

На правах рукописи



ХАРАПУДЬКО ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МЕМБРАННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ТЕКСТИЛЬНЫЙ
МАТЕРИАЛ С ТЕПЛОТРАЖАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ**

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2024

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

Научный руководитель: **Вознесенский Эмиль Фаатович**, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Бесшапошникова Валентина Иосифовна**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», профессор кафедры материаловедения и товарной экспертизы;

Гайсин Азат Фивзатович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», профессор кафедры физики.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет».

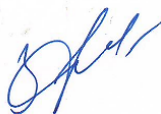
Защита диссертации состоится «18» апреля 2024 года в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.12, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета, А-330.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=487208>.

Отзывы на автореферат и диссертацию в 2-х экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68, ФГБОУ ВО «КНИТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.312.12. В отзыве указываются фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень с указанием специальности, ученое звание, наименование организации и должность лица, представившего отзыв, с указанием структурного подразделения, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии) (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Н.В. Тихонова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 Tyvek. Поэтому разработка многослойной системы, сочетающей в себе комплекс требуемых свойств, на основе отечественных компонентов является актуальной задачей.

Степень разработанности темы. Весомый вклад в развитие темы создания мембранных и многофункциональных текстильных материалов внесли такие исследователи, как В.И. Бешапошникова, 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 мембран 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.

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.

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.

Для обработки результатов экспериментальных исследований использовали методы статистической обработки данных. Для разработки математической модели процесса одноосной ориентации полимерной мембраны использовали метод молекулярной динамики.

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.

Публикации. Результаты работы отражены в 18 публикациях, в том числе: 7 статей в журналах, входящих в перечень научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 публикации в научных журналах, индексируемых в международной базе данных Scopus, остальные – в материалах конференций различного уровня.

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.

Выражаю глубокую благодарность д.т.н., профессору Тимошиной Юлии Александровне за помощь в определении направления исследования и обсуждении результатов работы.

ОСНОВНОЕ 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 разработки и экспериментальных исследований мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами.

Технология получения мембранного технического текстильного материала основана на ламинировании полимерной мембраны с несущим и защитным неткаными текстильными слоями. На первом этапе исследовали методику получения мембраны. Наиболее технологичным методом является одноосная ориентация полиолефиновой пленки, наполненной дисперсным карбонатом кальция, или технология MDO. Экспериментальные образцы мембран получали на пи-

лотной ориентационной линии НТЦ ООО «ДАНАФЛЕКС-НАНО». Схема расположения валов пилотной линии, а также температурные профили секций представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

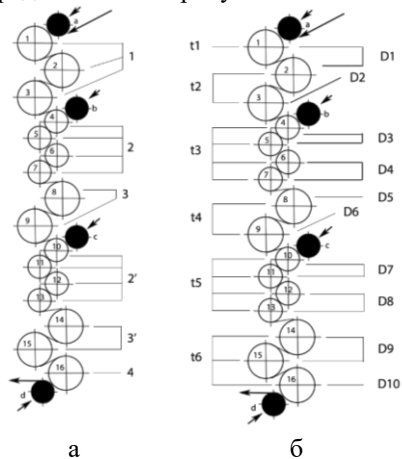


Рис. 1. Схема расположения валов модуля MDO: а – схема технологических секций: 1 – секция преднагрева; 2, 2' – секции растяжения; 3, 3' – секции термостабилизации (annealing), 4 – секция охлаждения; б – схема температурных профилей (t1–t6) и скоростей вращения валов (D1–D10); 1–16 – металлические нагреваемые валы; а–д – обрезиненные прижимные валы

Таблица 1 – Параметры процесса MDO

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				
	3	t2	варьируется		
Первая секция растяжения (секция 2)	4, 5	t3	варьируется	D3	5,13
	6, 7		варьируется	D4	25,64
Первая секция термостабилизации (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 термостабилизации (секция 3')	14, 15	t6	30	D9	22,61
Секция охлаждения (секция 4)	16	t6	30	D9	22,61

В качестве полуфабриката использовали полиолефиновую наполненную пленку толщиной 58 мкм и поверхностной плотностью 70 г/м², полученную методом выдувной экструзии.

Проведен подбор параметров процесса MDO для достижения наибольших значений паропроницаемости. В качестве регулируемых технологических параметров выбраны температурные профили секции преднагрева и первой секции растяжения. Остальные параметры процесса MDO приняты постоянными.

Экспериментально установлено, что при температурах секции преднагрева ниже 75°C и первой секции растяжения ниже 85°C наблюдается разрушение пленки из-за низкой эластичности. При температуре секции растяжения выше 102°C наблюдается резкое снижение паропроницаемости.

Получено 6 экспериментальных образцов полимерных мембран поверхностной плотностью 20 г/м^2 (таблица 2).

Влияние режимов MDO на значения паропроницаемости представлено на рис. 2. Максимальной паропроницаемостью $11\,000 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot 24 \text{ ч})$ обладает образец №1.

Таблица 2 – Перечень экспериментальных образцов мембран, полученных при варьировании значений параметров процесса MDO

Образец	Температура валов, $^{\circ}\text{C}$		
	Секция преднагрева (секция 1)		Первая секция растяжения (секция 2)
	t1	t2	
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

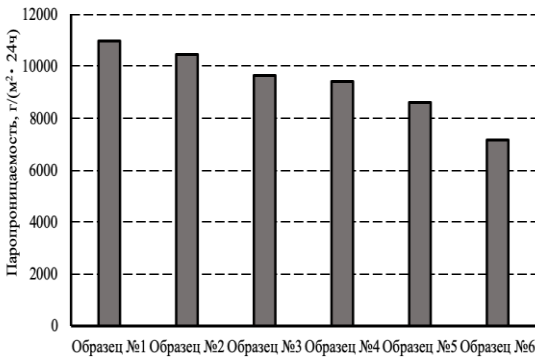


Рис. 2. Влияние параметров процесса MDO на паропроницаемость полимерных мембран

полиэтилена ($121\text{--}122^{\circ}\text{C}$) и полипропилена ($156\text{--}157^{\circ}\text{C}$) при снижении температуры вытяжки наблюдается тенденция к исчезновению перегибов, что связано с формированием равномерной надмолекулярной структуры. Наибольшая равномерность структуры, достигаемая у образца № 1 (рис. 3).

Исследовано влияние параметров процесса MDO на структуру полимерных мембран. У ориентированных пленок установлено повышение надмолекулярной упорядоченности, что проявляется по данным рентгеноструктурного анализа в увеличении интенсивности дифракционных рефлексов.

На кривых ДСК экспериментальных образцов наряду с пиками плавления

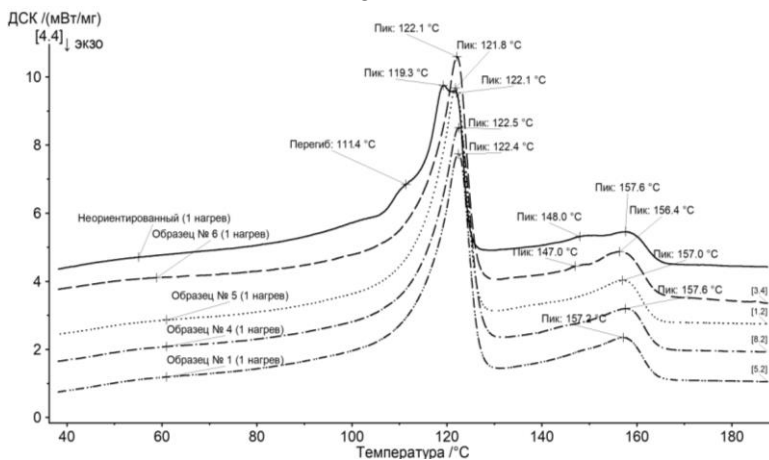


Рис. 3. Результаты ДСК анализа образцов полимерных пленок

Влияние одноосной ориентации на молекулярную структуру мембраны исследовали методом ИК-Фурье спектроскопии. Полученные спектры демонстрируют как полосы поглощения, характерные для ПП, ПЭ и компонентов природного мела, так и отличия, связанные с процессами ориентации образцов в продольном направлении. О повышении регулярности структуры ПП можно судить по повышению интенсивности рефлексов валентных симметричных колебаний CH_3 групп (2850 см^{-1}) и валентных асимметричных колебаний CH_2 групп (2920 см^{-1}). Влияние ориентации на кристалличность ПЭ компонента мембраны проявляется в увеличении относительной интенсивности рефлексов, соответствующих маятниковым колебаниям CH_2 групп (713 см^{-1} , 730 см^{-1}).

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

Пористую структуру полимерных мембран исследовали методами сканирующей электронной микроскопии, газо-жидкостной порометрии и рентгеновской микротомографии.

Изображения СЭМ мембран, полученных при разной температуре ориентации представлены на рис. 4. На изображениях наглядны различия пористой структуры образцов. Анализ распределения размеров пор на поверхности показал, что для образца №1 характерен наименьший размер пор. Повышение температуры одноосной ориентации приводит к увеличению размера пор и снижению их количества.

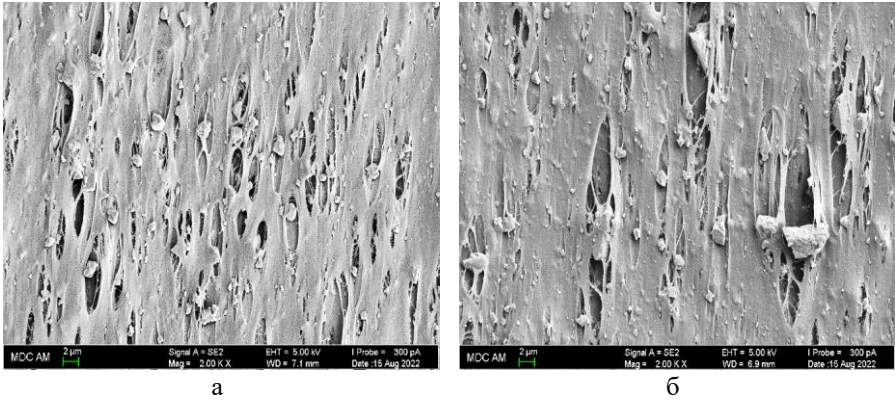


Рис. 4. Результаты СЭМ образцов мембран ($\times 2000$): а – образец №1; б – образец №5

Результаты газо-жидкостной порометрии позволили получить распределение сквозных пор по размерам (рис. 5). 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 формируют сквозные каналы именно этого размерного диапазона. Поперечный срез мембраны показал, что структура образована многослойной системой щелевидных пор (рис. 6.).

Компьютерная томографии позволила оценить равномерность пор в объеме, однако из-за низкого разрешения не удалось определить точную геометрию пор, при этом установлено, что образец обладает объемной пористостью около 46,3 %.

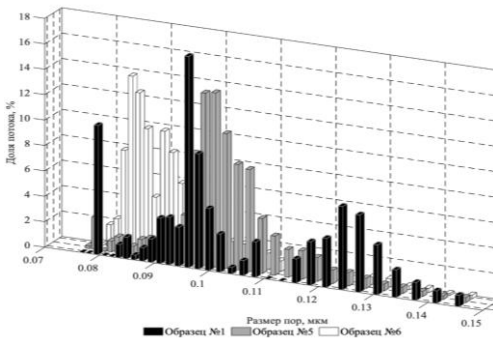


Рис. 5. Дифференциальное распределение сквозных пор по размерам на основе результатов газо-жидкостной порометрии

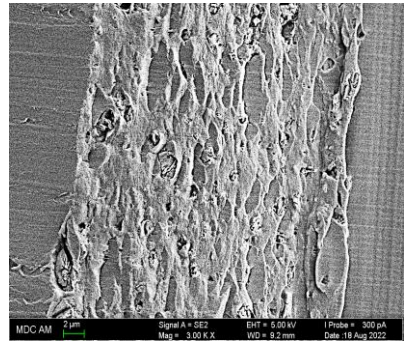


Рис. 6. Результаты СЭМ поперечного среза мембраны (образец №1, $\times 3000$)

Для обобщения результатов РСА, ДСК и ИК-Фурье спектроскопии, показавших влияние температуры одноосной ориентации на молекулярную струк-

туру паропроницаемой мембраны, разработана модель процесса на основе метода молекулярной динамики. Моделировали кристаллический участок изотактического ПП после релаксации при температуре 300 К. Модель состояла из 4520 атомов, применяли потенциал AIREBO. Скорость и температура деформации соответствовали параметрам MDO для образцов № 1 и № 6 с шагом по времени 0,5 фс. На рис. 7 видно, что при одноосной ориентации происходит изменение конформации макромолекул, валентных и пространственных углов, при этом не наблюдается разрыва связей. Наибольшее повышение регулярности структуры происходит при температуре ориентации 358 К (или 85 °С) (рис. 7.б).

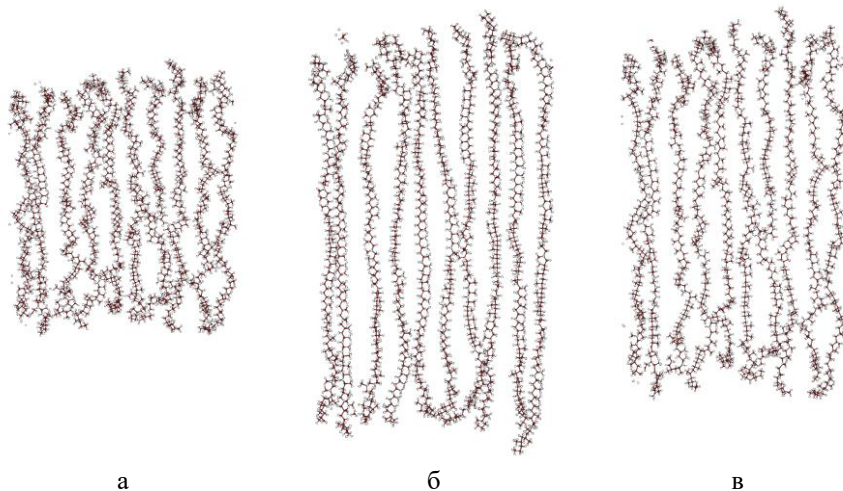


Рис. 7. Изображение моделируемой области ПП: а – структура после релаксации при температуре 300 К; б – структура после одноосной деформации при температуре 358 К (образец № 1) в момент времени $t = 1125$ фс; в – структура после одноосной деформации при температуре 375 К (образец №6) в момент времени $t = 1125$ фс

Деформации макромолекул при одноосной ориентации определяется энергией пространственных углов, минимум которой также наблюдается у ячейки, ориентированной при 358 К. Таким образом результаты молекулярного моделирования согласуются с данными РСА, ИК-спектроскопии, ДСК и иллюстрируют формирование равномерно ориентированной структуры.

На втором этапе исследования на основе полученной пористой мембраны (образец № 1) предложено разработать мембранный технический текстильный материал. Рассмотрены два варианта строения – двухслойный (дуплекс) или трехслойный (триплекс). В качестве несущего текстильного слоя использовали нетканый ПП материал (спанбонд) поверхностной плотностью 70 г/м², в качестве защитного слоя – ПП спанбонд поверхностной плотностью 17 г/м². Выбор текстильных компонентов ламината определяется их экономической доступностью, аналогичные решения используются в промышленных материалах-аналогах.

Во избежание значительного нарушения пористой структуры мембраны, ламинирование проводили методом точечной УЗ сварки при контролируемой плотности скрепления (рис. 8).

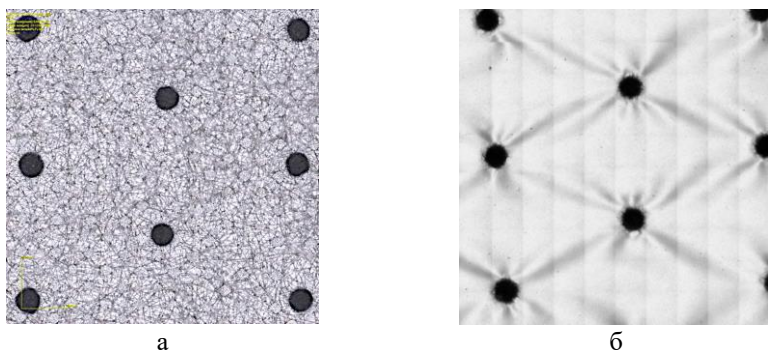


Рис. 8. Структура ламинатов ($\times 3$): а – триплекс; б – дуплекс

Проведено сопоставление свойств экспериментальных образцов мембранных текстильных ламинатов с промышленными аналогами. Для сравнения использовали промышленные ламинаты АО «ПОЛИМАТИЗ» и ОАО «СветлогорскХимволокно».

Физико-механические свойства опытных образцов двухслойных и трехслойных ламинатов сопоставимы с промышленными аналогами. По значениям паропроницаемости опытные образцы аналогичны ламинату «СветлогорскХимволокно» и незначительно превосходят ламинат производства «Полиматиз» – до 4 %. По значениям водоупорности опытный образец триплекса на 23 % превосходит ламинат «Полиматиз», на 33 % – образец «СветлогорскХимволокно» и на 45% – образец дуплекса. УЗ ламинирование приводит к снижению паропроницаемости до 30 % и повышению водоупорности до 7 % относительно значений не ламинированной мембраны, что определяется структурой участков скрепления и влиянием нетканых слоев.

Исследования влияния истирания на водоупорность мембранных текстильных ламинатов показали, что образец двухслойного ламината отличается малой устойчивостью к истирающей нагрузке и утрачивает свойства при 50 циклах, образцы триплексов более устойчивы к истиранию (свыше 300 циклов) благодаря наличию защитного нетканого слоя.

Таким образом, для получения мембранного текстильного материала технического назначения наиболее целесообразно использовать трехслойный ламинат с разработанной паропроницаемой мембраной (образец № 1), демонстрирующий оптимальное сочетание показателей функциональных свойств с эксплуатационными характеристиками.

На третьем этапе рассмотрена возможность придания разработанному материалу теплоотражающих свойств за счет нанесения на мембрану слоя алюминия методом магнетронного распыления. Для повышения адгезии металличе-

ского слоя к мембране применялась предварительная обработка плазмой высокочастотного разряда пониженного давления в среде смеси аргона и воздуха в едином вакуумном цикле с процессом металлизации. Толщину наносимого металла регулировали значением удельной мощности магнетрона и продолжительностью напыления. На основе металлизированных мембран получены образцы трехслойных ламинатов (триплексов) – рис. 9.

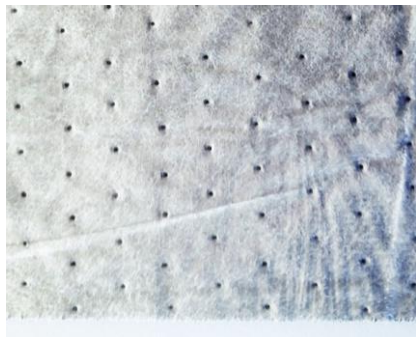


Рис. 9. Образец мембранного трехслойного ламината с алюминиевым слоем

Теплоотражающие свойства полученных ламинатов исследованы на лабораторной установке, температурную карту поверхности образца определяли с помощью тепловизора (рис. 10). Результаты показали, что с увеличением толщины алюминиевого покрытия повышается коэффициент отражения ИК-излучения, при толщине 80 нм коэффициент повышается на 90 %. Нанесения слоя алюминия большей толщины приводит к существенному снижению паропроницаемости мембранных ламинатов.

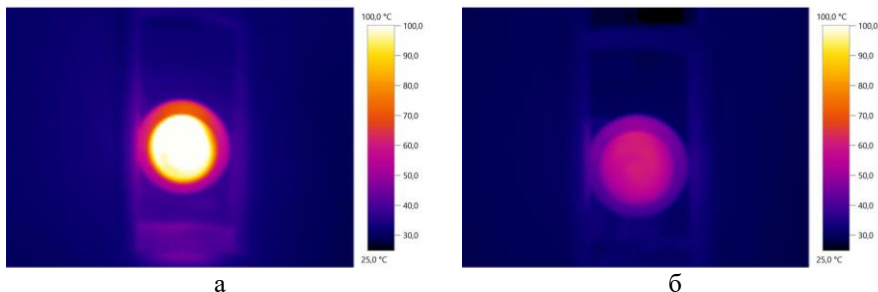


Рис. 10. Термограммы образцов ламинатов: а – образец с не металлизированной мембраной; б – образец с мембраной, металлизированной в режиме: $W_m = 10 \text{ Вт/см}^2$, $P_m = 0,5 \text{ Па}$, $\tau_m = 1,5 \text{ мин}$, плазмообразующий газ – аргон (толщина покрытия 80 нм)

Таким образом, в качестве ламинированного мембранного текстильного материала технического назначения с теплоотражающими свойствами рекомендовано использовать трехслойный ламинат, состоящий из несущего ПП нетканого полотна (спанбонд) поверхностной плотностью 70 г/м^2 ; полимерной мембраны, ориентированной при температуре тянущей пары $85 \text{ }^\circ\text{C}$, покрытой слоем алюминия толщиной 80 нм; для защиты поверхности мембраны от механических воздействий рекомендовано использовать нетканое ПП полотно (спанбонд) поверхностной плотностью 17 г/м^2 . Скрепление слоев ламината рекомендовано проводить методом точечной УЗ-сварки с плотностью распределения пятен скрепления по поверхности не выше 3,5 %.

В четвертой главе на основе результатов экспериментальных исследований разработаны технологические рекомендации по производству мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами. Производство мембраны включает в себя экструзию полуфабриката, формирование пористой структуры и нанесение металлического покрытия. Блок-схема технологического процесса производства ламината представлена на рис. 11. Показатели качества разработанного материала представлены в таблице 5.

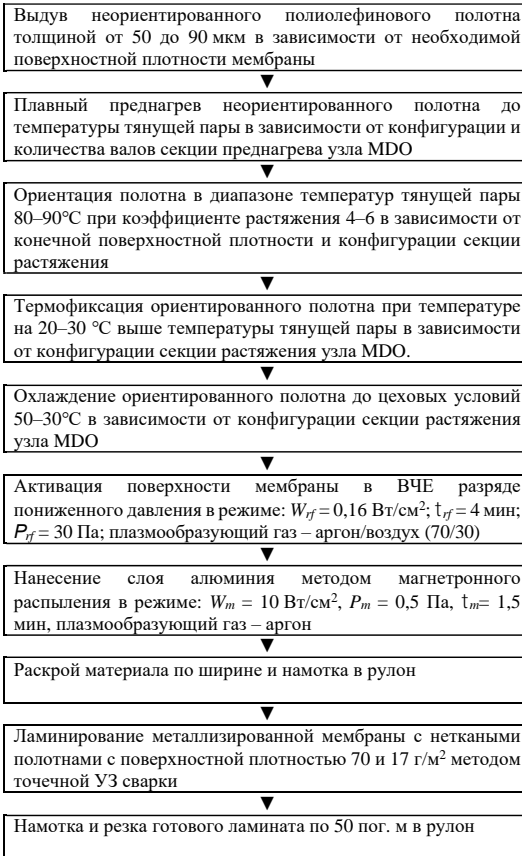


Рис. 11. Блок-схема технологического процесса производства мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами

Таблица 5 – Показатели качества мембранного технического текстильного материала с теплоотражающими свойствами

Наименование показателя	Значение показателя
Поверхностная, плотность г/м ²	110
Паропроницаемость, г/м ² ×24 ч	7800
Водоупорность, мм вод.ст.	1600
Разрывная нагрузка, Н в продольном направлении	250
в поперечном направлении	135
Относительное удлинение при разрыве, % в продольном направлении	50
в поперечном направлении	65
Прочность сварного скрепления слоев между мембраной и несущим нетканым слоем, Н/15 мм	1,85
Стойкость истиранию, циклов (до значений водоупорности 1000 мм вод.ст., не менее)	450
Коэффициент отражения ИК-излучения, отн. ед.	0,55

Результаты диссертационного исследования прошли испытания на АО «Полимагиз», особая экономическая зона Алабуга и одобрены к внедрению на ООО «Композиты 116», г. Казань. Ожидаемый экономический эффект от внедрения составит 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.

Основные результаты работы изложены в следующих публикациях:

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Харапудько, 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.

2. **Харапудько, Ю.В.** Исследование гигиенических свойств пористых полиэтиленовых пленок с минеральным наполнителем / Ю.В. Харапудько, М.Д. Гаврилов, О.В. Вишневская, Л.И. Шагиев, Э.Ф. Вознесенский // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 103–105.

3. **Харапудько, Ю.В.** Исследование механических и структурных свойств полиэтиленовых пленок с минеральным наполнителем / Ю.В. Харапудько, М.Д. Гаврилов, О.В. Вишневская, Л.И. Шагиев, Э.Ф. Вознесенский, Е.А. Когогин // Вестник Технологического университета. – 2018. – Т. 21. – № 11. – С. 102–105.

4. **Харапудько, 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.

5. Карноухов, А.Е. Технологические рекомендации производства ламинированных текстильных материалов с металлическими покрытиями / А.Е. Карноухов, **Ю.В. Харапудько**, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский, Я.О. Желонкин // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2022. – Т. 56. – № 2. – С. 11–15.

6. **Харапудько, Ю.В.** Плазмохимическая модификация полиэтиленовых пленок для газопроницаемых многослойных текстильных материалов / Ю.В. Харапудько, А.Е. Карноухов, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский, Н.В. Тихонова // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2022. – Т. 56. – № 2. – С. 7–10.

7. **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.

Публикации в научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus:

8. 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.

9. **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.

Материалы конференций:

10. Каримуллин, И.И. Исследование устойчивости эффекта ВЧ-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.

11. **Харапудько, Ю.В.** Исследование влияния плазменной модификации на поверхностные свойства функциональных полимерных материалов / Ю. В. Харапудько, М.В. Дмитриева, И.И. Каримуллин, А.Е. Карноухов, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // XVI Всероссийская научно-практическая конференция с элементами научной школы для студентов и молодых ученых «Новые технологии и материалы легкой промышленности»: сборник статей. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2020. – С. 371–376.

12. **Харапудько, 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: Изд-во СПбГУПТД, 2021. – С. 68.

13. **Харапудько, Ю.В.** Исследование влияния плазменной модификации на свойства поверхности функциональных полимерных материалов / Ю.В. Харапудько, М.В. Дмитриева, Е.А. Павлова, Ю.А. Тимошина, Э.Ф. Вознесенский // Новые технологии и материалы легкой промышленности: XVII Все-российская научно-практическая конференция с элементами научной школы для студентов и молодых ученых. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2021. – С. 348–352.

14. 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: Изд-во ОмГТУ, 2021. – С. 54–58.

15. **Харапудько, 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: Изд-во СПбГУПТД, 2021. – С. 68.

16. **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. – Москва: РГУ им. А.Н. Косыгина, 2022. – С. 260–262.

17. **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: Изд-во КНИТУ, 2022. – С. 112–115.

18. **Харапудько, 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.