относительно секции растяжения происходят релаксационные процессы. На заключительном этапе ориентированный материал охлаждается двумя металлическими валами до температуры производственного цеха.

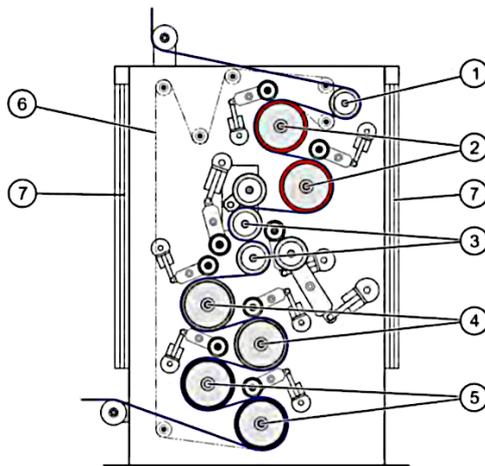


Рисунок 4.2 – Устройство узла продольной ориентации (MDO): 1 – измерительный вал с датчиком натяжения полотна; 2 – секция преднагрева; 3 – секция растяжения; 4 – секция термофиксации; 5 – секция охлаждения; 6 – втягивающее устройство; 7 – раздвижные двери

Ориентированное мембранное полотно разрезается по линии сгиба и наматывается как плоская пленка намотчиком в ролик с максимальным диаметром 900 мм.

Для нанесения металлического теплоотражающего слоя на мембранный пленочный материал предлагается использовать промышленную вакуумную установку «ВАТТ 4000-ВЧ-2М», разработанную ООО «Ферри Ватт» (г. Казань). Опытно-промышленную линию предлагается использовать для нанесения алюминиевого покрытия на пленочный ориентированный рулонный материал

методом магнетронного распыления с предварительной активацией поверхности ВЧЕ разрядом в одном производственном (вакуумном) цикле.

Установка «ВАТТ 4000-ВЧ-2М» является однокамерная периодического действия и содержит внутрикамерную машину для перемотки рулонного материала. Рабочий вакуум составляет от 5 до 50 Па. Плазменная обработка проводится в среде аргон/воздух (70/30), нанесение алюминиевого покрытия – в среде аргона (таблица 4.2, рисунок 4.3).

Таблица 4.2 – Основные технические характеристики установки «ВАТТ 4000-ВЧ-2М»

Наименование параметра и единица измерения	Величина
Предельное остаточное давление Па, не более (без оснастки и рулона)	1×10^{-4}
Рабочее давление, Па, в диапазоне	5–50
Ширина рулона, мм, не более	1500
Максимальный диаметр рулона, мм	250
Максимальная масса рулона, кг	150
Скорость подачи рулонного материала, мм/мин	от 75 до 2000
Управление технологическим процессом	Автоматическое / ручное
Номинальная мощность, кВт, не более	140
Средняя потребляемая мощность, кВт, не более	60
Мощность, подаваемая в ВЧ разряд, кВт, не более	3
Мощность, потребляемая МРС, кВт, не более	30
Электропитание	380/220 В, 50 Гц
Расход охлаждающей воды, м ³ /ч	15
Габаритные размеры установки (без учета стойки системы управления и чиллера) (Д × Ш × В), мм	3500 × 1500 × 2100
Масса установки, кг, не более	3500

При нанесении покрытия методом магнетронного распыления над поверхностью мишени формируется тлеющий разряд, локализованный магнитной ловушкой. При бомбардировке мишени ионами инертного газа происходит ее распыление. Распыленный материал осаждается на мембрану, образуя металлическое покрытие.

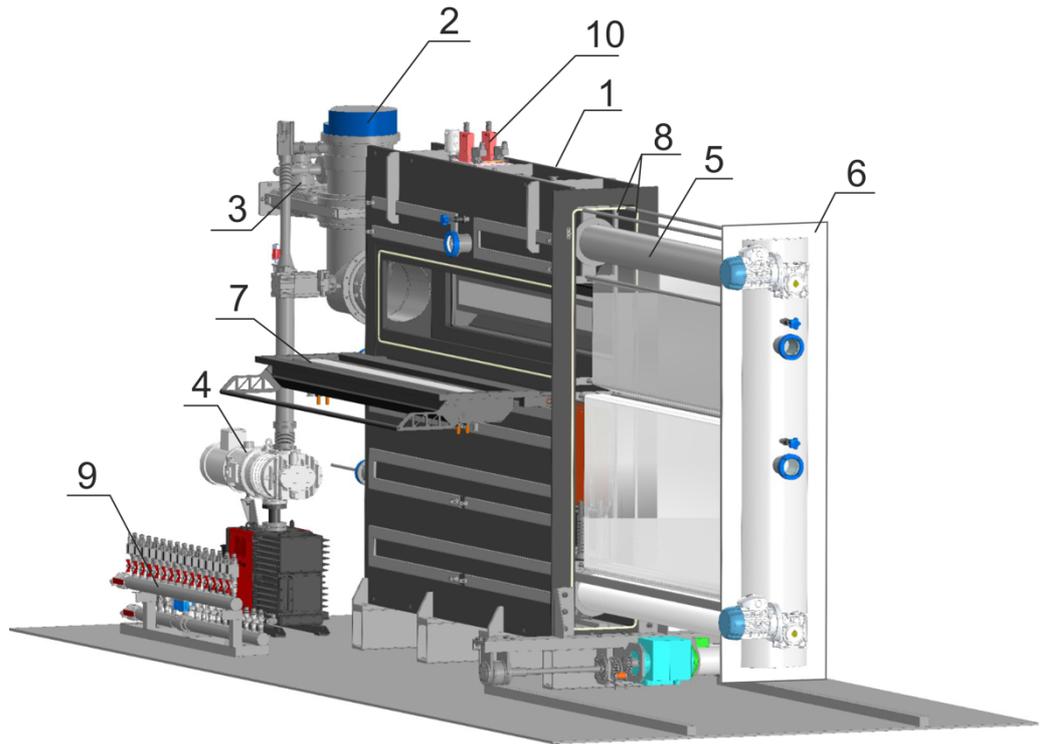


Рисунок 4.3 – Общий вид установки «ВАТТ 4000-ВЧ-2М»: 1 – вакуумная камера с внутрикамерной оснасткой; 2 – высоковакуумный насос; 3 – высоковакуумный затвор; 4 – форвакуумный агрегат; 5 – перематывающее устройство; 6 – дверь камеры; 7 – магнетрон в откидывающейся двери; 8 – ВЧ-электроды; 9 – система водяного охлаждения; 10 – система подачи газа

Вакуумная камера (поз. 1) изготовлена из нержавеющей стали. Установка и сьем рулона мембраны осуществляется через фланец, находящийся в боковой части камеры (поз. 6). По периметру корпуса дополнительно установлено внешнее водяное охлаждение. Трубопровод для вакуумирования камеры установлен в задней части камеры. Магнетроны размерами 1600×70 мм интегрированы в двери вакуумной камеры, что облегчает замену мишени магнетрона. В качестве источника питания магнетрона используется АРЕL-М-50ВР.

Электроды с подведенным водяным охлаждением установлены внутри вакуумной камеры (рисунок 4.3), один из которых заземлен на корпус, а два других активные (поз. 8), при этом питание реализовано через ВЧ генератор Advanced

Energy Cesar 1350, 400V и согласующее устройство (СУ) Advanced Energy VM 5000W.

Внутрикамерная машина для перемотки рулонных материалов (поз. 5) имеет два приводных вала с приводами от асинхронных двигателей. Натяжение полотна регулируется тензометрическими датчиками на валу. Опытно-промышленная линия предназначена для проведения процесса ВЧ-плазменной активации и нанесения металлических покрытий методом магнетронного распыления мишени последовательно или отдельно.

После нанесения металлического покрытия на мембранное полотно рекомендуется произвести раскрой полуфабриката перед ламинированием с неткаными материалами для удаления некондиционной кромки. Для данной операции предполагается использование линии бобинорезки типа ConSlitter KAMPF [215] (Германия).

Скрепление металлизированной мембраны в трехслойный ламинат рекомендуется производить на промышленной или опытнo-промышленной линии, оснащенной узлом ультразвуковой сварки Sonic Digital HS3 от компании WEBER ULTRASONICS (Германия) [216], с шириной полотна до 1600 мм, производительностью 50 м/мин.

4.2 Разработка технологических рекомендаций по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами

На базе экспериментальных данных, описанных в главе 3, для промышленного производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами предложены следующие технологические стадии:

– Ориентация пленки-полуфабриката при температуре тянущей пары узла MDO от 80–90°C. В зависимости от сырьевого состава коэффициент растяжения на

тянущей паре должен быть в пределах 4–6. При наработке промышленных партий следует обратить внимание на коэффициент термической усадки ориентированного полотна (не выше 8 % в продольном направлении, в поперечном – 0 %). Целевыми показателями при наработке являются поверхностная плотность, паропроницаемость, водоупорность и коэффициент термической усадки (КТУ).

– Обработка ориентированного мембранного материала в плазме ВЧЕ разряда при пониженном давлении в режимах: $W_{rf} = 0,16 \text{ Вт/см}^2$; $\tau_{rf} = 4 \text{ мин}$; $P_{rf} = 30 \text{ Па}$; плазмообразующий газ аргон/воздух (70/30).

– Нанесение, непосредственно после ВЧЕ плазменной обработки, на ориентированный мембранный материал алюминиевого покрытия толщиной не менее 80 нм с активированной стороны методом магнетронного распыления в режимах $W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон.

– Скрепление металлизированной мембраны с нетканым несущим и защитным полотнами методом точечной УЗ-сварки с плотностью распределения пятен скрепления по поверхности не выше 3,5 %.

Блок-схема технологического процесса производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами представлена на рисунке 4.4.

В ходе испытаний опытных образцов мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами (таблица 4.3) установлено, что изделия, полученные в рамках технологических рекомендаций, обладают высокими значениями паропроницаемости и теплоотражения, что обеспечит повышение энергоэффективности зданий при использовании данного материала.

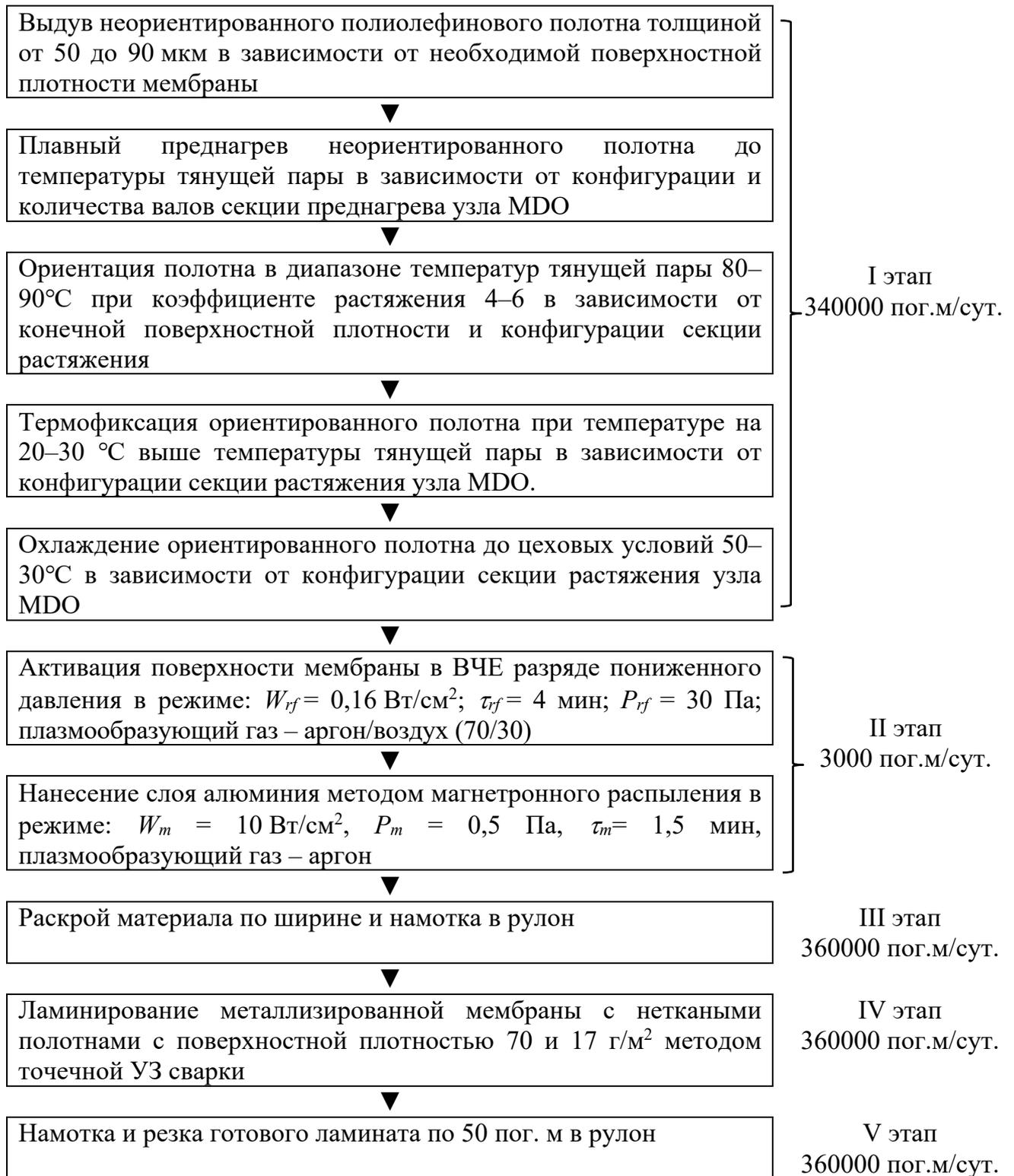


Рисунок 4.4 – Блок-схема технологического процесса производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами

Таблица 4.3 – Результаты испытаний опытных образцов мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами

Наименование показателя	Значение показателя	Материал-аналог ОАО «СетлогоскХимволокно» (Республика Беларусь)
Поверхностная плотность, г/м ²	110	117
Паропроницаемость, г/м ² ×24 ч	7800	8300
Водоупорность, мм.вод.ст.	1600	1200
Разрывная нагрузка, Н - в продольном направлении - в поперечном направлении	250 135	220 111
Относительное удлинение при разрыве, % - в продольном направлении - в поперечном направлении	50 65	61 76
Прочность сварного скрепления слоев между мембраной и несущим нетканым слоем, Н/15 мм	1,85	–
Стойкость к истиранию, циклов (до значений водоупорности 1000 мм вод.ст., не менее)	450	350
Коэффициент отражения ИК-излучения, отн. ед.	0,55	0,30

4.3 Обоснование экономической эффективности производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами

По технологическим рекомендациям, описанным в п. 4.2, рассчитана с экономической точки зрения эффективность производственного цикла для мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами. Расчет экономической эффективности осуществляется на основе данных по вводу в производственный цикл следующих линий:

- промышленная экструзионная линия с узлом ориентации (MDO);

– опытно-промышленная линия для нанесения металлических покрытий на рулонные материалы методом магнетронного распыления с предварительной подготовкой поверхности в плазме ВЧЕ разряда пониженного давления «ВАТТ 4000-ВЧ-2М» (п. 4.1);

– линия бобинорезки типа ConSlitter KAMPF;

– линия, оснащенная узлом ультразвуковой сварки Sonic Digital HS3.

В таблице 4.4 представлены данные по экономическим затратам, связанные с закупкой и вводом новых производственных линий по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами. Для промышленного производства спрогнозирован штат сотрудников и фонд заработной платы в таблице 4.5. Расходные и сырьевые производственные материалы в таблице 4.6.

Подсчет затрат на ввод в производство оборудования, на фонд заработной платы на сырье и расходные материалы осуществляется на основе среднего количества рабочих дней в году. Тариф на электроэнергию на второй квартал 2023 года составляет 4,68 руб./кВт×ч. Затраты на электроэнергию ($Z_э$), заработную плату (Z_n) и годовую программу (Z_{zn}) рассчитываются по формулам 4.1–4.3.

$$Z_э = Э_{по} \times T_ч \times T_д \times C_э, \quad (4.1)$$

$$Z_{zn} = (Z_n + НО) \times T_m, \quad (4.2)$$

$$Z_{zn} = Z_э + Z_{zn} + C_o + P_m, \quad (4.3)$$

где $Э_{по}$ – средняя потребляемая электроэнергия производственной линии, кВт; $T_ч$ – рабочее время производственной линии в день, ч; $T_д$ – количество рабочих дней в год; $C_э$ – стоимость электроэнергии, руб./кВт×ч; Z_n – заработная плата в месяц, руб.; $НО$ – налоговые отчисления из заработной платы в месяц, руб.; T_m – количество рабочих месяцев в году; C_o – стоимость оборудования, руб.; P_m – расходы на обслуживание производственной линии, руб.

Оценка экономического эффекта для производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами рассчитывается на основе прибыли от оптовых продаж готового изделия. Произведен анализ рынка мембранных технических текстильных материалов.

Таблица 4.4 – Перечень затрат для ввода в производство оборудования

Затраты	Экструзионная линия	ВАТТ 4000-2М-ВЧ	Линия бобинорезки	Перемоточный станок с УЗ сваркой
Стоимость, млн руб.	200	90	80	130
Время работы в день, ч	24	24	24	24
Средняя потребляемая мощность, кВт	100	60	50	50
Текущее обслуживание, млн руб./год	5,5	3,5	1	1

Таблица 4.5 – Затраты на заработную плату

Затраты	Оператор экструзионной линии	Помощник оператора экструзионной линии	Оператор линии вакуумных покрытий	Оператор линии бобинорезки	Оператор линии ультразвуковой ламинации	Слесарь-наладчик
Количество, чел	4	8	6	6	6	6
Заработная плата, руб./мес.	75000	55000	70000	60000	65000	60000
Процент отчислений на социальное страхование, %	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2	30,2
Сумма отчислений на социальное страхование, руб./(мес. ×чел.)	22650	16610	21140	18120	18120	16610

Таблица 4.6 – Затраты на сырье и расходные материалы

Расходный материал	Кол-во, шт.	Ресурс, раб. дн.	Стоимость, руб.	Затраты на год, руб.
Аргон, ОСЧ	1	10	5000	180 000
Алюминиевая мишень	2	1	35000	25 200 000
Прочее	-	-	-	500 000

* – Расход аргона определен для баллона 40 л, 15 МПа, при объемном расходе 400 н.см³/мин в течении 12 часов в рабочий день. Стоимость включает в себя заправку баллона и транспортные расходы

Результаты расчета экономической эффективности производственного цикла для мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Расчет экономической эффективности производства

Наименование показателя	Значение
Годовой выпуск мембраны с теплоотражающими свойствами, шт. (рулоны по 50 м)	20 736
Затраты на аренду помещения, руб/год	5 000 000
Стоимость материала спанбонд 70 г/м ² , руб/кг	350
Стоимость материала спанбонд 17 г/м ² , руб/ кг	300
Стоимость пористой мембраны, руб/ кг	200
Затраты на расходные материалы, руб/кг	142,37
Оптовая цена мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами, шт. (рулоны по 50 м)	10 000
Прибыль от реализации руб/год	141 391 967
Экономическая эффективность (на конец 1 года), руб.	-78 608 032,8
Экономическая эффективность (на конец 2 года), руб.	62 783 934,4

Рассчитана экономическая эффективность производственного цикла для изготовления мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами, которая составляет 62,8 млн. руб. в год со сроком окупаемости 2 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа исследований и известных решений в области мембранных технических текстильных материалов, методов их производства и модификации обоснована актуальность разработки мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами с применением отечественного сырья и технологий.

2. Для создания мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами предложено сформировать трехслойный ламинат, включающий полимерную одноосно-ориентированную мембрану с металлическим теплоотражающим покрытием, ламинированную с неткаными ПП полотнами в качестве несущего и защитного слоев.

3. На основе результатов экспериментальных и теоретических исследований:

– установлено, что для получения мембранного технического текстильного материала, сочетающего водоупорность с высокими значениями паропроницаемости и коэффициента отражения теплового излучения, необходимо методом точечной УЗ-сварки сформировать трехслойный ламинат, включающий несущий нетканый слой, полимерную одноосно-ориентированную мембрану с алюминиевым покрытием, защищенную нетканым слоем;

– экспериментально установлено, что температура и скорость одноосной ориентации дисперсно-наполненной мембраны на основе полиэтилена и полипропилена определяют ее пористую структуру; при температуре тянущей пары 85 °С и коэффициенте вытяжки 5,5 формируется равномерная в объеме пористая структура с многослойной системой щелевидных пор, образующих сквозные каналы в диапазоне размеров 0,115–0,140 мкм, что обеспечивает значения паропроницаемости до 11000 г/(м²×24 ч) и водоупорности – 1490 мм вод.ст.;

– экспериментально установлено, что температура и скорость одноосной ориентации дисперсно-наполненной мембраны на основе полиэтилена и полипропилена приводит к существенным изменениям ее надмолекулярной

структуры, в частности вытяжка при температуре 85 °С приводит к формированию упорядоченной равномерной фибриллярной структуры;

– разработана молекулярно-динамическая модель влияния температуры одноосной ориентации на надмолекулярную структуру мембраны на основе полиэтилена и полипропилена, показывающая, что в результате растяжения при температуре 85 °С молекулярная система характеризуется наименьшей потенциальной энергией, что связано с достижением наибольшей упорядоченности и ориентации структуры;

4. Разработаны технологические рекомендации по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами, включающие одноосную ориентацию дисперсно-наполненной полимерной мембраны в установленных режимах на промышленной линии, предварительную ВЧЕ плазменную обработку и нанесение теплоотражающего покрытия в едином вакуумном цикле на промышленной установке с системой перемотки рулонов, ламинирование мембраны с неткаными полотнами методом точечной УЗ сварки, а также оценку экономической эффективности от внедрения разработки в производство.

Экономическая эффективность внедрения разработки составляет 62,8 млн руб. в год со сроком окупаемости 2 года.

Перспективы дальнейшего развития темы заключаются в развитии подходов формирования и модификации структуры полимерных мембран и получения на их основе ламинированных текстильных материалов разнообразного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харапудько, Ю.В. Исследование гигиенических свойств пористых полиэтиленовых пленок с минеральным наполнителем / Ю.В. Харапудько, М.Д. Гаврилов, О.В. Вишневская [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 103–105.
2. Харапудько, Ю.В. Исследование механических и структурных свойств полиэтиленовых пленок с минеральным наполнителем / Ю.В. Харапудько, М.Д. Гаврилов, О.В. Вишневская [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 11. – С. 102–105.
3. Усманова, Э.Д. Способы получения многофункциональных текстильных материалов с различными полимерными покрытиями / Э.Д. Усманова, И.В. Усманов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – № 11. – С. 283–284.
4. Липатова, Л.А. Разработка методов оценки и исследование формовочной способности многослойных композиционных текстильных материалов: дис... канд. техн. наук. – Москва, 2017. – 201 с.
5. Corovic, E. Current Trends on the World Textile Market and the Competitiveness of the Serbian Textile Industry / E. Corovic, P. Jovanovic, L. Ristic // *Fibres and Textiles in Eastern Europe*. – 2013, vol. 101, №. 5, p. 8–12.
6. Ясинская, Н.В. Теоретические и технологические основы формирования комбинированных текстильных материалов: автореф. дис. док. тех. наук: 05.19.02 / Ясинская Наталья Николаевна; Российский государственный университет им. А. Н. Косыгина – Витебск-Москва, 2019. – 33 с.
7. Ясинская, Н.Н. Термообработка при формировании композиционных текстильных материалов: монография / Н.Н. Ясинская, В.И. Ольшанский, А.Г. Коган. – Витебск: УО «ВГТУ», 2019. – 161 с.
8. Cherenack, K. Smart textiles: Challenges and opportunities / K. Cherenack, L. van. Pieterse // *Journal of Applied Physics*. 2012, vol. 112, №. 9, P. 1–15.

9. Kang, Y.K. Application of Electrospun Polyurethane Web to Breathable Waterproof Fabrics / Y.K. Kang, C.H. Park, J. Kim, T.J. Kang // *Fibers and Polymers*. – N. 8/5. – 2007. P. 564–570.
10. Holms, D.A. Waterproof Breathable Fabrics / A.R. Horrocks, and S.C. Anand [eds] // *Handbook of Technical Textiles*, The Textile Institute. – Wood Cambridge, England: Head Publishing Ltd., 2000, P. 282–315.
11. Айзенштейн, Э.М. Полиэфирные волокна: сегодня и завтра / Э.М. Айзенштейн // *Деловой журнал Neftegaz.RU*. – 2017. – № 4. – С. 49–55.
12. Sen, A.K. Coated Textiles: Principles & Applications / A.K Sen. // *Technomic Publishing Co. Inc.*, Lancaster. – 2001. P. 133–154.
13. Gretton, J.C. Moisture Vapor Transport through Waterproof Breathable Fabric and Clothing Systems under a Temperature Gradient / J.C. Gretton, D.B. Brook, H.M. Dyson, S.C. Harlock // *Textile Research Journal*. – 1998. V. 68/12. – P. 936–941.
14. Yadav, A.K. Breathability in Polymeric Coatings / A.K Yadav, N. Kasturiya, G.N Mathur // *ManMade Textiles in India*. – 2002. – V. 45/2. – P. 56–60.
15. White, P.A. Retroflective Fabrics and Method of Production. Extracts from European Patent Applications / P.A. White, M.J. Sleeman, P.R. Smith // *Primary Industry, Fixed Constructions*. – 2004 – V. 20(14): 1261. – EP 1402107.
16. W.L. Gore and Associates (США) под брендом Gore-Tex. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.gore.com/products/categories/consumer-products?view=gore-tex-products> (дата обращения: 10.02.2023).
17. Toray Industries (Япония) с брендами FHM и SIMMS. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ecsaine.com/en/> (дата обращения: 10.02.2023).
18. Sympatex Technologies GmbH (Германия). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sympatex.com/membran/> (дата обращения: 10.02.2023).
19. UCB Chemicals (Бельгия). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.ucb.com/> (дата обращения: 10.02.2023).
20. Mitsubishi Heavy Industries Ltd. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mhi.com/products> (дата обращения: 10.02.2023).

21. Балашовский текстильный комбинат [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://newbaltex.ru/> (Дата обращения: 10.02.2023).
22. Текстайм [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.textime.ru/> (Дата обращения: 10.02.2023).
23. Чайковский текстиль [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://textile.ru/brands/climat> (Дата обращения: 10.02.2023).
24. Моготекс [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://mogotex.com/> (Дата обращения: 10.02.2023).
25. АО Полиматиз (ОЭЗ «Алабуга»). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://polymatiz.ru/polispan-stroj> (дата обращения: 10.02.2023).
26. ОАО СветлогорскХимволокно (Республика Беларусь). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.sohim.by/produktsiya/netkanye-materialy/medispan/> (дата обращения: 10.02.2023).
27. ООО «Гекса-Нетканые материалы». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://geha.ru/products/geksa/> (дата обращения: 10.02.2023).
28. Holms, D.A. Waterproof Breathable Fabrics / A.R. Horrocks, S.C. Anand // Handbook of Technical Textiles. – Cambridge: The Textile Institute, Wood Head Publishing Ltd, 2000. – P. 282–315.
29. Sen, A.K. Coated Textiles: Principles & Applications / A.K. Sen. – Basel: Technomic Publishing Co. Inc., 2001. – 241 p.
30. Gretton, J.C. Moisture Vapor Transport through Waterproof Breathable Fabric and Clothing Systems under a Temperature Gradient / J.C. Gretton, D.B. Brook, H.M. Dyson, S.C. Harlock // Textile Research Journal. – 1998. – N. 68/12. – P. 936–941.
31. Yadav, A.K. Breathability in Polymeric Coatings / A.K. Yadav, N. Kasturiya, G.N. Mathur // Man-Made Textiles in India. – 2002. – N. 45/2. – P. 56–60.
32. Save, N.S. Polyacrylamide based Breathable Coating for Cotton Fabric / N.S. Save, M. Jassal, A.K. Agrawal // Journal of Industrial Textiles. – 2002. – N. 32/2. – P. 119–138.
33. DELTA®-VENT S (PLUS) от компании DÖRKEN Membranes (Германия). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.doerken.com/ru/ru>

/produkty/membrany-plionki-i-sistemnye-aksessuary/membrany-plenki-aksessuary-dlya-skatnoj-krovli/membrany-dlya-montazha-po-splshnomu-nastilu/delta-vent-s-plus (дата обращения: 10.02.2023)

34. TYVEK SOLID от компании DuPont (США). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dupont.com/brands/tyvek.html> (дата обращения: 10.02.2023)

35. GRAND LINE 170 от компании MDM NT (Польша). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.grandline.ru/shop/krovlya/gidro-i-paroizolyaciya/gidro-i-paroizolyaciya-dlya-krovli-gl-silver/diffuzionnye-membrany-grand-line/membrana-superdiffuzionnaya-grand-line-170/> (дата обращения: 10.02.2023)

36. Ютавек 115 от фирмы JUTA (Чехия). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://juta.ru/> (дата обращения: 10.02.2023)

37. АЛЬФА ВЕНТ 130 от ООО «Завод Технофлекс». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://shop.tn.ru/> (дата обращения: 10.02.2023)

38. Deutsches Dachdeckerhandwerk Zentralverband [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://dachdecker.org/betriebsinhaber/regeluebersicht/> (дата обращения: 10.02.2023)

39. DIN EN 13967-2017. Flexible sheets for waterproofing – Plastic and rubber damp proof sheets including plastic and rubber basement tanking sheet – Definitions and characteristics; German version, 01.08.2017.

40. IN EN 13984-2013 Flexible sheets for waterproofing – Plastic and rubber vapour control layers – Definitions and characteristics, 01.05.2013.

41. DIN EN 13859-1:2014-07 Flexible sheets for waterproofing – Definitions and characteristics of underlays – Part 1: Underlays for discontinuous roofing, 01.05.2013.

42. Нестеров, В.Ю. Классификация подкровельной изоляции по правилам Союза немецких кровельщиков / В.Ю. Нестеров // Кровельные и изоляционные материалы. – 2015. – № 6. – С. 23–31.

43. ГОСТ Р (проект, первая редакция). Работы кровельные. Монтаж крыш с водоизоляционным слоем из битумосодержащих рулонных материалов. Правила и

контроль выполнения работ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.normacs.info/projects/9362> (дата обращения: 10.02.2023).

44. Айзенштейн, Э.М. Новое производство спанбонда в ОЭЗ «Алабуга» / Э.М. Айзенштейн // Текстильная промышленность. – 2010. – № 1. – С. 44–46.

45. Chellamani, K.P. Medical Textiles: The Spunlace process and its application possibilities for hygiene textiles / K.P. Chellamani, R.S. Vignesh Balaji, D. Veerasubramanian // Youth Education and Research Trust. – 2013. – Vol. 1(12). – С. 735–739.

46. Трещалин, Ю.М. Обоснование применения нетканых полотен для производства композиционных материалов на текстильной основе: дис... канд. тех. наук. – Кострома, 2013. – 212 с.

47. Денисова, Ю.В. Диффузионные мембраны в современном строительстве / Ю.В. Денисова, В.Н. Тарасенко, Р.В. Лесовик // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2016. – № 8. – С. 42–46.

48. Тутынина, С.В. Современные пароизоляционные материалы / С.В. Тутынина, О.Е. Сысоев // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: Материалы всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов: в 2 частях, Комсомольск-на-Амуре, 09–20 апреля 2018 года. Том Часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2018. – С. 113–118.

49. Игнатова, О.А. Технология изоляционных строительных материалов и изделий / О.А. Игнатова. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. – 288 с.

50. Пат. 2403328 РФ. Материал, отражающий инфракрасное излучение / Б.Л. Горберг, В.В. Веселов, И.Ю. Белова [и др.]. Заявл. 12.05.2009; опубл. 10.11.2010.

51. Мухамеджанов, Г.К. Анализ состояния производства и применения в России нетканых подкровельных материалов, используемых в строительстве / Г.К. Мухамеджанов, О.Г. Мухамеджанова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI ВЕКА. – 2013. – № 11(178). – С. 28–30.

52. DuPont TM Tyvek [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://falstroy.ru/upload/iblock/05a/05a1a9b704639ab47104a5f124798558.pdf> (дата обращения: 10.02.2023).

53. Порошин, В. Виды и особенности подкровельных пленок и мембран / В. Порошин // Кровельные и изоляционные материалы. – 2014. – № 4. – С. 8-11. – EDN THVGPV.

54. Пат. 2224856 РФ. Кровельный рулонный материал / С.С. Ковалев. Заявл. 23.09.2002, опубл. 27.02.2004.

55. Пат. на полезную модель 171895 РФ. Нетканый иглопробивной материал / Д.И. Файнер. Заявл. 26.09.2016, опубл. 20.06.2017.

56. Пат. на полезную модель 172165 РФ. Нетканый иглопробивной материал / Д.И. Файнер. Заявл. 26.09.2016, опубл. 29.06.2017.

57. Пат. на полезную модель 172167 РФ. Нетканый иглопробивной материал / Д.И. Файнер. Заявл. 26.09.2016, опубл. 29.06.2017.

58. Пат. 2654411 РФ. Нетканый иглопробивной материал (варианты) / Д.И. Файнер. Заявл. 26.09.2016, опубл. 17.05.2018.

59. Пат. 2553853 РФ. Полимерная диффузионная мембрана «форспласт-софт» / А.А. Осадчий. Заявл. 02.02.2012, опубл. 20.06.2015.

60. Сороколетова, Е.В. Применение паро-влагоизоляционных материалов ТЦ «Изоспан» в ограждающих конструкциях малоэтажного здания / Е.В. Сороколетова // Научное сообщество студентов. Междисциплинарные исследования: Электронный сборник статей по материалам XXII студенческой международной научно-практической конференции. – Новосибирск, 2017. – Т. 11(22). – С. 39–44.

61. Пат. на полезную модель 159477 РФ. Энергосберегающий дом / В.В. Шаршков. Заявл. 10.11.2015, опубл. 10.02.2016.

62. Пат. 2224856 РФ. Кровельный рулонный материал / С.С. Ковалев. Заявл. 23.09.2002, опубл. 27.02.2004.

63. Пат. 2633152 РФ. Кровельная изоляция / Й. Шреер, Й. Липпе, Р. Флайг, К. Харфманн. Заявл. 01.10.2015, опубл. 11.10.2017.

64. Пат. 2780070 РФ. Композитная пленка / Т. Бахон. Заявл. 25.09.2019, опубл. 19.09.2022.

65. Пат. 2651011 РФ. Многослойная комбинированная пленка для строительства / К. Харфман, Р. Лаур. Заявл. 04.08.2016, опубл. 18.04.2018.

66. Пат. 2469862 РФ. Подкровельное покрытие / А. Дрехслер, М. Чевалес. Заявл. 07.11.2008, опубл. 20.12.2012.

67. Пат. 2536882 РФ. Фунгицидная композиция для строительных конструкций (варианты) / Р.А. Веселовский. Заявл. 18.02.2013, опубл. 27.12.2014.

68. Попихина, Е.А. Защита строительных материалов от биоповреждения / Е.А. Попихина, Е.С. Трепова, С.С. Хазова // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 2. – С. 178–187.

69. Maienfisch, P. Thiazole and Isothiazole Ring-Containing Compounds in Crop Protection / P. Maienfisch, A.J.F. Edmunds // *Advances in Heterocyclic Chemistry*. – 2017. – Vol. 121. P. 35–88.

70. Ram, V.J. *The Chemistry of Heterocycles*. / V.J. Ram, A. Sethi, M. Nath, R. Pratap. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – 500 p.

71. Wu, P.C. Novel Microporous Films and Their Composites / P.C. Wu, G. Jones, C. Shelley, B. Woelfli // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. – 2007. – V. 2, I. 1 – P. 49–59.

72. Буркин, А.Н. Структура и свойства мембранных текстильных материалов / А.Н. Буркин, Д.К. Панкевич, В.Г. Кудрицкий // *Полимерные материалы и технологии*. – 2020. – Т. 6, № 3. – С. 16–28.

73. Логинова, Е.А. Анализ и систематизация ассортимента мембранных тканей для одежды / Логинова Е.А., Климова Н.А., Бесшапошникова В.И. // VI Международная научно-техническая конференция «Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности» (ИННОВАЦИИ-2020): сборник трудов. – М.: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2020. – С. 46–49.

74. Пат. 2422062 РФ. Способ получения отражающей мембраны и мембрана, полученная по этому способу / Г.Б. Виттманн, Х.Й.М. Ван де Вен Заявл. 26.09.2006; опубл. 27.06.2011.

75. Федосов, С.В. Строительные кровельные диффузионные мембраны: виды и характеристики, направление научных изысканий // С.В. Федосов, А.В. Маркелов, А.А. Лapidус, Д.В. Топчий // Строительные материалы. – 2022. – № 10. – С. 55–61.

76. Futurelight ТМ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://thenorthface.ru/technology/future-light/> (дата обращения: 10.02.2023).

77. Пат. 2688625 РФ. Композиция для получения паропроницаемой пористой мембраны / Л.Ю. Коссович, Ю.Е. Сальковский, К.В. Записис и др. Заявл. 27.03.2018; опубл. 21.05.2019.

78. Habibi, K. Effect of filler content, size, aspect ratio and morphology on thermal, morphological and permeability properties of porous talc filled-Polypropylene obtained through MEAUS process / K.Habibi, P. Castejon, A.B. Martinez, D. Arencon // *Advances in Polymer Technology*. – 2018. – V. 37. – P.3315–3324.

79. Xiong, B. Initiation of cavitation upon drawing of pre-oriented polypropylene film: In situ SAXS and WAXD studies / B. Xiong, J.Kang, R. Chen, Y. Men // *Polymer*. – 2017. – V. 128. – P. 57–64.

80. Castejon, P. Development of Inorganic Particle-Filled Polypropylene/High Density Polyethylene Membranes via Multilayer Co-Extrusion and Stretching // P. Castejon, M. Antunes, D. Arencon // *Polymers*. – 2021. – N. 13(2). – P. 306.

81. Sadeghi, F. Analysis of microporous membranes obtained from polypropylene films by stretching / F. Sadeghi, A. Ajji, P.J. Carreau // *J. Membr. Sci.* – 2007. – V. 292. – P. 62–71.

82. Tabatabaei, S.H. Effect of processing on the crystalline orientation, morphology, and mechanical properties of polypropylene cast films and microporous membrane formation / S.H. Tabatabaei, P.J. Carreau, A. Ajji // *Polymer*. – 2009. – V. 50. – P. 4228–4240.

83. Xiande, C. The study of room-temperature stretching of annealed polypropylene cast film with row-nucleated crystalline structure / C. Xiande, X. Ruijie, X. Jiayi, L. Yuanfei, L. Caihong, L. Liangbin // *Polymer*. – 2016. – V. 94. – P. 31–42.

84. Zeng, F. Effects of Heat Setting on the Morphology and Performance of Polypropylene Separator for Lithium Ion Batteries // F. Zeng, R. Xu, L. Ye, B. Xiong, J. Kang, M. Xiang, Z. Hao // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2019. – V. 58. – P. 2217–2224.

85. Tabatabaei, S.H. Structure and properties of MDO stretched polypropylene // S.H. Tabatabaei, P.J. Carreau, A. Ajji // *Polymer.* – 2009. – V. 50. – P. 3981–3989.

86. Saffar, A. The impact of new crystalline lamellae formation during annealing on the properties of polypropylene based films and membranes / A. Saffar, P.J. Carreau, A. Ajji, M.R. Kamal // *Polymer.* – 2014. – V. 55. – P. 3156–3167.

87. Saffar, A. Influence of stretching on the performance of polypropylene-based microporous membranes / A. Saffar, P.J. Carreau, A. Ajji, M.R. Kamal // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2014. – V. 53. – P. 14014–14021.

88. Lin, Y. A semi-quantitative deformation model for pore formation in isotactic polypropylene microporous membrane // Y. Lin, L. Meng, L. Wu, X. Li, X. Chen, Q. Zhang, L.Li // *Polymer.* – 2015. – V. 80. – P. 214–227.

89. Пат. 2446946 РФ. Многослойный гибкий плоский материал / Ш. Утхт, В. Крингс, М. Хенш. Заявл. 15.01.2009; опубл. 10.04.2012.

90. Пат. 137507 РФ. Теплоизоляционный материал / И.В. Сапунов, О.А. Попова, В.Н. Панина. Заявл. 27.06.2013; опубл. 20.02.2014.

91. Пат. 2553853 РФ. Полимерная диффузионная мембрана «ФОРСПЛАСТ-СОФТ» / А.А. Осадчий. Заявл. 02.02.2012; опубл. 20.06.2015.

92. Ceper, T. The assessment of elastomers in machine direction oriented breathable hygiene films for strengthening machine direction tear performance / T. Ceper, M.F. Erguney // *AIP Conference Proceedings.* – 2020. – V. 2205 (1). – P. 020061.

93. Пат. 2726526 РФ. Способы для обработки наполненных микропористых мембран // Ц. Го, Д.С. Питерс, Л.М. Парринелло. Заявл. 13.11.2017; опубл. 14.07.2020.

94. Castejon, P. Porous Membranes Based on Polypropylene-Ethylene Copolymers. Influence of Temperature on Extrusion, Annealing and Uniaxial Strain Stages / P. Castejon, D. Arencon, M. Antunes, V. Realinho, J.I. Velasco, A.B. Martinez // *Polymers.* – 2018. – № 10. – P. 0854.

95. Ozen, I. Effect of stretching temperature on breathability and waterproofness properties of polyethylene films containing different calcium carbonates / I. Ozen, S. Simsek // *Journal of Plastic Film & Sheeting*. – 2015. – V. 32(4). – P. 380–401. doi:10.1177/8756087915597025.

96. Серебренникова, Н.Д. Влияние воздействия ультрафиолетового облучения и циклических воздействий температуры на долговечность полимерных микропористых материалов для строительства кровельных и стеновых конструкций / Серебренникова Н.Д., Бояринов С.И., Федотов С.И., Афанасьева Г.В. // *Строительные материалы*. – 2014. – № 3. – С. 53–59.

97. Пат. 2620414 РФ. Кровельные мембраны, содержащие терморасширяющийся графит в качестве антипирена / Х. Ван, В. Чжоу, Д. Карр. Заявл. 31.12.2012; опубл. 25.05.2017.

98. Чучин, А.О. Основные виды и особенности эксплуатации кровельных систем из полимерных мембран / А.О. Чучин, Д.Н. Сурсанов // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. – 2020. – Т. 2. – С. 211–216.

99. Технониколь [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.tn.ru/upload/iblock/8bf/isyptaniya-MGU-_red.-Sendetskiy_.pdf (дата обращения: 10.02.2023).

100. Пат. 2527989 РФ. Устойчивый к загрязнению, воздухопроницаемый тканевый слоистый материал / Г.Л. Стургилл, М.И. Ходгинс, П.Д. Уолш, У.Г. Харди. Заявл. 06.05.2011; опубл. 10.09.2014.

101. Афанасьева, Г.В. Гидроветрозащитный барьер как важный элемент долговечных и безопасных зданий / Г.В. Афанасьева // *Жилищное строительство*. – 2015. – № 11. – С. 32–34.

102. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. – М: ФГУП ЦПП, 2004. – 145 с.

103. Абрамян, С.Г. Энергоэффективные фасадные системы и применяемые строительные материалы / С.Г. Абрамян, А.А. Котляревский, А.У. Саутиев // *Науковедение*. – 2017. – Т. 9, № 6. – С. 36.

104. Пат. 2127194 РФ. Материал с покрытием, отражающим инфракрасное излучение / Г.Д. Куллер. Заявл. 12.10.1995; опубл. 10.03.1999.

105. Пат. 16287 РФ. Паронепроницаемый теплоотражающий экран / А.А. Горовой, Ю.Ф. Бирулин. Заявл. 04.10.2000; опубл. 20.12.2000.

106. Пат. 94463 РФ. Защитная теплоотражающая накидка / Д.К. Оганесян, П.Ф. Поташников. Заявл. 15.03.2010; опубл. 27.05.2010.

107. Пат. 17929 РФ. Строительный отделочный материал / М.Н. Шипко, В.М. Захаров, В.П. Яблоков. Заявл. 16.11.2000; опубл. 10.05.2001.

108. Пат. 2496647 РФ. Теплоотражающий огнестойкий слоистый резиноканевый защитный материал / С.В. Резниченко, В.К. Гореленков, А.В. Замятин и др. Заявл. 22.02.2012; опубл. 27.10.2013.

109. Пат. 199048 РФ. Теплоизоляционный многослойный материал / К.А. Тер-Закарян. Заявл. 13.05.2020; опубл. 11.08.2020.

110. Пат. 2120783 РФ. Материал для защиты от теплового излучения / М.Н. Белицин, В.А. Шабанов, В.И. Логинов и др. Заявл. 31.10.1997; опубл. 27.10.1998.

111. Пат. 42044 РФ. Теплоизоляционный строительный элемент / М.А. Смолин. Заявл. 21.06.2004; опубл. 20.11.2004.

112. Пат. 2666884 РФ. Материал для экранно-вакуумной теплоизоляции и способ его изготовления / С.В. Алексеев, В.В. Белокрылова, В.А. Богачев и др. Заявл. 21.04.2017; опубл. 12.09.2018.

113. Пат. 143267 РФ. Многослойный гибкий теплоизоляционный материал / А.Н. Карпевич. Заявл. 16.07.2013; опубл. 20.07.2014.

114. Пат. 2415622 РФ. Многослойный теплоизолирующий материал / Б.Л. Горберг, И.Ю. Белова, В.В. Веселов и др. Заявл. 11.05.2010; опубл. 10.04.2011.

115. Пат. 114291 РФ. Теплоизолирующий чехол для автомобиля / В.В. Сницкий. Заявл. 11.10.2011; опубл. 20.03.2012.

116. Пат. 2467042 РФ. Полимерная теплоотражающая композиция для покрытия / Н.Е. Малова, Е.Н. Каблов, Э.К. Кондрашов и др. Заявл. 07.06.2011; опубл. 20.11.2012.

117. Пат. 171333 РФ. Огне-теплостойкий материал для защитной одежды / Е.Л. Смирнова, А.В. Лукашевский, А.В. Шемаков. Заявл. 23.11.2016; опубл. 29.05.2017.

118. Аязов, А.А. Сравнительный анализ веществ, используемых при разработке специальной защиты пожарного от повышенных тепловых воздействий / А.А. Аязов, С.А. Булкин // Труды XXXI Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь». – Химки: ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России, 2021. – С. 4.

119. Гаппаров, Х.Г. Виды и способы металлизирования текстильных материалов для пошива специальной одежды / Х.Г. Гаппаров, Я.Я. Хомидов, Г.К. Файзиева // Молодой ученый. – 2016. – № 11(115). – С. 310–313.

120. Пат. 2192500 РФ. Способ ионноплазменного нанесения покрытий на изделия из полимерных материалов / В.П. Сергеев, О.В. Сергеев, В.П. Яновский, В.П. Черненко. Заявл. 31.01.2000; опубл. 10.11.2002.

121. Пат. 2361014 РФ. Способ вакуумно-дугового нанесения покрытий / В.Г. Кузнецов, А.А. Лисенков. Заявл. 06.11.2007; опубл. 10.07.2009.

132. Кохнюк, В.Н. Создание функционально-активного текстиля с использованием метода вакуумно-дугового осаждения металлов и их соединений / В.Н. Кохнюк, И.Л. Поболь, И.П. Смягликов // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. – 2021. – С. 103–114.

123. Пат. 2409703 РФ. Способ нанесения покрытий в вакууме на изделия из электропроводных материалов и диэлектриков / В.М. Савостиков, А.И. Потехаев, В.М. Кузьмиченко. Заявл. 03.08.2009; опубл. 20.01.2011.

124. Панфилов, Ю.В. Нанесение тонких пленок в вакууме / Ю.В. Панфилов // Технологии в электронной промышленности. – 2007. – № 3(15). – С. 76–80.

125. Иванов, А.Ю. Технология напыления тонких пленок / А.Ю. Иванов // Современная светотехника. – 2010. – Т. 1. – С. 45–48.

126. Кузьмичев, А. И. Магнетронные распылительные системы. / А.И. Кузьмичев. – Электронные текстовые данные. – Киев: Аверс, 2008. – 244 с.

127. Пат. 2763379 РФ. Способ получения электропроводящего металлизированного текстильного материала / Э.Ф. Вознесенский, Ю.А. Тимошина, А.Е. Карноухов, Я.О. Желонкин. Заявл. 18.06.2021; опубл. 28.12.2021.

128. Пат. 2338021 РФ. Металлизированный материал «Нанотекс» / Н.М. Левакова, Е.М. Горынина, Б.Л. Горберг и др. Заявл. 28.12.2006; опубл. 10.11.2008.

129. Meng, L.L. Characteristics of Silver Films Deposited on the Surface of PET Fabric / L.L. Meng, X.M. Huang, Q.F. Wei // *Advanced Materials Research*. – 2011. – V. 239–242. – P. 2356–2360.

130. Кузьмин, О.С. Технология получения теплоотражающих (оксид–металл–оксид) покрытий методом магнетронного распыления / О.С. Кузьмин, Л.Г. Косицин, В.Н. Лихачев и др. // *Физическая мезомеханика*. – 2024. – № 7. – С. 344–347.

131. Евтеева, П.С. Влияние топологии поверхности полипропиленовой пленки на адгезию алюминия к ней при вакуумной металлизации / П.С. Евтеева, А.Е. Кузько // *IV Международная научная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и системная модернизация страны»*. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 149–153.

132. Timoshina, Y.A. Application of preliminary plasma modification the surface of synthetic materials in the processes of application of functional metal coatings / Y.A. Timoshina, E.F. Voznesensky, A.E. Karnoukhov, I.V. Krasina et al // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – V. 1588. – P. 012053.

133. Карноухов, А.Е. Исследование параметров предварительной ВЧЕ плазменной модификации на износостойкость ламинированных текстильных материалов с металлическими покрытиями / А.Е. Карноухов, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // *XVIII Всероссийская научно-практическая конференция с элементами научной школы для студентов и молодых ученых «Новые технологии и материалы легкой промышленности»*: сборник статей. – Казань: КНИТУ, 2022. – С. 222–225.

134. Пискарев, М.С. Модифицирование поверхности пленок полифторолефинов в тлеющем разряде постоянного тока / М.С. Пискарев, М.Р. Батуашвили, М.Ю. Яблоков и др. // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2012. – № 4 (55). – С. 35–41

135. Карноухов, А.Е. Получение электропроводящих текстильных материалов, ламинированных полимерными пленками / А.Е. Карноухов, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // Технологии и качество. – 2022. – № 2(56). – С. 29–33.

136. GEMAPILEN® BRD60 2710. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.gemapolimer.com/kategori/katki_masterbatch.html (дата обращения: 07.05.2023).

137. ESTAPROP 02120 C. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.fiplast.it/prodotto/?family=ESTAPROP&product=ESTAPROP-02120-C> (дата обращения: 07.05.2023).

138. POLYBATCH® BTF 152 DX2. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.lyondellbasell.com/en/products-technology/advanced-polymer-solutions/> (дата обращения: 07.05.2023).

139. A-Len V4PP-278. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://alen-rus.com/catalog/chalk/> (дата обращения: 07.05.2023).

140. Extrusion VAREX. [Электронный ресурс]. – https://www.wh.group/int/en/our_products/extrusion/blown_film_lines/varex_ii/ (дата обращения: 07.05.2023).

141. MDO Stretching Lines – stretching of polymers. [Электронный ресурс]. – <https://www.collin-solutions.com/en/product/mdo-lab-line-stretching-lines/> (дата обращения: 07.05.2023).

142. PLASMAMODULAR. Настольные ВЧ плазменные системы. [Электронный ресурс]. – <https://www.ferryvatt.ru/products/plazmennaya-obrabotka/ionno-plazmennoe-travlenie/plasmamodular-/> (дата обращения: 07.05.2023).

143. ГОСТ 10681-75 Материалы текстильные. Климатические условия для кондиционирования и испытания проб и методы их определения. – М: ИПК Изд-во стандартов, 1997. – 30 с.

144. ГОСТ 3811-72 Материалы текстильные. Ткани, нетканые полотна и штучные изделия Методы определения линейных размеров, линейной и поверхностной плотности. – М: ИПК Изд-во стандартов, 1973. – 28 с.

145. ASTM D882-2018 Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. – ASTM International, 2010. – 10 p.

146. Autograph AG-X plus Shimadzu. [Электронный ресурс] - <https://www.shimadzu.ru/sites/shimadzu.seg/files/ag-xplus-c224e053d-rus.pdf> (дата обращения: 07.05.2023).

147. ГОСТ 3813-72. Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении. – М.: Издательство стандартов, 2003. – 20 с.

148. ГОСТ Р 54106-2010. Пленки и листы полимерные. Метод определения изменения размеров после нагревания. – М.: Стандартиформ, 2010. – 4 с.

149. STM D2732-14 Standard Test Method for Unrestrained Linear Thermal Shrinkage of Plastic Film and Sheeting. – ASTM International, 2020. – 8 p.

150. PERMATRAN-W® MODEL 101 K. [Электронный ресурс] - <https://www.ametekmocon.com/products/permeationanalyzers/wvtr-permeation-analyzers/permatran-w-101k-testing-analyzer> (дата обращения: 07.05.2023).

151. ASTM D6701-21 Standard Test Method for Determining Water Vapor Transmission Rates Through Nonwoven and Plastic Barriers. – ASTM International, 2021. – 6 p.

152. ГОСТ ISO 811-2021 Материалы текстильные Определение водоупорности. Испытание под гидростатическим давлением. – М.: Российский институт стандартизации, 2023. – 12 с.

153. FX3000 HydroTester IV. [Электронный ресурс] - <https://orbiscorp.ru/pribor-dlya-avtomaticheskogo-ispytaniya-gidrostaticheskim-naporom-fx-3000-hydrotester-iv/> (дата обращения: 07.05.2023).

154. ГОСТ Р 51552 (ИСО 811-81) Материалы текстильные Методы определения стойкости к истиранию текстильных материалов для защитной одежды. – М.: Издательство стандартов, 2000. – 6 с.

155. Testo 875-2i [Электронный ресурс] - <https://www.testo.ru/ru-RU/kompliekt-testo-875-2i-sniat-s-proizvodstva/p/0563-0875-V3> (дата обращения: 07.05.2023).

156. ГОСТ Р 56734–2015. Здания и сооружения. Расчет показателя теплозащиты ограждающих конструкций с отражательной теплоизоляцией. – М.: Стандартинформ, 2016. – 15 с.

157. POROLUX100. [Электронный ресурс] - https://www.porometer.ru/porometer_porolux_100/ (дата обращения: 07.05.2023).

158. Olympus OLS LEXT OLS-4100. [Электронный ресурс] - <https://www.olympus-ims.com/ru/metrology/ols4100/> (дата обращения: 07.05.2023).

159. MERLIN Series. From Imaging to Your Complete Lab: Analytical Power for the Sub-Nanometer World. [Электронный ресурс] - <https://www.zeiss.com/merlin> (дата обращения: 07.05.2023).

160. GE v|tome|xм300 [Электронный ресурс] - <https://www.bakerhughes.com/ru/waygate-technologies/industrial-radiography-and-ct/2d-and-3d-ct-systems> (дата обращения: 07.05.2023).

161. HYPERION 2000. [Электронный ресурс] - <https://www.bruker.com/ru/products-and-solutions/infrared-and-raman/ft-ir-research-spectrometers/vertex-research-ft-ir-spectrometer/vertex-70v-ft-ir-spectrometer.html> (дата обращения: 07.05.2023).

162. Phaser. [Электронный ресурс] - <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/diffractometers-and-x-ray-microscopes/x-ray-diffractometers/d2-phaser.html> (дата обращения: 07.05.2023).

163. DIFFRAC.SUITE TOPAS - XRD Software, X-ray diffraction. [Электронный ресурс] - <https://my.bruker.com/acton/attachment/2655/f-b016a843-48ea-4914-9507-a347f04d20d9/1/-/-/-/XRD%20DIFFRAC.SUITE>

%20Part11%20Flyer%20DOC-H88-EXS060%20V3%20high.pdf (дата обращения: 07.05.2023).

164. DSC 204 F1 Phoenix. [Электронный ресурс] - https://analyzing-testing.netzsch.com/_Resources/Persistent/3/f/6/2/3f62fce9e4fd19c3cb5d75f1514a90ef444f9c23/DSC_204_F1_Phoenix_en_web.pdf (дата обращения: 07.05.2023).

165. ГОСТ 8.207-76. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – М.: Издательство стандартов, 2008. – 7 с.

166. Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator (LAMMPS) [Электронный ресурс]. – URL: <http://lammmps.sandia.gov> (дата обращения: 10.01.2023).

167. Atomify [Электронный ресурс]. – URL: <https://ovilab.net/atomify/> (дата обращения: 10.01.2023).

168. Humphrey, W. VMD: Visual molecular dynamics / W. Humphrey, A. Dalke, K. Schulten // Journal of Molecular Graphics. – 1996. – № 14(1). – P. 33–38.

169. Харापудько, Ю.В. Исследование структуры пористых полиэтиленовых пленок с минеральным наполнителем / Ю.В. Харапудько, О.В. Вишневская, Э.Ф. Вознесенский // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20. – № 23. – С. 39–40.

170. Каримуллин, И.И. Исследование устойчивости эффекта ВЧЕ-плазменной модификации синтетических волокнистых материалов / И.И. Каримуллин, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский, Ю.В. Харапудько, А.Е. Карноухов // Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы» (ФНТП-2020): сборник тезисов. – Казань: Изд-во «Отечество», 2020. – С. 129–130.

171. Харапудько, Ю.В. Исследование влияния плазменной модификации на свойства поверхности функциональных полимерных материалов / Ю.В. Харапудько, М.В. Дмитриева, Е.А. Павлова [и др.] // Новые технологии и материалы легкой промышленности: XVII Всероссийская научно-практическая

конференция с элементами научной школы для студентов и молодых ученых. Материалы конференции, Казань, 17–21 мая 2021 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2021. – С. 348–352.

172. Харापудько, Ю.В. Влияние плазменной модификации на термические характеристики полимерных материалов / Ю.В. Харапудько, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // Инновационные направления развития науки о полимерных волокнистых и композиционных материалах : Тезисы докладов II Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 22–24 ноября 2021 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна, 2021. – С. 68.

173. Карноухов, А.Е. Исследование экранирующих свойств металлизированных пленок / А.Е. Карноухов, Ю.В. Харапудько, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // Международная научно-техническая конференция «Легкая промышленность: проблемы и перспективы»: сборник трудов. – Омск: Издательство ОмГТУ, 2021. – С. 54–58.

174. Харапудько, Ю.В. Влияние плазменной модификации на свободную поверхностную энергию полиэтиленовых пленок / Ю.В. Харапудько, А.Е. Карноухов, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // Молодежь. Наука. Творчество: Материалы XIX Всероссийской научно-практической конференции, Омск, 09–11 ноября 2021 года / Редколлегия: Е.Б. Юдин [и др.]. – Омск: Омский государственный технический университет, 2021. – С. 16–20.

175. Тимошина, Ю.А. Применение ВЧ плазмы пониженного давления для повышения адгезии синтетических материалов к полимерным связующим и металлическим покрытиям / Ю.А. Тимошина, И.И. Морозова, Ю.В. Харапудько, А.Е. Карноухов, И.И. Каримуллин, Э.Ф. Вознесенский, Н.В. Тихонова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 6(396). – С. 146–152.

176. Харапудько, Ю.В. Полимерные пленочные и текстильные материалы на основе полипропилена и полиэфира с титановым покрытием / Ю.В. Харапудько,

А.Е. Карноухов, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский, Н.В. Тихонова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 6(396). – С. 161–166.

177. Харापудько, Ю.В. Анализ структурных изменений модифицированных полиэтиленовых пленок методом дифференциальной сканирующей калориметрии / Ю.В. Харапудько, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // Технологии и качество. – 2022. – № 1(55). – С. 5–11.

178. Харапудько, Ю.В. Плазмохимическая модификация полиэтиленовых пленок для газопроницаемых многослойных текстильных материалов / Ю.В. Харапудько, А.Е. Карноухов, Ю.А. Тимошина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2022. – Т. 56, № 2. – С. 7-10. – DOI 10.46418/0021-3489_2022_56_02_01. – EDN NBVMXNE.

179. Харапудько, Ю. В. Исследование влияния ВЧЕ плазменной модификации полиэтиленовой пленки методом ИК-спектроскопии / Ю.В. Харапудько, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности (ИНТЕКС-2022) : сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, Москва, 18–20 апреля 2022 года. Том Часть 2. – Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2022. – С. 260–262.

180. Харапудько, Ю.В. Получение газопроницаемых многослойных текстильных материалов / Ю.В. Харапудько, А.Е. Карноухов, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // XVIII Всероссийская научно-практическая конференция с элементами научной школы для студентов и молодых ученых «Новые технологии и материалы легкой промышленности»: сборник статей. – Казань: КНИТУ – 2022. – С. 112–115.

181. Харапудько, Ю.В. Влияние плазменной модификации на свободную поверхностную энергию текстильных материалов, ламинированных полимерными пленками на основе полиолефинов / Ю.В. Харапудько, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский, Н.В. Тихонова // Известия высших учебных заведений.

Технология легкой промышленности. – 2022. – Т. 57, № 3. – С. 113–116. – DOI 10.46418/0021-3489_2022_57_03_22. – EDN EIZIVP.

182. Харापудько, Ю.В. Влияние терморелаксации процесса MDO на паропроницаемость диффузионных пленочных материалов / Ю.В. Харапудько, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий (Материаловедение 2023) I Всероссийская конференция с международным участием. – Казань: КНИТУ – 2023. – С. 260–261.

183. Завадский, А.Е. Рентгенографический анализ бимодальной структуры кристаллитов в полипропиленовых нитях / А.Е. Завадский, С.Ю. Вавилова, Н.П. Пророкова // Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57. – № 9. – С. 66–71.

184. Tabatabaei, S.H. Structure and properties of MDO stretched polypropylene / S.H. Tabatabaei, P.J. Carreau, A. Abdellah // Polymer. – 2009, V. 50. – P. 3981–3989.

185. Mirabella, F.M. Determination of the crystalline and noncrystalline molecular orientation in oriented polypropylene by infrared spectroscopy // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. – 1987. – V. 25(3). – p. 591–602. doi:10.1002/polb.1987.090250310 10.1002/polb.1987.090250310.

186. Andreassen, E. Infrared and Raman spectroscopy of polypropylene // Polymer Science and Technology Series, vol 2. – Dordrecht.: Springer, 1999. – p. 320–328. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4421-6_46/

187. Suljovrujic, E. The influence of molecular orientation on the crosslinking/oxidative behaviour of iPP exposed to gamma radiation // European Polymer Journal. – 2009. – vol. 45(7). – p. 2068–2078. doi:10.1016/j.eurpolymj.2009.03.017.

188. Legodi, M.A. Technical note rapid determination of CaCO₃ in mixtures utilising FTIR spectroscopy / M.A. Legodi, D.de. Waal, G.H. Potgieter, S.S. Potgieter // Minerals Engineering. – 2001. – V. 14, № 9. – P. 1107–1111.

189. Кучменова, Л.Х. Термические свойства полимер-полимерных композитов на основе полипропилена: специальность 02.00.06 / Кучменова Леана Хасановна. – Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова – Нальчик, 2014. – 22 с.

190. Ярышева, А.Ю. ИК-спектроскопическое исследование структуры изотактического полипропилена, деформированного по механизму крейзинга / А.Ю. Ярышева, Б.Н. Тарасевич, Л.М. Ярышева, А.Л. Волынский // Доклады Академии наук. – №4. – 2017. – Т. 472. – С. 420–424. <https://doi.org/10.7868/S0869565217040132>.

191. Krimm, S. Infrared Spectra of High Polymers. II. Polyethylene / S. Krimm, C.Y. Liang, G.B.V.M. Sutherland // The Journal of Chemical Physics. – 1956. – N. 25(3). – P. 549–562.

192. Smith, B.C. The Infrared Spectra of Polymers II: Polyethylene / B.C. Smith // Spectroscopy. – 2021. – V.9 (36). P. 24–29. doi:10.56530/spectroscopy.xp7081p7.

193. Clarke, J.H.R. Molecular Dynamics Modelling of Polymer Materials / J.H.R. Clarke, D. Brown // Molecular Simulation. – 2006. – V. 3. – P. 27–47.

194. Papanikolaou, M. Molecular dynamics modelling of mechanical properties of polymers for adaptive aerospace structures / M. Papanikolaou, D. Drikakis, N. Asproulis // AIP Conference Proceedigs. – 2015. – V. 1646. – P. 66–71.

195. Gartner, T.E. Modeling and Simulations of Polymers: A Roadmap / T.E. Gartner, A. Jayaraman // Macromolecules. – 2019. – V. 52(3). – P. 755–786.

196. Kairn, T. Molecular-dynamics simulation of model polymer nanocomposite rheology and comparison with experiment / T. Kairn, P.J. Daivis, I. Ivanov, S.N. Bhattacharya // The Journal of Chemical Physics. – 2005. – V. 123(19). – P. 194905.

197. Желтухин, В.С. Математическая модель низкоэнергетичной ионной обработки полиэтилена / В.С. Желтухин, И.А. Бородаев, А.А. Шахыров // Всероссийская (с международным участием) конференция «Физика низкотемпературной плазмы – ФНТП-2017»: сборник тезисов. – Казань: Изд-во Казанского университета, 2017. – С. 148.

198. Тимошина, Ю.А. Математическая модель модификации полипропиленового волокна в плазме ВЧ разряда пониженного давления / Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский, В.С. Желтухин // Технологии и качество. – 2021. – № 3(53). – С. 18–23.

199. Hossain, D. Molecular dynamics simulations of deformation mechanisms of amorphous polyethylene / D. Hossain, M.A. Tschopp, D.K. Ward, J.L. Bouvard, P. Wang, M.F. Horstemeyer // *Polymer*. – 2010. – № 51. – P. 6071–6083.
200. Tschopp, M.A. Atomic Scale Deformation Mechanisms of Amorphous Polyethylene under Tensile Loading / M.A. Tschopp, D.K. Ward, J.L. Bouvard, M.F. Horstemeyer. – Supplemental Proceedings: Materials Fabrication, Properties, Characterization, and Modeling. – 2011. – V. 2. – P. 789–794.
201. Lesard, R. Introduction to Computational Materials Science. Fundamentals to Applications / R. Lesard // Cambridge University Press. – 2013. – P. 414.
202. Хокни, Р. Численное моделирование методом частиц / Р. Хокни, Дж. Иствуд. – М: Мир, 1987. – 640 с.
203. Brenner, D.W. Empirical Potential for Hydrocarbons for Use in Simulating the Chemical Vapor Deposition of Diamond Films / D.W. Brenner // *Phys. Rev. B*. – 1990, V. 42 – P. 9458–9471.
204. Chenoweth, K. ReaxFF Reactive Force Field for Molecular Dynamics Simulations of Hydrocarbon Oxidation / K. Chenoweth, A.C.T. van Duin, W.A. Goddard // *The Journal of Physical Chemistry A*. – 2008. – V. 112(5). – P. 1040–1053.
205. Абгарян, К.К. Применение оптимизационных методов для решения задач параметрической идентификации потенциалов межатомного взаимодействия / К.К. Абгарян, М.А. Посыпкин // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. – 2014. – Т. 54, № 12. – С. 1994–2001.
206. Сафина, Л.Р. Выбор потенциала межатомного взаимодействия для моделирования / Л.Р. Сафина, Ю.А. Баимова // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2019. – Т. 16, № 1. – С. 30–35.
207. Wunderlich, B. Crystal Melting / B. Wunderlich // *Macromolecular Physics*. – 1980. – V. 3. – P. 61–64.
208. Natta, G. Structure and properties of isotactic polypropylene / G. Natta, P. Corradini // *Il Nuovo Cimento*. – 1960. – V. 15. – P. 40–51.
209. Тудрий, Е.В. Физико-химия полимеров / Е.В. Тудрий, И.В. Галкина, А.А. Собанов, В.И. Галкин. – Казань: Казан. ун-т, 2015. – 45 с.

210. TECHKON RT120 [Электронный ресурс]. URL: http://www.stoklan.ru/catalog.php?act=show_position&id=897 (дата обращения: 23.09.2022).

211. ASTM D3359 – 09 Стандартные методы испытания для измерения адгезии методом клейкой ленты. 01.06.2009. – М.: ASTM International , ЗАО «Технорматив», перевод на русский язык, 2009, 1992. – 16 с.

212. Определение коэффициента излучения материалов ограждающих конструкций при проведении энергетического обследования: Методические указания к лабораторной работе / Д.К. Аксенова, А.И. Довгялло, Д.В. Сармин, Д.А. Угланов, А.А. Шиманов; Самар. нац. исслед. ун-т им. академика С.П. Королева (Самарский университет) – Самара, 2017. – 29 с.

213. Прошкин, С. С. К вопросу о точности измерения температуры с помощью тепловизора / С. С. Прошкин // Вестник Международной академии холода. – 2014. – № 1. – С. 51–54.

214. Карноухов, А.Е. Технологические рекомендации производства ламинированных текстильных материалов с металлическими покрытиями / А.Е. Карноухов, Ю.В. Харापудько, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский, Я.О. Желонкин // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2022. – № 2. – 5–10.

215. ConSlitter KAMPF. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.kampf.de/ru/reshenija-i-produkty/gibkaja-upakovka/conslitter-silverline/> (дата обращения: 07.05.2023).

216. WEBER ULTRASONICS. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.weber-ultrasonics.com/en/sonic-digital-hs3-generator/> (дата обращения: 07.05.2023).

ПРИЛОЖЕНИЯ

«Утверждаю»

генеральный директор

АО «Полимализ»

_____ / Р.Ф. Яруллин /

«21» _____ марта 2022 г.



АКТ

производственных испытаний

результатов диссертационной работы Харапудько Юрия Владимировича на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.16 – Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности

Мы, нижеподписавшиеся, представитель АО «Полимализ» руководитель испытательного центра Т.П. Шарипова с одной стороны и представители ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ») профессор кафедры «Плазмохимические и нанотехнологии высокомолекулярных материалов» Вознесенский Э.Ф., аспирант кафедры «Плазмохимические и нанотехнологии высокомолекулярных материалов» Харапудько Ю.В. с другой стороны составили настоящий акт о том, что в производственных условиях АО «Полимализ» испытаны ламинированные технические текстильные материалы с диффузионными и теплоотражающими свойствами, полученные по результатам, представленным в диссертационной работе Харапудько Ю.В.

Произведена оценка эксплуатационных характеристик ламинированных технических текстильных материалов с диффузионными и теплоотражающими свойствами. В качестве образцов испытаны трехслойные ламинированные диффузионные нетканые материалы, содержащие

паропроницаемую, теплоотражающую полиолефиновую пленку. Результаты представлены в таблице.

Таблица – Оценка эксплуатационных характеристик ламинированных технических текстильных материалов с диффузионными и теплоотражающими свойствами

№	Наименование характеристики	Результаты испытаний
1	Внешний вид	Удовлетворительный
2	Поверхностная плотность, г/м ²	110
3	Разрывная нагрузка, Н: - в продольном направлении; - в поперечном направлении	220 160
4	Удлинение при разрыве, %: - в продольном направлении; - в поперечном направлении	50 60
5	Плотность потока водяного пара, г/м ² ×24ч	950
6	Сопротивление проникновению воды мм. вод. ст.	1600
7	Теплостойкость при температуре 120 °С в течение 2 ч: - изменения внешнего вида - изменения линейных размеров, %	отсутствуют 0

