

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

На правах рукописи



ГАРАФИЕВ АЙДАР РУСТЕМОВИЧ

**РАЗРАБОТКА ПАКЕТОВ МАТЕРИАЛОВ С СОРБИРУЮЩИМ И
МЕМБРАННЫМ СЛОЯМИ ДЛЯ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ОТ
ВОЗДЕЙСТВИЯ АММИАКА И НЕФТЕПРОДУКТОВ**

2.6.16. Технология производства изделий текстильной и легкой промышленности

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Тихонова Наталья Васильева

Казань – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АММИАКА и НЕФТЕПРОДУКТОВ	15
1.1 Современный ассортимент материалов для спецодежды и необходимость его расширения	15
1.2 Обзор разработок пакетов материалов защитной одежды и их свойств	21
1.3 Характеристика слоев в пакетах материалов с сорбирующим и мембранным слоями	28
1.3.1 Текстильные материалы и их свойства	28
1.3.2 Сорбенты в составе пакетов материалов	32
1.3.3 Мембранный слой пакета материалов	37
1.4 Способы скрепления слоев в пакете материалов для защитной одежды	44
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК СОЗДАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ И ТАКСОНОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА СЛОЕВ ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ.	51
2.1 Выбор объектов исследования	51
2.2 Методы определения свойств текстильных основ, сорбентов и мембран	60
2.2.1 Методы оценки эксплуатационных и защитных характеристик объектов исследования	60
2.2.2 Методы оценки структуры и состава объектов исследования	66
2.3 Методы статистической обработки результатов исследований	69

2.4 Рекомендуемая методика создания экспериментальных образцов двуслойных и трехслойных пакетов материалов	73
2.5 Предлагаемая методика таксонометрической оптимизации состава слоев пакета материалов	77
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ С СОРБИРУЮЩИМ И МЕМБРАННЫМ СЛОЯМИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АММИАКА И НЕФТЕПРОДУКТОВ	82
3.1 Результаты исследования свойств текстильных материалов	82
3.2 Результаты исследования свойств промышленно-производимых химзащитных материалов	92
3.3 Результаты исследования свойств сорбентов	98
3.4 Результаты исследования свойств мембран	107
3.5 Результат апробации методики таксонометрического анализа	119
3.6 Защитные свойства слоев и пакетов материалов при воздействии аммиака и нефтепродуктов	126
3.7 Механизм защитного действия пакетов материалов защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов	132
ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА ПАКЕТОВ МАТЕРИАЛОВ С СОРБИРУЮЩИМ И МЕМБРАННЫМ СЛОЯМИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АММИАКА И НЕФТЕПРОДУКТОВ	151
4.1 Технологическая схема производства пакетов материалов	151
4.2 Испытания опытных образцов пакетов материалов	161
4.3 Экономическое обоснование внедрения в производство пакета материалов	165
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	170
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	172
ПРИЛОЖЕНИЯ	195

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АХОВ – аварийно-опасные химические вещества;
БДжХ – Барретт-Джойнер-Халенда (авторы метода);
БПЛА – беспилотный летательный аппарат;
БЭТ – Брунауэр-Эммет-Теллер (авторы метода);
ВЗД – время защитного действия;
ВО – водоотталкивающая отделка;
ГК – группа компаний;
ДТА – дифференциально-термический анализ;
ДТГ – дифференциальная термогравиметрия;
ИК – инфракрасная (спектроскопия);
НПВО – нарушенное полное внутреннее отражение;
НПЗ – нефтеперерабатывающий завод;
ОПЗ – общепроизводственные загрязнения;
ПВХ – поливинилхлорид;
ПП – полипропилен;
ПУ – полиуретан;
СИЗ – средства индивидуальной защиты;
ТГ – термогравиметрия;
ТГА – термогравиметрический анализ;
УЗ – ультразвуковой;
ХЗМ – химзащитный материал;
ЧС – чрезвычайная ситуация.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Развитие современных производств, связанных с добычей, переработкой, транспортировкой и хранением токсичных веществ и нефтепродуктов, сопровождается сохранением риска возникновения чрезвычайных ситуаций и техногенных катастроф. За последнее десятилетие в России регистрировались аварии с выбросом химических веществ и нефтепродуктов, обусловленные нарушением герметичности трубопроводов, резервуаров, морских танкеров и повреждением инфраструктуры объектов нефтехимической промышленности. Для работников аварийных служб, персонала промышленных предприятий, специалистов по ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и лиц, выполняющих работы в загрязненной среде, опасность представляет не только прямой контакт с жидкими загрязнителями, но и воздействие паров токсичных веществ, аэрозолей, продуктов горения и нефтяных фракций выбросов.

Изолирующие костюмы обладают высоким барьерным эффектом к токсинам и нефтепродуктам, однако их применение связано с существенной тепловой и физиологической нагрузкой на человека, ограничением длительности работы, снижением подвижности, затруднением тепло- и влагообмена. В существующих разработках представлены различные варианты химзащитных тканей, фильтрующих материалов, мембранных пакетов и сорбционно-фильтрующих систем. Вместе с тем, значительная часть решений ориентирована на защиту от конкретного опасного производственного фактора, но имеет ограничения по комфортности, паропроницаемости, технологичности получения материала, совместимости слоев и сохранности сорбента. Необходима разработка пакета материалов для защитной одежды, в котором за счет совместного действия текстильной основы, сорбирующего и мембранного слоев обеспечивается улучшенный комплекс эксплуатационных свойств, включая защитные свойства от воздействия вредных веществ.

Степень разработанности темы исследования

Обзоры современного ассортимента материалов для защитной одежды и их свойств представлены в работах Ищенко А.Д., Каюмовой Р.Ф., Киселева М.В., Лебедевой И.В., Солодушенковой Т.С., Фролова С.В., Хамматовой Э.А. и других. Свойства текстильного слоя пакетов материалов изучались Бешапошниковой В.И., Гайнутдиновым Р.Ф. Курылевым Н.А., Петуховым А.Н., Хамматовой В.В., Шустовым Ю.С. Сорбенты в составе материалов для специальной одежды охарактеризованы в работах Завьялова В.В., Морозовой И.И., Тихоновой Н.В., Фасхутдиновой А.Ф. и ряда зарубежных исследователей. Мембраны в составе материалов для специальной одежды охарактеризованы в работах Дементьевой К.А., Панкевич Д.К., Самарской Н.Н., Федоровой Н.Е. и других.

При этом вопросы создания пакетов для защитной одежды фильтрующего типа, включающих текстильный материал, сорбирующий и мембранный слои, методики оценки их свойств и технологии получения пакетов изучены недостаточно.

Работа направлена на решение актуальной проблемы разработки пакетов материалов с сорбирующим и мембранным слоями для защиты от воздействия аммиака и нефтепродуктов.

Работа выполнена во ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», в ходе экспериментальных исследований использовались методики и аналитическое оборудование центра коллективного пользования «Нанотехнологии и наноматериалы» и комплексной лаборатории «Наноаналитика» ФГБОУ ВО «КНИТУ».

В диссертационной работе изложены результаты научных исследований автора с 2023 по 2026 гг. в области оценки свойств текстильных материалов, сорбентов, мембран и результаты разработки и исследования свойств пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоями для защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов.

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. 3. Технологии (в том числе, нанотехнологии) волокон, нитей, материалов и ИТЛП; п. 19. Разработка новых материалов, обеспечивающих высокие эксплуатационные свойства ИТЛП.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы является разработка текстильных материалов с сорбирующим и мембранным слоями и технологии получения пакетов материалов для защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов с улучшенным комплексом эксплуатационных свойств.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Проанализировать современный ассортимент материалов для специальной одежды, существующие разработки сорбционно-фильтрующих и мембранных материалов, а также способы соединения слоев в пакетах материалов для защитной одежды.

2. Обосновать выбор объектов и методов оценки текстильных материалов, сорбентов, мембран и опытных пакетов, разработать методику создания экспериментальных образцов и методику таксонометрической оптимизации состава слоев.

3. Произвести экспериментальную оценку свойств текстильных материалов, сорбентов, мембран, промышленно-производимых химзащитных материалов, спроектировать состав пакета, установить механизм защитного действия при воздействии газовоздушных смесей нефти и аммиака.

4. Разработать технологическую схему производства пакетов материалов с сорбирующим и мембранным слоями, провести испытания опытных образцов и обосновать экономическую эффективность внедрения.

Объектом исследования являются многослойные пакеты материалов, предназначенные для производства защитной одежды от воздействия вредных веществ, их компоненты и технологии получения пакетов.

Предметом исследования – эксплуатационные, в том числе защитные, свойства пакетов материалов в зависимости от состава и структуры текстильного

материала, углеродного сорбента, мембранного слоя и метода их взаимного соединения.

Научная новизна работы.

1. Разработана и научно обоснована модель пакета материалов для защитной одежды, в которой улучшенный комплекс эксплуатационных и защитных свойств обеспечивается совместным действием натурального текстильного материала, угольного сорбционного слоя и беспоровой гидрофильной полиуретановой (ПУ) мембраны. Текстиль выполняет несущую и гигиеническую функции, угольный сорбционный слой отвечает за поглощение паров и газов, мембрана ограничивает перенос вредных веществ через пакет при сохранении паропроницаемости материала.

2. Разработана и апробирована методика таксонометрического анализа состава пакета материалов для защитной одежды, заключающаяся в многокритериальной оценке комплекса эксплуатационных свойств материалов и позволяющая ранжировать ассортимент текстильных материалов, сорбентов, мембран по приоритету включения в пакет материалов.

3. Экспериментально обоснованы составы пакетов материалов целевого назначения: для защиты от газовой смеси нефтепродуктов наиболее эффективным является пакет, включающий ткань «Саржа», активированный уголь «Каусорб» и мембрану «Порелле П600», обеспечивающий время защитного действия 10 ч; для защиты от газовой смеси аммиака обоснован пакет на основе ткани «Саржа», активированного угля «ФАС» и мембраны «МТ-1», обеспечивающий время защитного действия 47,17 мин.

4. Установлен механизм защитного действия разработанных пакетов при воздействии газовой смеси аммиака и нефтепродуктов с учетом природы токсиканта, структуры сорбента и свойств мембранного слоя: защита от неполярных нефтяных углеводородов обеспечивается за счет их физической адсорбции в микропорах углеродного сорбента и замедления диффузии беспоровой ПУ мембраной; защита от легколетучего полярного аммиака обусловлена его физико-химическим взаимодействием с полярными группами ПУ

мембраны через донорно-акцепторные и водородные связи, а также сорбционным удержанием на углеродной поверхности.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в развитии научных представлений о методах формирования и свойствах пакетов материалов с сорбирующим и мембранным слоями для защитной одежды; методах многокритериального анализа и оптимизации состава материалов в пакете; механизмах обеспечения защитных свойств материалов от воздействия аммиака и нефтепродуктов.

Практическая значимость:

1. Разработана экспериментальная методика создания пакетов материалов «текстильный слой – угольный сорбент – мембрана» с применением ультразвукового (УЗ) скрепления слоев.

2. Установлены технологические параметры процессов каландрирования и УЗ-сварки для получения пакетов материалов в опытно-промышленных условиях с применением рулонной установки непрерывной точечной УЗ-сварки серии «Волна» с рабочей частотой 20–35 кГц, скоростью сварки до 50 м/мин и регулируемой плотностью точек скрепления 2,5–4,0 %.

3. Получены пакеты материалов:

- ткань «Саржа» – уголь «Каусорб» – мембрана «Порелле П600», превосходящий химзащитный материал (ХЗМ) «ММС-Т» по времени защитного действия (ВЗД) от газовой смеси нефтепродуктов в 9,21 раза, по разрывной нагрузке по основе на 66,0% и по утку на 53,4%, по относительному удлинению по утку на 33,1%, по раздирающей нагрузке по утку на 12,7%, по удельной поверхности в 5,95 раза, по объему пор в 3,67 раза и по паропроницаемости на 20,7 %.

- ткань «Саржа» – уголь «ФАС» – мембрана «МТ-1», превосходящий ХЗМ «ММС-Т» по ВЗД от газовой смеси аммиака в 12,30 раза, по разрывной нагрузке по основе на 68,0% и по утку на 61,8%, по относительному удлинению

по утку на 41,9%, по раздирающей нагрузке по утку на 10,1%, по удельной поверхности в 7,85 раза и по объему пор в 7,19 раза.

4. Разработана технологическая схема производства пакетов материалов с сорбирующим и мембранным слоями для защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов.

Результаты диссертационного исследования внедрены в производство АО «КазХимНИИ». Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанной технологии при годовом выпуске 144 тыс. пог. м. обеспечивает чистую прибыль 14,759 млн руб. в год.

Объекты и методы исследований.

В качестве объектов исследования выбраны:

- текстильные материалы: «Саржа» арт. ЦЦ35668 (ГК «Балтийский текстиль»), «Брезент» арт. 11135 (ООО «ТканиТЕКС»), «Молескин» арт. С-159 ЮГ и арт. С-174 ЮГ (ООО «Ивановский меланжевый комбинат»);
- промышленно-производимые ХЗМ: «ММС-Т» (АО «КазХимНИИ»), «Форм», «Биоформ», «ХЗМ 8318», «Митрон» (ООО НПФ «Фабитекс»);
- сорбенты – активированные угли: «ФАС» и «ФАС мелкий», «МеКС», «ВСК 8-30», «ВСК А-2» (АО ЭНПО «Неорганика»), «Сорбер-10», «Даусорб» и «Каусорб» (АО «Сорбент»);
- мембраны: «Порелле П600», «Меркуритекс Турбо» (ООО «Фотопринт-Иваново», «МТ-1» (ООО «Мембранные технологии»), «Данафлекс» (ООО «Данафлекс-нано».

В работе использованы методы определения: паропроницаемости по ГОСТ Р 12.4.287–2013; разрывной нагрузки, удлинения раздирающей нагрузки текстильных материалов по ГОСТ 3813–72; прочности мембран по ГОСТ Р 50111–92. Применяли методы Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) и Барретта-Джойнера-Халенды (БДЖХ) для определения параметров пористой структуры; микроскопический анализ поверхности текстиля, сорбентов, мембран; методы ИК-спектроскопии и совмещенного дифференциально-термического и

термогравиметрического анализа (ДТА и ТГА). Оценивали ВЗД при воздействии газообразного аммиака и газовой смеси нефти.

Для анализа структуры и свойств материалов применялось испытательное оборудование: цифровой микроскоп Levenhuk D85L LCD; ИК-спектрофотометр Perkin Elmer FT-IR Spectrum Two, оборудованный алмазной приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО); синхронный термоанализатор STA 6000; универсальная испытательная машина Shimadzu AGS-5000 N и разрывная машина Метротест РЭМ-5-1; анализатор пористой структуры Nova 1200e Quantachrome Instruments. Обработка данных выполнялась с использованием статистических методов и таксонометрического анализа, позволяющего ранжировать материалы по совокупности признаков.

Положения, выносимые на защиту.

1. Модель пакета материалов защитной одежды, включающего натуральную ткань, угольный сорбирующий слой и беспоровую гидрофильную ПУ мембрану, обеспечивающего улучшенные эксплуатационные, в том числе защитные, свойства, с назначением марки сорбента и мембраны по природе задерживаемого вещества.

2. Методики: получения двуслойных и трехслойных пакетов материалов; таксонометрического анализа состава пакета материалов.

3. Результаты экспериментальных исследований механических, сорбционных, структурных, защитных характеристик текстильных материалов, сорбентов, мембран, пакетов и таксонометрической оптимизации состава слоев в пакете материалов.

4. Механизмы защитного действия разработанных пакетов при воздействии газовой смеси: аммиака, посредством его донорно-акцепторного связывания уретановыми и мочевиными группами ПУ; нефти, за счет физического задерживания неполярных углеводородов вследствие их ограниченной растворимости, затрудненной диффузии и адсорбции в микропорах сорбента.

5. Технологическая схема получения пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоями для защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается использованием апробированных методик испытаний согласно ГОСТ и современных инструментальных средств измерений показателей свойств, обеспечивающих высокий уровень точности данных. Обработку результатов экспериментальных исследований проводили с применением методов математической статистики. Расчеты производили в программном продукте Statistica 10.0.

Апробация работы и публикации

Результаты работы обсуждались на VII международной научно-практической конференции «Современные пожаробезопасные материалы и технологии» (Иваново, 2024); Всероссийской научно-практической конференции «Легкая промышленность: проблемы и перспективы» (Омск, 2024); III Всероссийской конференции с международным участием «Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий» (Казань, 2025, 2026); VI Международной научно-практической межвузовской конференции «Исследования ВКР – в практику профессиональной жизни» (Москва, 2026); IV Всероссийской конференции ученых, аспирантов и студентов с международным участием «Новации в процессах проектирования и производства изделий легкой промышленности» (Казань, 2026); XXII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и молодых ученых с международным участием (Казань, 2026).

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования; выборе и обосновании методик исследований; в проведении экспериментальных исследований; интерпретации, анализе, обработке и обобщении полученных экспериментальных данных; в разработке рекомендаций по производству пакетов материалов с сорбирующим и мембранным слоями для защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов. Автором лично или при его

непосредственном участии проведена работа по публикации результатов исследований в виде статей в отечественных журналах.

Публикации

Результаты работы отражены в 12 печатных работах, в том числе в 4 статьях входящих в перечень научных изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, остальные в материалах конференций всероссийского и международного уровня.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Работа изложена на 217 страницах машинописного текста, содержит 23 рисунка и 45 таблиц. В тексте приведены ссылки на 162 литературных источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен современный ассортимент материалов для спецодежды и обоснована необходимость его расширения. Приведен обзор разработок пакетов материалов защитной одежды и их свойств. Дана характеристика слоев в пакетах материалов с сорбирующим и мембранным слоями, в том числе текстильных материалов и их свойств, сорбентов и мембран. Охарактеризованы технологии скрепления слоев и получения пакетов материалов для защитной одежды, обоснованы преимущества технологии УЗ-сварки для получения многослойных текстильных материалов с сорбирующим и мембранным слоем.

Во второй главе обоснован выбор объектов исследования. Приведены методы определения свойств текстильных материалов, сорбентов и мембран, включая методы оценки эксплуатационных, в том числе защитных, характеристик и методы оценки структуры и состава объектов исследования. Охарактеризованы методы статистической обработки результатов исследования. Представлена рекомендуемая методика создания экспериментальных образцов двуслойных (ткань-сорбент) и трехслойных (ткань-сорбент-мембрана) пакетов материалов с

применением технологии УЗ-сварки. Предложена методика таксонометрической оптимизации состава слоев пакета материалов.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований свойств текстильных материалов, сорбентов, мембран и промышленно-производимых химзащитных материалов. Приведены результаты апробации методики таксонометрического анализа. Отражены результаты оценки защитных свойств отдельных слоев и пакетов материалов при воздействии аммиака и нефтепродуктов. Охарактеризован механизм защитного действия с учетом структуры и свойств сорбирующего и мембранного слоя.

В четвертой главе разработана технологическая схема производства пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоями для защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов, отражены технологические параметры работы участка каландрирования и непрерывной точечной УЗ-сварки. Приведены результаты испытаний опытных образцов пакетов материалов. Представлено экономическое обоснование внедрения в производство пакета материалов.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СОСТАВА И ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ ЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АММИАКА И НЕФТЕПРОДУКТОВ

В главе представлен современный ассортимент материалов для спецодежды и обоснована необходимость его расширения. Приведен обзор разработок пакетов материалов защитной одежды и их свойств. Дана характеристика слоев в пакетах материалов с сорбирующим и мембранным слоями, в том числе текстильных материалов и их свойств, сорбентов и мембран. Охарактеризованы технологии скрепления слоев и получения пакетов материалов для защитной одежды, обоснованы преимущества технологии УЗ-сварки для получения многослойных текстильных материалов с сорбирующим и мембранным слоем [1, 57, 58].

1.1 Современный ассортимент материалов для спецодежды и необходимость его расширения

Современные чрезвычайные ситуации (ЧС) промышленного характера связанные с разрушением оборудования, пожаром или взрывом, сопровождаются выбросом или разливом в окружающую среду веществ, токсичных для кожных покровов работников и ликвидаторов аварий. На химически опасных объектах к таким веществам относятся аммиак, хлор, серосодержащие соединения, кислоты, щелочи и другие аварийно-опасные химические вещества. На предприятиях нефтегазового комплекса дополнительную угрозу формируют нефть, дизельное топливо, мазут, нефтяные масла, бензиновые фракции и продукты их термического разложения. Сохраняющаяся угроза техногенных ЧС обуславливает необходимость совершенствования пакетов материалов для защитной одежды и улучшения ее барьерных свойств [1].

Для работников аварийных служб, производственного персонала, специалистов по ликвидации последствий ЧС и добровольцев, участвующих в очистке загрязненных территорий, опасность создает сочетание нескольких

факторов. В зоне аварии возможно присутствие жидких нефтепродуктов, паров токсичных веществ, загрязненного грунта, когда спецодежда, рассчитанная на общепроизводственные загрязнения, не обеспечивает достаточного уровня защиты. Полностью изолирующие костюмы дают высокий барьерный эффект, но, одновременно, создают тепловую и физиологическую нагрузку. По этой причине целесообразной становится разработка пакета материалов, в котором защитные свойства формируются не за счет непроницаемого слоя, а посредством избирательной сорбции, удержания в слоях материала загрязняющих веществ и снижения контакта токсичных компонентов с кожными покровами.

Проблематика исследования обусловлена продолжающимися авариями и техногенными происшествиями, связанными с выбросами токсичных веществ и разливами нефтепродуктов. В Приложении А представлены наиболее значимые события, отражающие разнообразие источников химической и нефтяной опасности, в частности разлив нефтепродуктов в Керченском проливе [2], утечки хлора, дизеля, аммиака вследствие аварий на нефтехимических предприятиях [3-6], выбросы нефти и мазута после крушения танкеров и атак беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [7-13]. События характеризуют угрозы химического и нефтяного загрязнения как на предприятиях с постоянным обращением токсичных веществ, так и на транспорте, в прибрежной зоне, на объектах энергетики, в местах хранения топлива и на территориях, где изначально не предполагается длительная работа персонала в химически загрязненной среде.

Научные публикации [14-19] по ассортименту специальной одежды показывают, что российский рынок СИЗ достаточно развит, при этом основная часть изделий ориентирована на традиционные производственные риски. В исследованиях [20-24] систематизированы варианты костюмов и пакетов материалов для защиты от общепроизводственных загрязнений, механических воздействий, влаги, пониженных температур, огня, искр, изолирующие костюмы, препятствующие попаданию к телу нефтепродуктов, кислот и щелочей. При этом одежда, способная сохранять паропроницаемость и одновременно снижать

вредное воздействие токсичных веществ и нефтепродуктов, т.е. спецодежда фильтрующего типа, представлена недостаточно.

Так, автором [14] рассмотрен ассортимент летней специальной одежды отечественных производителей, включая крупные компании рынка СИЗ. Показано, что выбор спецодежды связан не только с назначением профессии, но и с требованиями ТР ТС 019/2011, сертификацией, условиями труда, удобством, уходом за изделием и устойчивостью к опасным факторам рабочей среды. В работе [15] проанализовано применение специальной защитной одежды изолирующего типа при локализации чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах. Отмечено, что при пожарах и авариях на таких объектах личный состав сталкивается не только с тепловыми факторами, но и с воздействием аварийно-опасных химических веществ (АХОВ), а обследование зон с неизвестными опасными веществами требует применения изолирующих термоагрессивостойких костюмов. Каюмовой Р.Ф. изучены эргономические и эксплуатационные свойства специальной одежды для нефтяников. По результатам лабораторных испытаний выявлены нарушения защитных свойств материалов, дефекты конструкции, неудобство отдельных элементов в ходе эксплуатации и необходимость более обоснованного подбора материалов с учетом реальных условий труда в нефтегазовой отрасли [16].

В исследовании [17] рассмотрены проблемы и тенденции производства специальной одежды в России, подчеркнуто, что часть ассортимента морально устарела, а внутренний рынок нуждается в обновлении отечественной спецодежды с учетом требований современных производств, климатических условий и потребности предприятий в сертифицированных средствах индивидуальной защиты (СИЗ). В работе [18] обобщен ассортимент специальной теплозащитной одежды для работников нефтегазового производства. Выявлено, что традиционные комплекты для нефтегазового сектора не полностью учитывают специфику морских платформ, где одновременно действуют низкие температуры, ветер, влажность, пожаровзрывоопасные условия, токсичные вещества, разливы и выбросы. Оценены производственные технологии ООО

«ИГНИС», специализирующегося на специальной одежде и СИЗ с особыми свойствами. Систематизирован ассортимент и объем выпуска спецодежды, показатели огнестойкости и защиты от статического электричества выпускаемых изделий для нефтегазовых компаний [19], однако, представлены костюмы преимущественно изолирующего типа, герметичность которых негативно сказывается на комфорте ношения.

В исследовании [20] обобщен ассортимент специальной одежды и основные материалы, применяемые при ее изготовлении. Отмечено, что материалы для спецодежды должны обладать масло- и водоотталкивающими свойствами, стойкостью к агрессивным веществам, истиранию, разрыву, многократным стиркам и химическим чисткам. Фомченковой Л. изучена современная рабочая специальная одежда на отечественном рынке СИЗ. Показано, что потребность в профессиональной одежде и обуви испытывают более 50 млн работников, а сектор спецодежды развивается за счет материалов со специальными пропитками, многослойных текстильных основ, нетканых и пленочных материалов [21]. Охарактеризованы особенности подбора материалов, сохраняющих защитные характеристики при интенсивном термическом воздействии и действии опасных факторов аварийного характера [22].

Рекомендации по совершенствованию пакетов материалов приведены в работе Хамматовой Э.А., исследующей повышение эксплуатационных свойств материалов специальной одежды за счет модификации текстильных материалов потоком холодной плазмы пониженного давления. Выявлено улучшение механических свойств (прочности ткани «Премьер Комфорт» по основе на 20%, по утку на 17%, «Премьер Коттон» по основе на 12%, по утку на 25%) [23]. В работе сформированы требования к специальной одежде для работников нефтегазодобывающей отрасли, выделены защитные, эргономические, конструктивно-технологические и эстетические показатели, а также обосновано применение антистатических и огнестойких тканей для нефтегазовой сферы; в числе требований указано включение в пакет ткани с содержанием хлопка от 65%, с поверхностной плотностью от 230 г/м², прочностью основа/уток 1100-700Н [24].

В исследовании [1] рассмотрены материалы фильтрующе-сорбирующего типа для защитной одежды работников опасных химических производств, отражены варианты введения сорбирующих веществ в структуру текстильного материала или нанесения их на поверхность, а также показана возможность закрепления углеродного сорбента после физической активации холодной плазмой.

Для систематизации ассортимента целесообразно разделить пакеты материалов с защитными свойствами на изолирующие и фильтрующие. В Приложении Б представлены изолирующие материалы и костюмы российского производства, которые обеспечивают барьерную защиту за счет непроницаемого или малопроницаемого слоя. Такие изделия применяются при контакте с химическими веществами, нефтепродуктами, влагой, огнем или загрязненной средой, недостатком является то, что их эксплуатация сопровождается снижением физиологического комфорта при длительной работе. Ассортимент изолирующей одежды (Приложение Б) подтверждает, что отечественный рынок способен закрывать задачи кратковременной защиты при наступлении риска химического загрязнения, однако, изолирующий принцип защиты основан на ограничении обмена между внешней средой и пододежным пространством. При работе в теплое время года, при физической нагрузке или длительном пребывании в зоне ликвидации последствий аварии такой тип защиты приводит к накоплению тепла и влаги под одеждой. В результате повышается утомляемость, сокращается допустимое время работы и возрастает риск нарушения теплового состояния организма.

Другую группу составляют фильтрующие и фильтрующе-сорбирующие решения (таблица 1.1).

Сопоставление данных Приложения Б и таблицы 1.1 показывает, что на рынке преобладают изделия, где защитный эффект обеспечивается либо непроницаемым полимерным слоем (например, полиэтиленовым или поливинилхлоридным), либо специальной отделкой (масло-, нефте-, водо-отталкивающей) ткани.

Таблица 1.1 – Фильтрующие и фильтрующе-сорбирующие материалы специальной защитной одежды российского производства

Производитель	Название костюма	Материалы	Защитные свойства	Источники
ПВ ООО «Фирма «Техноавиа»	Костюм мужской «Химик»	Текстильный материал с химзащитной и антистатической отделкой	Защита от растворов кислот и щелочей, статического электричества, истирания, проколов, порезов и общепроизводственных загрязнений (ОПЗ)	[14, 20]
ПВ ООО «Фирма «Техноавиа»	Костюм «Неостат»	Сигнальный текстильный материал с антистатическими и химзащитными пропитками	Защита от статического электричества, химических факторов, механических воздействий, ОПЗ	[14, 17]
ГК «Восток-Сервис»	Костюм «Норд-Н»	Смесовая ткань, полиэфир 67%, хлопок 33%, маслостойкая, кислотостойкая, водоотталкивающая, пропитанная, отделка	Защита от механических воздействий, ОПЗ, пониженных температур, частично от химических факторов	[20, 16]
ГК «Энергоконтракт»	Корпоративные комплекты из ткани «Термол»	Термостойкая антиэлектростатическая ткань «Термол» с маслостойкой водоотталкивающей отделкой	Защита от кратковременного пламени, теплового излучения, ОПЗ, нефти и нефтепродуктов, кислот и щелочей	[18, 22]
ООО «ИГНИС»	Комплекты спецодежды для нефтегазовых заказчиков	Огнестойкие и антистатические текстильные материалы с пропитками	Защита от огня, статического электричества, загрязнений, износа	[19, 24]
Разработки КНИТУ и КазХимНИИ	Фильтрующе-сорбирующий материал для защитной одежды	Текстильная основа с углеродным сорбентом, активированным холодной плазмой	Сорбция химических веществ, снижение проникновения опасных соединений к кожным покровам	[1]

Такие материалы востребованы при создании защитной одежды для нефтегазовой, химической, энергетической и строительной отраслей, так как устойчивы к механическим воздействиям, загрязнению нефтепродуктами, контакту с растворами кислот и щелочей, кратковременному воздействию пламени, статическому электричеству, влажности и неблагоприятным климатическим условиям. При этом фильтрующе-сорбирующий принцип защиты

недостаточно широко реализован в промышленно-производимых защитных костюмах. Дополнительным основанием для развития пакетов материалов фильтрующего типа является характер современных аварий. Разливы нефтепродуктов на побережьях, пожары на НПЗ, выбросы аммиака или хлора, загрязнения оборудования и грунта требуют от ликвидатора последствий ЧС выполнения длительных операций по сбору загрязненного грунта, нанесению на утечки сорбентов, демонтажу загрязненных элементов, локализации разлива, контролю территории и очистке поверхностей. В ходе таких работ изолирующая одежда снижает подвижность и ускоряет утомление специалистов. Фильтрующая одежда при правильно подобранном пакете материалов способна обеспечить рациональный баланс между защитными свойствами, массой, воздухопроницаемостью, сорбционной способностью и эксплуатационной пригодностью.

1.2 Обзор разработок пакетов материалов защитной одежды и их свойств

Разработка пакетов материалов для защитной одежды основана на сочетании нескольких слоев, каждый из которых выполняет отдельную функцию. В отличие от однослойной ткани, многослойный пакет позволяет регулировать механическую прочность, барьерные свойства, теплозащиту, водонепроницаемость, паропроницаемость, массу изделия, гибкость, устойчивость к истиранию и другие свойства. В научных работах по данной теме пакеты материалов рассматриваются в различных направлениях применения, например, значительное число исследований отражает результаты создания пакетов материалов теплозащитной одежды для Арктики, пожарных, нефтегазовой отрасли [25-29]. Другая группа работ посвящена водозащитным материалам с мембраной, клеевому соединению слоев, многослойным композиционным структурам и специальным защитным костюмам изолирующего типа [30-45]. Наиболее близкими к теме данной работы являются разработки, где

в пакете сочетаются текстильная основа, функциональный сорбирующий слой и барьерный или мембранный компонент.

Так, автором [25] исследован выбор материалов для пакета водозащитной специальной одежды на основе мембранных материалов, предназначенных для защиты от воды и неблагоприятных погодных условий. Показано, что для таких материалов наиболее агрессивным эксплуатационным воздействием является сочетание стирки и многоциклового механического нагружения, а рациональный выбор должен опираться на высокий начальный уровень водонепроницаемости. В работе [26] рассмотрен выбор пакета материалов для одежды военнослужащих Арктики для формирования комфортных условий ношения при низких температурах. Предложен пакет с утеплителем несвязной структуры и секционной двуслойной оболочки, включающей подкладочную ткань, ограничительные детали из текстильных лент и элементов из сплава NiTi, обеспечивающих динамическое изменение формы при заданной температуре внешнего воздействия [27]. В исследовании [28] изучено влияние эксплуатационных факторов на теплозащитные показатели пакета материалов боевой одежды пожарного. Установлено, что повышенная влажность и сжатие пористого пакета повышают теплопроводность слоев и сокращают время защитного действия более чем в 3 раза [28]. Однако в данных пакетах ведущими неблагоприятными факторами воздействия выступают вода и температура, воздействие вредных веществ не оценивается.

Михайловым Е.С. оценены свойства термоагрессивостойких пакетов, где защитный эффект обеспечивается воздухонепроницаемым скафандром с полимерным пленочным покрытием и многослойным теплозащитным пакетом. Однако повышенные температура и влажность подкостюмного пространства такого пакета изменяют теплопроводность, теплоемкость и поверхностную плотность материалов, влияя на защитное действие костюма [29]. В интересах комплексной оценки влагозащитных материалов проанализированы материалы с тканой полиэфирной основой полотняного переплетения и мембранным слоем из полиэфируретана с различными добавками для максимальной степени защиты

при сохранении водонепроницаемости и паропроницаемости [30]. Панкевич Д.К. обобщены результаты изучения водозащитных многофункциональных материалов, содержащих текстильные слои и полимерную мембрану и разработана матрица функциональности для рационального подбора материалов в пакет защитной одежды [31]. Рассмотрены полимерные материалы в костюме военнослужащих Арктики, где состав пакета подбирался с учетом функциональности каждого слоя и теплофизических характеристик [32]. Пакеты направлены на обеспечение тепло- и водозащиты, стойкость к парам и водным средам токсичных веществ не оценивалась.

В исследовании [33] представлен пакет для защитного костюма специалистов нефтегазовой отрасли с применением современных материалов. В пакете использованы оболочковые ткани Деуспо «Милки» с водоотталкивающей отделкой, утеплители Шелтер, а также флис в качестве подкладочного слоя, при этом оптимальный пакет имел тепловое сопротивление $0,700\text{--}0,843 \text{ м}^2\cdot^\circ\text{C}/\text{Вт}$, воздухопроницаемость $26 \text{ дм}^3/\text{м}^2\cdot\text{с}$, паропроницаемость $4155,1 \text{ г}/\text{м}^2$ за 24 ч и толщину 21 мм. Несмотря на связь с нефтегазовой сферой, пакет предназначен в первую очередь для повышения теплозащиты работника. В работе [34] рассмотрены варианты, включающие ткань Арамид, мембранный слой на основе политетрафторэтилена и термостойкую ткань; для водоупорного слоя предложен материал состава 93% мета-арамид и 7% пара-арамид, поверхностной плотностью $114,3 \text{ г}/\text{м}^2$, влагопроницаемостью $7830 \text{ г}/\text{м}^2$ за 24 ч и устойчивостью к гидростатическому давлению более 50 кПа. Соответственно пакет обеспечивает водоупорность и термостойкость защитной одежды, барьерные свойства к проникновению токсикантов не оцениваются. Представленное в исследовании [35] проектирование специальной одежды для бетонщиков с применением ПУ полимерных материалов направлено на создание пакета с повышенной защитой от механических повреждений и воздействия ОПЗ, не применительно к аммиаку или нефтепродуктам.

Установлено, что традиционные материалы верха на основе хлопчатобумажных или льняных нитей со специальными пропитками уступают

пакетам с термостойкими арамидными, метаарамидными и параарамидными волокнами типа Номекс, что важно для повышения эксплуатационной безопасности и защиты от поверхностно-активных веществ [36]. Отунчиевой А.К. получены многослойные композиционные материалы специального назначения. Охарактеризован пакет, включающий наружный слой из термостойких волокон, промежуточный теплоизоляционный слой, внутренний слой из хлопчатобумажной ткани и гидроизоляционный слой из силоксановой композиции, расположенный между наружным и промежуточным слоями [37]. В работе [38] пакет включает специальную ткань с поверхностной плотностью 950 г/м² и составом 40% хлопок и 60% полиамид, подкладочную ткань Оxford из 100% полиэстера, геотекстиль ГЕО-300, синтепон, флизелин и нетканое теплоизоляционное полотно, а соединение слоев выполнено клеевым и ниточным способами с использованием полиамидного клея Неотерм ПУ-3425Р [38]. Аналогично большинству исследований пакеты разрабатываются для повышения эксплуатационных, тепло- и водоизоляционных свойств.

В работе [39] проанализирован комплект индивидуальной защиты КИЗ-Т для аварийно-спасательных работ с участием опасных химических веществ. Комплект состоит из верхнего и внутреннего теплоизолирующего комбинезонов, при этом верхний слой из винилискожи обеспечивает защиту от воды и агрессивных химических веществ. Рассмотрено формирование компонентов пакета для изделий специального назначения на основе нетканых материалов для защиты от повышенных и пониженных температур, агрессивных сред, химических веществ и радиоактивных излучений [40]. В патенте на пакет материалов специальной защитной одежды предложена многослойная структура для спасателей и работников, находящихся рядом с открытым пламенем. Пакет содержит наружный слой из ткани на основе арамидных волокон, ПУ гидроизоляционное покрытие на внутренней поверхности, промежуточный слой из нетканого материала на основе полиэфирных микроволокон, внутренний слой из арамидной ткани и теплоизоляционный зазор между гидроизоляционным покрытием и промежуточным слоем [41]. Данные пакеты в дополнении к

огнетеплозащите препятствуют проникновению химических соединений, воды, излучений, но применительно к аммиаку и нефтепродуктам исследования не проводились. Также изолирующий тип пакета не способствует поддержанию физиолого-гигиенических характеристик защитной одежды.

Предложен вариант «умной» куртки для работников нефтегазовой отрасли с системой мониторинга физиологических параметров [42]. Отмечено, что в современных пакетах материалов важна малая масса, износостойкость, комфорт при длительном ношении, безопасность для организма и широкий спектр заранее заданных специальных свойств [43]. Разработан пакет материалов с мембранным компонентом на основе облегченного термоизолирующего слоя Холлофайбер, арамидного материала верха Арселон, мембран ПЛЛАМ и СКСО, при этом испытания показали возможность снижения массы спецодежды относительно аналогов на 1 кг при сохранении защитных свойств, а улучшенный материал верха выдерживал устойчивость к высоким температурам и нагретыми поверхностям [44]. Для защитных изделий работников нефтедобывающих предприятий автором [45] предложена технология получения специальных одежных кож из шкур овец, комплексная обработка которых неравновесной низкотемпературной плазмой и силаном повысила предел прочности при растяжении с 13,0 до 20,0 МПа, краевой угол смачивания с 90 до 136°, паропроницаемость с 450 до 645 г/м², а коэффициент стойкости к нефти и нефтепродуктам составил 96,4%, при 90,1% у исходных материалов. Последний вариант пакета прошел испытания на стойкость к жидкой фазе нефти, однако, защита от газовоздушных смесей нефтепродуктов не оценивалась, кроме того, пакет не относится к фильтрующему типу.

В наиболее близкой к тематике диссертации работе по формированию пакета материалов для защитной одежды фильтрующего типа [46] изучены промышленные сорбционно-фильтрующие материалы, применяемые для защитной одежды. Отмечен активированный уголь в качестве наиболее распространенного сорбента и охарактеризованы мировые решения, включающие углесодержащие нетканые материалы, углесодержащие фланели,

импрегнированную углем пену, укрепленную тканью, и ткани со слоем сферических гранул активированного углерода. Такая специфика создания пакета обеспечивает защиту от токсичных веществ за счет внедрения в пакет функционального слоя, задерживающего и препятствующего их резорбтивному проникновению через кожу.

Для систематизации рассмотренных разработок в таблице 1.2 представлены составы и свойства пакетов материалов, в том числе многослойные материалы и решения, близкие к фильтрующей защитной одежде.

Таблица 1.2 – Разработки пакетов материалов защитной одежды и их основные свойства

Состав пакета материалов	Свойства	Назначение	Источ- -ник
1	2	3	4
Полиэфирная тканая основа полотняного переплетения с мембранным слоем из полиэфируретана	Водонепроницаемость, паропроницаемость, возможность комплексной оценки качества на входном контроле	Влагозащитная специальная одежда	[30]
Текстильные слои с полимерной мембраной разных структур	Высокая водонепроницаемость, пропускание паров воды, оценка 93 артикулов материалов	Водозащитная многофункциональная одежда	[31]
Ткань Деуспо «Милки» с ВО, Оксфорд 600 ПУ - плащевая ткань с ВО, Шелтер Микро 100, Шелтер Профи 200, флис	Тепловое сопротивление 0,700–0,843 м ² ·°С/Вт, воздухопроницаемость 26 дм ³ /м ² ·с, паропроницаемость 4155,1 г/м ² за 24 ч, толщина 21 мм	Теплозащитный костюм для специалистов нефтегазовой отрасли	[33]
Арамид 1414, мембрана из политетрафторэтилена, ткань ТДЗ-240, водоупорный слой	Защитный слой имеет состав 93% мета-арамид и 7% пара-арамид, поверхностную плотность 114,3 г/м ² , толщину 0,5 мм, влагопроницаемость 7830 г/м ² за 24 ч, устойчивость к гидростатическому давлению более 50 кПа	Боевая одежда пожарного	[34]
Хлопчатобумажные и льняные ткани со специальными пропитками, арамидные, метаарамидные и параарамидные материалы	Повышение термостойкости, защита от теплового потока, воды и поверхностно-активных веществ	Специальная защитная одежда пожарных	[36]

Окончание таблицы 1.2

1	2	3	4
Наружный слой из термостойких волокон, промежуточный теплоизоляционный слой, внутренний хлопчатобумажный слой, гидроизоляционный слой из силиконовой композиции	Многослойность, сочетание термостойкости, теплоизоляции и гидроизоляции	Композиционный материал специального назначения	[37]
Верхний комбинезон из винилискожи и внутренний теплоизолирующий комбинезон	Прочность швов 260 Н в продольном направлении и 375 Н в поперечном, водонепроницаемость швов при давлении не менее 1000 мм водяного столба	Комплект индивидуальной защиты КИЗ-Т для аварийно-спасательных работ	[39]
Наружная арамидная ткань, ПУгидроизоляционное покрытие, нетканый слой из полиэфирных микроволокон, внутренний арамидный слой, теплоизоляционный зазор	Паропроницаемость, водонепроницаемость, сохранение огнетеплозащитных свойств	Специальная защитная одежда пожарных и спасателей	[41]
Натуральная кожа из шкур овец, обработанная неравновесной низкотемпературной плазмой и силаном	Предел прочности 20,0 МПа, краевой угол смачивания 136°, паропроницаемость 645 г/м ² , коэффициент стойкости к нефти и нефтепродуктам 96,4%	Специальные защитные изделия для работников нефтедобывающих предприятий	[44]
Углеродсодержащие нетканые ткани, углеродсодержащие фланели, импрегнированная углем пена, ткани со сферическими гранулами активированного углерода	Сорбция вредных веществ, снижение риска резорбтивного проникновения через кожу	Защитная одежда фильтрующего типа	[46]

Систематизация исследований пакетов материалов отражает ориентацию разработок на улучшение отдельной функции защитной одежды, например сохранения тепла, обеспечения барьера проникновению влаги, паропроницаемости, однако, улучшение эксплуатационных свойств с одновременной барьерностью к проникновению паров нефтепродуктов и аварийно-опасных химических веществ к коже индивида представлено в научных изысканиях недостаточно. В ряде решений нефтепродукты рассматриваются как жидкое загрязнение, от которого защищает масло- и водоотталкивающая отделка.

Защита от токсичных веществ связывается преимущественно с изолирующими костюмами.

При этом для работ, где требуется не кратковременная полная изоляция, а комфортное продолжительное пребывание в зоне загрязнения, необходим пакет фильтрующего типа с функциональными, например, сорбирующим и мембранным слоями. Преимущество таких разработок состоит в распределении защитных функций между слоями пакета. Текстильный слой обеспечит прочность, устойчивость к истиранию, гигиенические свойства, технологичность изготовления и возможность закрепления функциональных компонентов. Сорбирующий слой способен задерживать пары и часть жидких загрязнителей, снижая контакт токсичных соединений с кожей. Мембранный слой усиливает барьер проникновения влаги и нефтепродуктов, а при правильном выборе структуры сохраняет потенциал для гигиенически приемлемой эксплуатации относительно непроницаемой изолирующей оболочки. В этой связи разработка пакета фильтрующего типа с сорбирующим и мембранным слоями является обоснованным направлением расширения существующих решений для специальной защитной одежды.

1.3 Характеристика слоев в пакетах материалов с сорбирующим и мембранным слоями

1.3.1 Текстильные материалы и их свойства

Текстильный слой в пакете материалов защитной одежды выполняет несколько функций: воспринимает механические нагрузки при эксплуатации; служит поверхностью для нанесения функциональных отделок; обеспечивает возможность скрепления с другими слоями и влияет на гигиенические свойства готового изделия. При создании пакета материалов, предназначенного для защиты от токсичных веществ и нефтепродуктов, текстиль выступает основой для

фиксации сорбирующего слоя, мембраны, гидрофобной отделки или других функциональных покрытий.

При выборе текстильного материала учитывается сырьевой состав, переплетение, поверхностная плотность, разрывная нагрузка, стойкость к истиранию, устойчивость к действию влаги, агрессивных сред и повышенной температуры. Необходимым является сохранение заданных свойств после носки, стирки, контакта с загрязняющими веществами, изгибов, трения. Например, автором [47] исследованы ткани специального назначения и указано, что для таких тканей важна поверхностная плотность в пределах 250–700 г/м², прочность, долговечность, функциональность и сохранение основных потребительских свойств. В работе [48] изучены ткани для специальной защитной одежды от воздействия повышенных температур, включая хлопчатобумажные материалы с огнестойкими пропитками и ткани из огнестойких арамидных волокон, разрывная нагрузка последних сохранялась на уровне 1652,5Н (ткань ФлеймФорт 280), при воздействии теплового потока 20 кВт/м² в течение 20 мин. Однако сведения о гигиеничности и паропроницаемости арамидной ткани не приводятся.

Шустовым Ю.С. рассмотрены натуральные и смесовые текстильные материалы (ткань «БиО-Терм» состав 90% хлопок, 10% полиамид с антистатической нитью). Показано, что натуральный материал обеспечивает более высокий уровень защиты, в частности от электрической дуги, при этом синтетические материалы легче и обладают высокими физико-механическими показателями [49], однако в пакете ткань не только воспринимает механические нагрузки, но и должна обеспечивать гигиенические свойства. Исследована полульняная парусиновая ткань для спецодежды, состоящая из натуральных льняных и хлопковых волокон [50], наноструктурирование которой неравновесной низкотемпературной плазмой обеспечило повышение разрывной нагрузки и стойкости к истиранию до 4,2 раз относительно исходного текстиля. В работе [51] проанализированы многофункциональные текстильные материалы для защитной спецодежды с содержанием натуральных хлопковых волокон и полиэстера, включая «Премьер Коттон 300», «Премьер Комфорт-250» и «Коттон

Рич 180», после наноструктурирования холодной плазмой и нанесения водо-, маслостойко- и нефтемаслостойкоотталкивающих пропиток для повышения стойкости к морской воде. Данные исследования не включают оценку сохранения паропроницаемости натурального текстиля в многослойных композитах и пакетах материалов.

В исследовании [52] изучены текстильные материалы в качестве основы для обработки водным раствором на основе силана марки А-1100 для формирования гидрофобных свойств и снижения гигроскопичности в целях применения материалов в спецодежде, контактирующей с водой без выраженного ухудшения гигиенических и физико-механических характеристик [52]. Хамматовой В.В. систематизированы исследования текстильных материалов для работников химической, нефтехимической и нефтедобывающей отраслей, модифицированные плазмой, с полимерными покрытиями и водоотталкивающей пропиткой. В качестве основного показателя защитных свойств выделена стойкость к агрессивным средам, включая нефть, щелочь и кислоту [53]. В работе [54] по оценке уровня качества наноструктурированных тканей исследованы материалы специальной одежды с хлопковыми и полиэфирными волокнами после опытных носок и стирок, установлено, что их плазменное наноструктурирование повышает качество спецодежды до 30% по сравнению с контрольными образцами. Следует отметить, что введение синтетического волокна в ткань, нанесение пропиток и полимерных покрытий может приводить к повышению жесткости и снижению комфорта при длительной эксплуатации защитной одежды.

Рассмотрены свойства текстиля специальной защитной одежды с барьерными характеристиками при контакте с биологическими загрязнениями [55]. Представлены решения многослойных материалов специального назначения, где текстильные полотна соединяются в единый пакет с новыми свойствами. В качестве одного из решений охарактеризован материал, включающий огнезащитное текстильное полотно верхнего слоя, сорбционное теплозащитное текстильное полотно нижнего слоя из химических, натуральных волокон или

трикотажа и промежуточный слой полимерного клея, при этом верхний слой может быть выполнен из базальтовой ткани поверхностной плотности 210–225 г/м² [37]. Изучены материалы термоагрессивостойких костюмов, включающие текстиль и воздушные прослойки и подчеркнуто, что температура и влажность подкостюмного пространства влияет на теплопроводность, теплоемкость, поверхностную плотность и защитное действие, поэтому свойства текстильных слоев должны оцениваться в условиях, близких к реальной эксплуатации [29]. В данных исследованиях оценивается улучшение эксплуатационных, в том числе барьерных, свойств текстильных материалов и недостаточно изучена их способность выводить испарения тела человека, в то время как выбор ткани должен опираться на связь между возможными опасными событиями и безопасностью и удобством носки [56].

Систематизация исследований отдельных текстильных основ и их свойств приведена в приложении В.

В охарактеризованных исследованиях текстильные основы для специальной одежды имеют натуральный, синтетический и смесовой состав. Синтетические ткани обладают высокой прочностью, меньшей массой и устойчивостью к ряду эксплуатационных нагрузок, но недостаточно эффективно регулируют влагоотведение от тела и ухудшают пододежный микроклимат, необходимый при длительной работе в спецодежде. Смесовые материалы, хлопкополиэфирные, хлопкополиамидные и полульняные ткани позволяют сочетать прочность синтетических волокон с гигиеническими преимуществами натуральных, однако, смесовой состав в сочетании с закреплением функциональных слоев в пакете усложняет прогноз поведения материала при воздействии агрессивных сред. При нанесении сорбента или мембраны неоднородность волокнистого состава влияет на адгезию, равномерность покрытия, стабильность защитного эффекта и долговечность соединения.

Натуральные текстильные материалы, особенно хлопчатобумажные, льняные и полульняные материалы, обладают преимуществами для применения в пакетах фильтрующего типа, так как отличаются развитой волокнистой

структурой, достаточной гигроскопичностью и воздухопроницаемостью, лучшей физиологической совместимостью с телом человека. Для защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов предпочтительность натуральной ткани связана с характером эксплуатации, вследствие того, что одежда должна как препятствовать проникновению вредных веществ, так и сохранять комфорт и работоспособность человека.

Таким образом, научные изыскания подтверждают, что текстильная основа подбирается по комплексу свойств, так как для пакета материалов защитной одежды от воздействия токсичных веществ важна и устойчивость к агрессивным средам, и эксплуатационные характеристики. Натуральный текстильный материал предпочтителен для разрабатываемого пакета, т.к. сочетает гигиеничность, комфорт, развитую волокнистую поверхность, возможность закрепления дополнительных функциональных слоев, повышающих устойчивость к загрязняющим средам. Совокупность свойств позволяет использовать натуральную ткань как несущий слой, на который осуществляется закрепление сорбента и мембранного слоя в целях создания физиологичного фильтрующего пакета материалов.

1.3.2 Сорбенты в составе пакетов материалов

Сорбирующий слой является функциональной частью пакета материалов защитной одежды фильтрующего типа, назначение которого состоит в улавливании, удержании или химическом связывании токсичных веществ, находящихся в газовой или паровой фазе. В отличие от изолирующих слоев, сорбент препятствует проникновению загрязнителя с одновременным снижением концентрации вредного вещества за счет физической адсорбции, хемосорбции или каталитического разложения.

В работе [57] по материалам с защитными свойствами систематизированы основные группы сорбентов, применяемых для защиты от токсичных веществ. Рассмотрены металлоорганические сорбенты на основе цинка, меди, циркония,

хрома, железа, металлсодержащие наноразмерные сорбенты, самоочищающиеся материалы с функцией дегазации, а также углесодержащие материалы, включая активированный уголь. В исследовании [58] обобщены данные о таких сорбентах как силикагели, оксиды и гидраты алюминия, сложные металлоорганические вещества и угольные сорбенты. Отмечено, что металлсодержащие сорбенты обладают высокой избирательностью, но отличаются повышенной стоимостью, многостадийностью получения и сложностью устойчивого закрепления на текстиле. Наиболее перспективными для защитной одежды показаны активированные угольные сорбенты, вследствие их развитой системы микро-, мезо- и макропор, гидрофобной поверхности и способности задерживать летучие химические вещества и пары нефтепродуктов. В качестве примера приведен материал Саратога, где сферы активированного угля закреплены на текстильной основе адгезивом в точке касания, благодаря чему более 80% поверхности угля остается доступной для поглощения опасных соединений.

Завьяловым В.В. в обобщении современных направлений создания защитных материалов от токсичных химикатов также показано, что перспективные фильтрующе-сорбирующие материалы развиваются в направлении применения активного угля, углеродных волокон, оксидов металлов, комплексных солей металлов, металлоорганических каркасных структур, нано- и биокаталитических материалов. Однако отмечено, что материалы на основе активного угля и других сорбентов не обладают полноценным самоочищением и ограничены сорбционной емкостью, поэтому период отсутствия паров токсичного химиката за слоем материала не превышает 24 ч [59].

Сложные по применяемым компонентам и составу пакеты с сорбентами изучены в работе [60] при разработке фильтрующей защитной одежды, где пары и газы токсичных веществ сорбируются внутренним слоем. В пакете материалов костюма ФЗО-МП используется покровный слой из хлопкополиэфирной ткани с кислотозащитной пропиткой и внутренний слой из фильтрующе-сорбирующей ткани, рассчитанный на аммиак, хлор, гидразин, алифатические амины, фенолы, оксиды азота и сероводород. В пакете костюма ФЗО-МП-2 внутренний

химзащитный слой выполнен из хлопчатобумажной ткани с неуглеродным сорбентом для защиты от гидразина, анилина, фенолов, оксидов азота, нефтепродуктов и масел. Группой авторов [61] рассмотрены современные химзащитные ткани с сорбентами марок ФЦМ-П и ТЛ-3, разработанные АО «КазХимНИИ». Ткань ФЦМ-П представляет собой хлопчатобумажную ткань с закрепленным неуглеродным сорбентом и высокими защитными свойствами по отношению к газообразному гидразину, его производным и аминам, а ТЛ-3 содержит комбинацию неуглеродных сорбентов и не оказывает токсического, кожно-раздражающего и аллергенного действия. Указана защита от паров хлора и аммиака при концентрации 5–10 ПДК не менее 60 мин, а также защита от фенола в разных агрегатных состояниях в течение не менее 60 мин. Недостатком таких сорбентов (ферроцианид меди и золь кремниевой кислоты) является сложность их получения и закрепления на текстиле методом импрегнирования.

В исследованиях зарубежных авторов [62-67] рассмотрены металлоорганические каркасные структуры для дегазации, самодегазации и индикации отравляющих веществ, включая УИО-66, НУ-1000 и другие циркониевые сорбенты, которые, однако, материалоемки и трудозатратны в получении. Иностранные источники также отражают развитие нанотехнологического направления: переход металлоорганических нано каркасов от лабораторных исследований к промышленным и экологическим применениям; применение наносорбентов в спецодежде с барьерными, сорбционными и функциональными свойствами [68-70]. При этом ограничением их широко применения остается сложность синтеза, стоимость, необходимость контроля повторяемости структуры и разработки способов их устойчивого закрепления на текстиле.

В обзоре [71] отражены зарубежные разработки материалов с сорбирующим слоем типа Саратога, где использован углесодержащий адсорбирующий слой, включающие: полиэфирное трикотажное полотно с закрепленными сферическими частицами активированного угля диаметром менее 0,5–0,56 мм; пенополиуретан, импрегнированный активированным углем. В исследовании [46]

произведен анализ свойств сорбционно-фильтрующего материала защитной одежды. Показано, что активированный уголь является одним из наиболее распространенных сорбентов для таких материалов, вследствие высокой адсорбционной способности. Среди известных решений выделены углесодержащие нетканые материалы, углесодержащие фланели, импрегнированная углем пена и ткани со слоем сферических гранул активированного углерода. Выявлено, что плазменная модификация углеродного сорбента повышает ВЗД по газообразному аммиаку на 91-100%, по газообразному хлору на 56-78% по сравнению с образцами на основе исходного угля. Исследование воздействия паров нефтепродуктов не осуществлялось.

В работе по технологии получения сорбционно-фильтрующего материала использовали частицы активированного угля марки «ФАС-Э» [72]. Полученный материал предназначен для защиты от токсичных веществ кожно-резорбтивного действия в паровой, аэрозольной и газовой фазе, предложенная технологическая схема ориентирована на промышленный выпуск разработанного материала из российских компонентов. Однако устойчивость материала к воздействию жидких и газообразных компонентов нефти не оценивалась.

Систематизация исследований, отражающих ассортимент сорбентов и сорбционно-фильтрующих материалов, их свойства и назначение приведена в Приложении Г.

Исходя из приведенных исследований, сорбенты, применяемые в защитной одежде, можно разделить на несколько групп:

- минеральные и кремнийорганические сорбенты, включая силикагели, обладают развитой пористой структурой и могут проявлять избирательность в поглощении токсинов, но их сорбционная способность зависит от состояния поверхности и может снижаться при разрушении активных поверхностных групп;
- оксиды и гидраты алюминия, а также комплексные металлоорганические соединения имеют развитую пористость и могут участвовать в обезвреживании токсичных веществ, но их применение ограничено стоимостью, технологической сложностью и риском неблагоприятного воздействия самих компонентов на кожу;

- металлоорганические каркасные структуры перспективны для самодегазации, однако пока остаются более сложным и дорогим направлением для массового производства одежды;

- углеродные сорбенты, которые выгодно отличаются универсальностью и сочетают развитую пористую структуру, высокую удельную поверхность, способность поглощать широкий спектр органических и неорганических токсичных соединений, относительную химическую инертность и доступность для использования в пакетах материалов.

Недостатки неуглеродных сорбентов связаны, прежде всего, с их избирательностью (узким спектром адсорбируемых соединений) и технологической сложностью получения. Металлосодержащие и металлоорганические сорбенты демонстрируют эффективность по отдельным группам токсичных веществ, но требуют сложного синтеза, контроля состава, равномерного распределения в материале и оценки биологической безопасности. Силикагели и минеральные сорбенты чувствительны к влажности и состоянию активной поверхности. Наночастицы и ферментные системы перспективны для реализации свойств самодегазации, но их применение в защитной одежде ограничивается стоимостью, устойчивостью при хранении и эксплуатационной стабильностью.

Соответственно, активированный уголь имеет преимущества для пакета материалов защитной одежды от токсичных веществ и нефтепродуктов, вследствие его доступности, технологической освоенности, совместимости клеевым соединением с текстильной основой. Уголь закрепляется на текстильную основу в виде гранул или частиц различной формы, демонстрирует высокую сорбционную способность к парам токсичных веществ, но недостаточно изучен в части контакта с парами нефтепродуктов. В этой связи для разрабатываемого пакета материалов наиболее обоснованным выступает применение угольного сорбента, закрепленного на текстильном материале.

1.3.3 Мембранный слой пакета материалов

Мембранный слой в пакете материалов защитной одежды выполняет функцию регулирующего барьера, который ограничивает проникновение влаги и части агрессивных сред, но при этом сохраняет возможность отвода водяных паров из пододежного пространства. Согласно исследованию [73] мембраны представляют собой тонкие пленки со специальной структурой, обеспечивающей селективное пропускание веществ. В защитной одежде мембрана может быть ламинированной пленкой, покрытием или пропиткой, нанесенной на ткань. По структуре выделяются монолитные, пористые, асимметричные, ионообменные, газоразделительные, гидрофобные и гидрофильные мембраны.

Для одежды специального назначения наиболее значимы два типа мембран: пористые гидрофобные и беспоровые гидрофильные. Пористые гидрофобные мембраны имеют систему микропор, через которые выводится водяной пар, но задерживается капельная влага, а их эффективность зависит от размера, формы, распределения и устойчивости пор. Беспоровые гидрофильные мембраны не имеют сквозных пор, в них перенос влаги происходит за счет сорбции, диффузии и десорбции молекул водяного пара через полимерный слой. При разработке пакета материалов, рассчитанного на токсичные вещества и нефтепродукты необходимо учитывать данное различие, так как наличие пор повышает риск проникновения загрязнителей к телу индивида при заполнении пор.

Исследованы мембранные материалы для водозащитной специальной одежды [25] и показано, что наиболее агрессивным эксплуатационным воздействием является совместное действие воды и многоцикловых механических нагрузок. Отмечена необходимость выбора мембран с высоким начальным уровнем водонепроницаемости, поскольку при старении уровень водозащитных свойств снижается. В работе [31] обобщены свойства многофункциональных защитных материалов, содержащих текстильные слои и полимерную мембрану по водонепроницаемости, комфортности и надежности. Установлено, что свойства пакетов с мембранами определяются водоупорностью, паропроницаемостью и

составом мембран. Подчеркнуто различие между гидрофильными и гидрофобными материалами: у гидрофильных мембран перенос влаги связан с проводимостью водных сред в зависимости от химического состава полимера, а у гидрофобных – с пористой структурой [74].

В исследовании [75] оценены двухслойные материалы с тканым текстильным слоем и микропористым губчатым мембранным слоем. Установлено, что на паропроницаемость в основном влияет соотношение толщин слоев и коэффициент массопроводности мембраны, который, в свою очередь, зависит от смачиваемости полимера и особенностей пористой структуры. Изучено изменение краевого угла смачивания ПУ мембраны после обработки потоком низкоэнергетических ионов. Установлена возможность направленного изменения поверхностных свойств ПУ мембраны, регулирования гидрофильности, гидрофобности и взаимодействия мембранного слоя с жидкими загрязнителями [76]. В работах [77, 78] исследованы материалы с ПУ мембраной в условиях пониженной температуры, влажности и многоциклового нагружения. Выявлено, что при воздействии низких температур, трения, изгиба и растяжения слоистые материалы склонны к расслаиванию, образованию микротрещин и снижению растяжимости, что неблагоприятно для пористых мембран. Определено, что как размер, так и форма пор определяет сочетание водонепроницаемости и паропроницаемости мембраны. Наиболее эффективной признана структура с «бутылочной» формой пор с узкими устьями на поверхности и широкой внутренней частью.

Для инновационных водо- и воздухонепроницаемые материалов приведены значения паронепроницаемости мембран для различных погодных условий, мембранные материалы рассмотрены, кроме прочего, в качестве слоя поддержания комфортного состояния человека [79]. Автором [80] проанализирован ассортимент современных материалов с мембранным покрытием и их технологические свойства. Отмечено, что при изготовлении изделий с мембранным слоем следует учитывать не только его защитные свойства, но и выбор способа и оборудования для нанесения, а также

технологическую совместимость материала с конструкцией изделия. Рассмотрены отечественные мембранные материалы ГК «Меркурий» и особенности их применения в изделиях [81]. В работах мембранные материалы оцениваются с точки зрения физико-механических и эксплуатационных свойств, барьерных характеристик, технологической целесообразности применения и возможности дизайн-проектирования изделий, однако, их защитные свойства при воздействии токсичных веществ не исследуются.

Автором [82] предложен мембранный многослойный нетканый электропрядный материал на основе ультратонких полимерных волокон. Мембрана имеет градиентное увеличение диаметра волокон по толщине в 1,3–3 раза и воронкообразные межволоконные каналы с расширением в 1,5–4 раза, что повышает износостойкость и устойчивость к воздействию моющих средств. В работе [83] исследовано влияние многократного замораживания-оттаивания на мембранные ткани и установлено, что физико-механические свойства после криовоздействия изменяются линейно и зависят от структуры мембраны, при этом поровые мембраны более устойчивы к такому воздействию, чем беспоровые. Приведены результаты лабораторных испытаний мембран и их ассортимент на отечественном рынке; подчеркнуто, что испытания мембранных материалов позволяют оценить возможности их дальнейшего совершенствования с учетом требований потребителя и экологичности производства [84].

В исследовании [85] получен химзащитный текстильный мембранный материал способом формования из раствора. В качестве основы выбрана ткань арт. 81423 с отделкой «Климат-2», установлено, что для равномерного химзащитного слоя требуется нанесение трех слоев мембранной полимерной композиции, а полученный материал имеет паропроницаемость 4000 г/м² и защиту по газообразному хлору и аммиаку не менее 8 часов. Однако получение и нанесение мембранной композиции из раствора снижает технологичность получения пакета материалов, относительно закрепления в нем готовой мембраны.

В ряде работ [86-88] обобщен ассортимент мембранных материалов специального назначения и значимость для применения в защитной одежде. Рассмотрены материалы с ветро- и водоизоляционными свойствами, сохраняющие способность отведения парообразной влаги; охарактеризован ассортимент мембранных изделий на современном рынке: отмечено, что качество пакета с мембраной определяется ее исходными свойствами и правильным подбором пакета материалов, конструкции и технологии изготовления; исследованы мембранные материалы для химзащитной спецодежды. Подчеркнуто, что изолирующие мембранные пакеты имеют высокую химическую стойкость, но большую массу и низкий комфорт, тогда как фильтрующие материалы обладают лучшими физиолого-гигиеническими свойствами, но недостаточно защищают во влажной среде [88].

В исследовании [89] произведено проектирование системы «костюм – окружающая среда» с применением мембранных материалов ГК «Меркурий», которые анализируются с позиции конструкции, тектоники, технологической целесообразности и возможности промышленного внедрения. Охарактеризованы мембранные материалы для одежды, эксплуатируемой при пониженных температурах. Указаны требования к мембранам – воздухо-, паропроницаемость, водонепроницаемость, прочность, износостойкость стойкости к агрессивным средам [90, 91]. Необходимо отметить, что сложные по составу функциональные мембранные материалы со свойством управления переносом влаги за счет сочетания гидрофобных и гидрофильных покрытий [92] повышают трудоемкость и снижают технологичность процесса получения пакета.

В исследовании [93] изучены супергидрофобные мембранные материалы и покрытия, для которых характерен краевой угол смачивания более 150° и малый угол скатывания капли, перспективные для внешнего слоя пакета, т. к. снижают смачивание поверхности, загрязнение и разрушение материала во влажной среде. Вишневской О.В. оценено влияние плазменной модификации на свойства ПУ мембранных покрытий. После плазменной обработки в среде воздуха отмечены окисление и гидролиз ПУ покрытий, рост интенсивности полос ОН-групп на ИК-

спектрах, а также частичная деструкция ПУ цепей с образованием карбамидных групп [94], что способствует развитию активных центров для удержания полярных загрязнителей, но ухудшает прочностные свойства мембран.

В интересах систематизации мембранных решений из научных исследований в Приложении Д приведены свойства материалов по тематике раздела.

Проведенный обзор исследований по мембранным материалам демонстрирует, что пористые гидрофобные мембраны эффективны для водозащитной и спортивной одежды, где главная задача состоит в сочетании водоупорности и отвода водяного пара. Однако наличие сквозных микропор в пакете материалов для защиты от токсичных веществ и нефтепродуктов ограничивает долговременное ношение спецодежды, т.к. происходит снижение барьерных свойств, вследствие заполнения пористой структуры при воздействии загрязнений и смачивании нефтепродуктами, а также при нарушении геометрии пор при приложении механической нагрузки и старении.

Беспоровые гидрофильные, например ПУ, мембраны не имеют сквозных каналов, поэтому обеспечивают надежный, более долговременный, барьер для жидких загрязнений, газов и паров. Перенос влаги в таких материалах осуществляется не посредством системы открытых пор, а за счет взаимодействия пара с полимерной матрицей и последующей его диффузии. Для пакета с текстильной основой и угольным сорбентом целесообразна реализация данных преимуществ беспоровых мембран. В таком случае сорбционный слой задерживает пары токсичных веществ, а мембрана усиливает защиту от жидкой фазы, влаги и нефтепродуктов без прямого доступа каналов, имеющих в ее структуре, к внутренним слоям.

Следовательно, несмотря на эффект пористых мембран в части вывода водяного пара, выявлены ограничения их применения для химзащитных пакетов, т. к. защитные свойства зависят от доступности пор, степени их загрязнения, сохранения поровой структуры при механических воздействиях, старении и низких температурах. В интересах защиты от нефтепродуктов структура таких мембран создает риски преждевременного смачивания, загрязнения и снижения

паропроницаемости пакета материалов. Беспоровые ПУ мембраны предпочтительны для пакета материалов с сорбирующим слоем за счет отсутствия сквозных пор и большей равномерности барьерного действия. В составе пакета «текстильный материал – активированный уголь – ПУ мембрана» такой слой играет роль гидрофобного барьера от жидких загрязнений и нефтепродуктов, обеспечивая контролируемый перенос водяных паров.

На основе произведенного научного обоснования перспективных слоев пакета материалов для защитной одежды, приведенного в разделах 1.3.1–1.3.3, в таблице 1.3 и на рисунке 1.1 и представлена характеристика модели проектируемого пакета. Для каждого слоя приведены преимущества относительно других материалов.

Таблица 1.3 – Обоснование модели пакета материалов защитной одежды от воздействия токсичных веществ и нефтепродуктов

Состав	Недостатки других материалов	Преимущества выбранных материалов
1	2	3
Натуральная текстильная основа	Синтетические материалы обладают высокой прочностью и малой массой, но могут снижать гигиенические свойства пакета, ухудшать влагообмен и при тепловом воздействии изменять структуру. Смесовые ткани повышают эксплуатационную стойкость, но их неоднородный волокнистый состав может осложнять равномерное нанесение сорбента, отделок и мембранного слоя.	Натуральная основа имеет развитую волокнистую поверхность, достаточную гигроскопичность, физиологическую совместимость и технологическую пригодность для нанесения функциональных слоев. Хлопчатобумажные, льняные и полульняные материалы могут дополнительно модифицироваться плазмой, силанами и защитными пропитками, что повышает прочность, стойкость к истиранию и адгезионную способность.
Угольный сорбент	Минеральные, металлосодержащие и металлоорганические сорбенты могут быть избирательными и эффективными по отдельным веществам, но часто отличаются высокой стоимостью, сложной технологией получения, чувствительностью к влажности и трудностью равномерного закрепления в текстиле. Для некоторых сорбентов требуется дополнительная оценка безопасности при контакте с кожей.	Активированный уголь обладает развитой системой микро-, мезо- и макропор, высокой сорбционной способностью, доступностью и технологической освоенностью. Он способен задерживать широкий спектр паров токсичных веществ и нефтепродуктов, может закрепляться на текстильной основе в виде частиц или гранул, а после плазменной модификации повышает эффективность взаимодействия с газообразными токсичными компонентами.

Окончание таблицы 1.3

1	2	3
Беспоровая полиуретановая мембрана	Пористые гидрофобные мембраны хорошо выводят водяной пар, но их защитность зависит от стабильности микропор. При загрязнении, изгибе, стирке, старении, смачивании нефтепродуктами или изменении геометрии пор возможно снижение барьерных свойств и частичное проникновение низкомолекулярных загрязнителей.	Беспоровая ПУ мембрана не имеет сквозных каналов, поэтому формирует более цельный барьер для жидкой фазы, аэрозолей и нефтепродуктов. Перенос водяного пара осуществляется через полимерный слой за счет сорбционно-диффузионного механизма, что позволяет сочетать защитность с контролируемым влагообменом. ПУ мембрана технологически совместима с текстильной основой и может модифицироваться для регулирования поверхностных свойств.



Рисунок 1.1 – Визуализация модели перспективного пакета материалов защитной одежды фильтрующего типа

Таким образом, научно обоснованная модель пакета материалов соответствует реализации основных функций фильтрующей защитной одежды: в предлагаемом пакете натуральная текстильная основа обеспечивает гигиенические свойства; угольный сорбент отвечает за задерживание паров

токсичных компонентов; беспоровая ПУ мембрана усиливает барьерные свойства к жидким загрязнениям и нефтепродуктам.

1.4 Способы скрепления слоев в пакете материалов для защитной одежды

Формирование пакета материалов защитной одежды требует как обоснования слоев в пакете, так и способа их скрепления. От технологии соединения зависит сохранность функциональных слоев, прочность пакета, герметичность краевых участков, устойчивость к эксплуатации, изгибу, истиранию и воздействию агрессивных сред. Выбор метода, технологий и режимов соединения определяется природой слоев и может отличаться для натуральных тканей, синтетических полотен, нетканого материала, полимерных пленок, мембран, утеплителя, сорбционного слоя или материала с покрытием. В исследованиях технологий скрепления тканых и нетканых материалов их классифицируют на механические, физико-химические и комбинированные. К первым относят иглопробивание, вязально-прошивной и гидроструйный способы, ко вторым – клеевое скрепление, термоскрепление, спанбонд, мелтблаун и бумагоделательный метод, к третьим – сочетание нескольких способов для получения дублированных и многослойных структур [95].

Иглопробивание обеспечивает механическое сцепление волокон за счет прокалывания холста иглами с зазубринами. Такой способ эффективен для получения объемных полотен, утеплителей и прокладочных материалов, но для пакета с угольным сорбентом его применение ограничено, т. к. иглы нарушают целостность слоев, могут смещать частицы сорбента, образовывать сквозные каналы и снижать равномерность защитного слоя [96]. Вязально-прошивной способ формирует соединение за счет прошивания волокнистого холста нитями. В таком случае повышается механическая устойчивость полотна, однако, создаются проколы и линии прошива. При создании пакета материалов для защитной одежды, где необходимо исключить открытые каналы через

сорбционный и мембранный слои, такой способ может применяться только вне зоны функционального барьера [97].

Гидроструйное скрепление основано на перепутывании волокон потоками воды и применяется для получения мягких и достаточно равномерных нетканых материалов. Для сформированного пакета «текстильная основа – угольный сорбент – мембрана» этот способ неприменим, вследствие нарушения потоком воды сплошности нанесения сорбента и невозможности соединения плотной ПУ мембраны с основой по заданному периметру. Комбинированные способы получения материалов позволяют объединять механическое, клеевое и термическое скрепление. В запатентованных разработках барьерно-защитной одежды показана возможность формирования защитного изделия с применением данных способов для нетканых структур [98], однако, применение такого комплекса методов создает риски нарушения целостности сорбента или перекрывания его активной поверхности.

Клеевой способ, используемый для соединения отдельных слоев пакета при помощи адгезива, имеет преимущества в части технологической простоты и возможности соединять разнородные материалы. Как показано в разделе 1.3.2 сорбент, как в зарубежных, так и в российских пакетах материалов фильтрующего типа, закрепляется на текстильной основе клеевым соединением. В работах по нанесению клея на рулонные материалы подчеркивается значение дозирования адгезива и равномерности его распределения по поверхности, что особенно важно для слоистых структур с функциональным покрытием [99]. Сплошное нанесение клея на внешнюю поверхность сорбента недопустимо, вследствие перекрывания им развитой поверхности активированного угля, заполнения пор, снижения сорбционной способности и ухудшения паропроницаемости.

В работе исследовано клеевое соединение слоев материалов в пакет специальной одежды на примере многослойной структуры с основной тканью, подкладочной тканью «Оксфорд», геотекстилем, синтепоном, флизелином и нетканым теплоизоляционным полотном. Для соединения использовался полиамидный клей «Неотерм»: рекомендуемая температура нанесения 110-150

°C; температура размягчения 60 °C; вязкость при 140 °C 7500 мПа·с; плотность 1,05 г/см³. Установлено, что качество клеевого соединения непосредственно влияет на разрывную нагрузку, удлинение и физико-механические свойства пакета [38]. Однако как отмечено выше, сплошное нанесение клея на поверхность угля снижает его сорбционные свойства.

Комбинированное ниточно-клеевое соединение повышает прочность шва и частично компенсирует недостатки стандартного прошивания. Нить обеспечивает механическое удержание деталей, клеевой или герметизирующий слой перекрывает проколы. Такой способ широко применяется в изолирующей одежде, где требуется прочное соединение многослойных материалов, но для фильтрующего пакета с угольным сорбентом имеет ограничения в части повреждения иглой его структуры, риска переноса частиц угля в шов, создания каналов проникновения токсичных веществ, что требует последующей герметизации.

Ламинирование применяется при соединении текстильной основы с пленкой, мембраной или другим полимерным слоем и может выполняться посредством клеевого слоя, термопластичного компонента, давления и нагрева. Для мембранных материалов данный метод распространен в интересах формирования цельного двух- или трехслойного материала. Качество готового пакета зависит от устойчивости соединения слоев и сохранения заданной внутренней структуры материала [100, 101]. Необходимо учитывать охарактеризованные выше ограничения рассматриваемого метода при наличии сорбционного слоя, связанные с клеевым соединением, воздействием давления и температуры, что в совокупности приводит к нарушению сплошности распределения активированного угля, снижению доступной поверхности, ухудшению фильтрующей функции.

Термоскрепление применимо для пакетов, где присутствуют термопластичные волокна или пленки, способные размягчаться и образовывать соединение при нагреве. Так, автором получен холст из волокон, содержащих лигниновое соединение и синтетические полиэтиленовые, полипропиленовые,

полиэфирные волокна, произведено термоскрепление и ламинирование для образования пакета материала [102]. В дополнении к таким группам волокон рассмотрено термоскрепление арамидных, полиамидных, полиакрилонитрильных волокнистых материалов [95]. Соответственно, данный метод эффективен для синтетических материалов, утеплителей и прокладочных слоев, но ограничен в применении для скрепления слоев пакетов с натуральной текстильной основой без термопластичного компонента. Кроме того, при повышении температуры, закономерном в данном методе, возможно повреждение сорбционного слоя, изменение свойств клея, соединяющего сорбент с основой, деформация ПУ мембраны и ухудшение равномерности пакета.

В исследовании [103] проанализированы материалы для химических костюмов и выявлено, что для газонепроницаемых костюмов из 4- или 5-слойных материалов основным способом скрепления является комбинированное ниточно-клеевое соединение, а для материалов с поливинилхлоридным (ПВХ) покрытием применяются сварные способы соединения. Подчеркнуто, что материалы на тканой полиэфирной или полиамидной основе с ПВХ-покрытием, соединенные сварным методом, используются при ликвидации разливов нефти и нефтепродуктов, зачистке резервуаров и воздействии малотоксичных химических веществ в жидкой и паровой фазе. Данный тип пакета является изолирующим, как и в преимущественном объеме научных разработок. Например, в работе [104] и патенте [105] рассмотрены многослойные структуры на основе полимерных материалов для средств защиты кожи, которые требуют сплошного барьерного соединения слоев. Проблемой остается герметичное соединение слоев и швов, а дополнительное усиление защиты мест соединений повышает массу изделия и снижает физиолого-гигиенические свойства.

Сварные способы соединения перспективны для материалов с полимерным покрытием или мембраной. В отличие от ниточного шва, сварка позволяет получить соединение без проколов, что важно для защитной одежды, т. к. прокол в зоне шва становится местом проникновения влаги, токсичного вещества или нефтепродукта. В швейной и текстильной промышленности применяются

термоконтактная, высокочастотная и УЗ сварка. Первый тип сварки основан на нагреве соединяемых материалов контактным инструментом и используется для термопластичных пленок, покрытий и мембран. При использовании термоконтактной сварки требуется точный контроль температуры для исключения перегрева, который приводит к расплавлению и выдавливанию материала, истончению полимерного слоя, деформации мембраны, образованию жесткой кромки и снижению прочности соединения.

Высокочастотная сварка эффективна для ряда полимерных материалов, в частности поливинилхлоридных покрытий, и используется при изготовлении герметичных изделий, однако, такой способ требует специального оборудования и связан с воздействием высокочастотных электромагнитных полей. Для разрабатываемого пакета применение такой сварки ограничено вследствие того, что соединение следует осуществлять локально по периметру и исключить нагрев общей поверхности. Произведен обзор трех видов сварки и выявлено, что термоконтактная создает угрозу перегрева поверхности материала, как следствие, снижения прочности, а высокочастотная сопровождается негативным воздействием полей высокой частоты на структуру материала. Преимуществами УЗ-сварки названы экологичность, прочность, герметичность, эстетичность и возможность автоматизации процесса [106].

УЗ-сварка основана на превращении энергии механических колебаний ультразвуковой частоты в тепловую энергию в зоне контакта скрепляемых материалов. Под действием давления и колебаний термопластичный компонент локально размягчается и формируется соединение слоев пакета. В отличие от сплошного нагрева, УЗ способ позволяет концентрировать энергию в ограниченной зоне, что важно при соединении мембраны с текстильной основой по периметру пакета материалов защитной одежды. В работах [107, 108] исследованы технологические особенности УЗ сварки композиционных материалов на полимерной основе и установлено, что УЗ пригоден для соединения конструкций из нескольких слоев полимеров. Максимальное число слоев при одноразовом пропускании звукового импульса достигает 4-6,

оптимальная толщина соединяемых материалов составляет 1-2 мм, при больших значениях толщины начинается рассеивание и затухание энергии УЗ сварки. Слепуховым С.В. предложен способ УЗ термоконтактной обработки тканевого полотна, при котором внешние и внутренние слои должны содержать не менее 30% полиэстера, а утеплитель выполняется из полиэфирного волокна плотностью 50-200 г/м². Соединение осуществляется УЗ станком с частотой 20 кГц, формируются точки диаметром 1,2–1,4 мм с расстоянием между точками 1,2–1,4 мм, что позволяет получить прочное полотно без жестких швов [109].

Соответственно, УЗ-сварка имеет ряд технологических преимуществ для создания пакетов материалов защитной одежды. Данный вид сварки не требует ниток и клея, т. е. дополнительных расходных материалов, не образует проколов, позволяет автоматизировать процесс и получать ровное соединение. При наличии термопластичного слоя, в нашем случае ПУ мембраны, энергия УЗ используется для локального приваривания мембраны к текстильной основе с сорбентом по заданной траектории, исключая выраженный перегрев и нарушение структуры материала, относительно других видов сварного скрепления слоев.

Для пакета материалов защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов требуется как формирование прочного соединения, так и сохранение сорбционной способности. Закрепление мембраны на угольный слой клеевым соединением приводит к закрытию пор активной поверхности, препятствует поглощению ей паров токсичных веществ и нефтепродуктов. Прошивание пакета через угольный слой и мембрану обуславливает образование проколов, смещение частиц сорбента и нарушение барьерных свойств, также, твердость угля приводит к разрушению иглы при попадании ее на частицы сорбента. Аналогично, использование иглопробивных или вязально-прошивных технологий соединения материалов обуславливает формирование сквозных механических проколов, нарушение равномерности и целостности защитной структуры. Очевидно, что сорбент должен оставаться открытым для контакта с паровой фазой загрязнителей, поэтому сплошное заклеивание сорбента неблагоприятно скажется на свойствах пакета. Мембрана, в свою очередь,

работает как барьерный слой и ее соединение с основой следует производить без перекрывания поверхности сорбента и без разрушения прошиванием.

Можно заключить, что наиболее рациональным способом закрепления ПУ мембраны в разрабатываемом пакете выступает точечная УЗ-сварка. Данный вид скрепления слоев позволяет сформировать заданную траекторию соединения, закрепить мембрану на текстильной основе не прошивая угольный слой и не перекрывая его сорбционную поверхность клеевым соединением. При этом УЗ скрепление локализуется в зоне воздействия, основная рабочая площадь сорбента сохраняет функциональность, обеспечивается фиксация мембраны, снижается количество расходных материалов, формируется герметичное и технологически воспроизводимое соединение.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. РАЗРАБОТКА МЕТОДИК СОЗДАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ И ТАКСОНОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ СОСТАВА СЛОЕВ ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ

В главе обоснован выбор объектов исследования. Приведены методы определения свойств текстильных материалов, сорбентов и мембран, включая методы оценки эксплуатационных, в том числе защитных, характеристик и методы оценки структуры и состава объектов исследования. Охарактеризованы методы статистической обработки результатов исследования. Представлена рекомендуемая методика создания экспериментальных образцов двуслойных (ткань-сорбент) и трехслойных (ткань-сорбент-мембрана) пакетов материалов с применением технологии УЗ-сварки. Предложена методика таксонометрической оптимизации состава слоев пакета материалов.

2.1 Выбор объектов исследования

На основании анализа, проведенного в первой главе, обоснован выбор состава слоев в пакете материалов защитной одежды от воздействия токсичных веществ и нефтепродуктов. В качестве базовой модели принят пакет, включающий натуральную текстильную основу, угольный сорбент и мембранный слой. Такая система позволяет реализовать в пакете механическую устойчивость, приемлемый уровень паропроницаемости, сорбционную активность и барьерную защиту от загрязнителей в жидкой и газообразной фазах.

В качестве первой группы объектов выбраны натуральные текстильные материалы, различающиеся волокнистым составом, переплетением и поверхностной плотностью. Характеристика выбранных текстильных основ приведена в таблице 2.1. Включение в состав объектов исследования тканей «Саржа», «Брезент» и двух артикулов ткани «Молескин» позволяет сопоставить

текстильные материалы с разными характеристиками в интересах реализации их свойств в пакете.

Таблица 2.1 – Характеристика исследуемых текстильных основ

Наименование материала	Производитель, артикул	Состав, переплетение	Поверхностная плотность, г/м ²	Источник
Саржа	ГК «Балтийский текстиль», арт. ЦЦ35668	100 % хлопок, саржевое	240	[110]
Брезент	ООО «ТканиТЕКС», арт. 11135	Лен 48%, хлопок 52%, полотняное	400	[111]
Молескин С-159 ЮГ	ООО «Ивановский меланжевый комбинат», арт. С-159 ЮГ	100 % хлопок, усиленное сатиновое	280	[112]
Молескин С-174 ЮГ	ООО «Ивановский меланжевый комбинат», арт. С-174 ЮГ	100 % хлопок, противоусадочная обработка, усиленное сатиновое	250	[112]

«Саржа» из 100 % хлопка с поверхностной плотностью 240 г/м² выбрана как легкая, относительно другого текстиля, но достаточно прочная натуральная основа. Саржевое переплетение обеспечивает лучшую механическую устойчивость по сравнению с полотняными структурами, а хлопковое волокно сохраняет воздухопроницаемость и способность к влагообмену. Такая ткань может рассматриваться несущий слой для пакета материалов защитной одежды, в котором требуется сохранить умеренную массу и достаточную гибкость. «Брезент» арт. 11135 отличается существенно большей поверхностной плотностью, равной 400 г/м², и, за счет плотной структуры и присутствия льняного компонента, представляет интерес для оценки влияния более тяжелой натуральной основы на прочность и сопротивление деформации. Брезентовые ткани традиционно применяются в защитной и рабочей одежде, где значимы стойкость к механическим нагрузкам, износо- и формоустойчивость [110, 111].

«Молескин С-159 ЮГ» и «Молескин С-174 ЮГ» включены в перечень объектов как хлопчатобумажные ткани усиленного сатинового переплетения,

применяемые для специальной одежды. «Молескин С-159 ЮГ» имеет поверхностную плотность 280 г/м² и может быть использован как более плотная хлопчатобумажная основа с высокой долговечностью, по сравнению с другой маркой. «Молескин С-174 ЮГ» характеризуется меньшей поверхностной плотностью, равной 250 г/м², и противоусадочной обработкой [112], что важно для последующего формирования многослойного пакета, так как при термическом, клеевом или мембранном соединении изменение линейных размеров основы может приводить к внутренним напряжениям и снижению стабильности материала.

Для сравнительной оценки свойств разрабатываемого пакета материалов выбраны промышленно-производимые ХЗМ, характеристика которых приведена в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Характеристика промышленно-производимых ХЗМ

Наименование ХЗМ	Производитель, ТУ, ГОСТ, артикул	Состав	Поверхностная плотность, г/м ²	Источник
ММС-Т	АО «КазХимНИИ», ТУ 8726-152-00209600-2012	Дублерин, волокнистый угленаполненный материал, мембрана, дублерин	320 ± 30	[113]
Форм	ООО НПФ «Фабитекс», ТУ 13.96.16-102-91669329-2018	Полиэфирная ткань с двусторонним угленаполненным покрытием	До 230	[114]
Биоформ	ООО НПФ «Фабитекс», ТУ 13.96.16-103-91669329-2018	Разреженная полиэфирная ткань с двусторонним угленаполненным покрытием	До 280	[114]
ХЗМ 8318	ООО НПФ «Фабитекс», ТУ 8318-093-91669329-2014	Хлопково-полиэфирная ткань с распределенным сорбирующим слоем на основе активированного угля и нанозакрепителя	400	[114]
Митрон	ООО НПФ «Фабитекс», ТУ 8729-091-91669329-2014	Угленаполненный текстиль различного состава	360–380	[115]

Их введение в исследование произведено для сопоставления натуральных текстильных основ и экспериментальных пакетов с уже применяемыми

решениями, в которых присутствуют сорбирующие угленаполненные слои, мембраны или многослойные комбинации. Промышленные аналоги различаются составом, поверхностной плотностью и способом размещения сорбента. Ряд материалов основан на полиэфирных тканях с двусторонним угленаполненным покрытием, другие имеют распределенный сорбирующий слой или комбинированную слоистую структуру.

Материал «ММС-Т» представляет интерес вследствие того, что он является близким по назначению пакетом и представляет собой многослойный химзащитный аналог, в котором совмещены прокладочные слои, волокнистый угленаполненный материал и мембрана. Наличие мембранного компонента позволяет рассматривать «ММС-Т» при сравнении барьерной функции пакетов, а угленаполненный слой служит основой для сопоставления функций сорбционной части. Материалы «Форм» и «Биоформ» имеют двустороннее угленаполненное покрытие на полиэфирной основе. По данным производителя, они предназначены для изготовления защитных изделий специального назначения, а также могут использоваться в составе многослойных СИЗ [113, 114].

«ХЗМ 8318» отличается большей поверхностной плотностью и наличием распределенного сорбирующего слоя на основе активированного угля и нанозакрепителя. «Митрон» относится к угленаполненным текстильным материалам, характеризуется поверхностной плотностью 360-380 г/м², назначение – для применения в защитных изделиях, где сорбирующий компонент работает в условиях механической деформации и контакта с внешней средой [114, 115].

В качестве сорбентов выбраны активированные угли различной природы и гранулометрического состава. В работе использованы угли марок «Сорбер-10», «Даусорб», «Каусорб», «ВСК», «МеКС» и «ФАС». Их основные характеристики (по паспортам и сайтам производителей) представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Характеристика активированных углей, выбранных в качестве сорбентов

Марка сорбента	Производитель	Форма и фракционные признаки	Основные паспортные показатели	Источник
1	2	3	4	5
Сорбер-10	АО «Сорбент»	Гранулы цилиндрической формы черного или темно-серого цвета, диаметр гранул по паспорту 0,9–1,1 мм	Индекс твердости 91%, содержание влаги 4%, общее содержание золы 11%, насыпная плотность 465 г/дм ³ , йодное число 851 мг/г, активность по четыреххлористому углероду 58 %	[116]
Даусорб 12×40	АО «Сорбент»	Дробленый активный уголь, зерна неправильной формы темно-серого или черного цвета	Индекс твердости 95%, содержание влаги 2%, насыпная плотность 500 г/дм ³ , йодное число 952 мг/г, активность по четыреххлористому углероду 58 %, pH 9	[116]
Каусорб 12×40	АО «Сорбент»	Дробленый активный уголь, зерна неправильной формы темно-серого или черного цвета	Индекс твердости 98%, содержание влаги 5%, общее содержание золы 2%, насыпная плотность 561 г/дм ³ , йодное число 1085 мг/г, активность по четыреххлористому углероду 58%	[116]
ВСК А-2	АО «ЭНПО Неорганика»	Активный уголь на основе карбонизированной скорлупы кокосового ореха, очистка неправильной формы черного цвета с металлическим блеском	Прочность при истирании не менее 90 %, массовая доля влаги не более 5%, массовая доля золы не более 3%, адсорбционная активность по йоду 101,0%, суммарный объем пор по воде 0,70 см ³ /г, объем микропор 0,46 см ³ /г, насыпная плотность 470 г/дм ³	[117]
ВСК 8-30	АО «ЭНПО Неорганика»	Активированный уголь для очистки воздушных и жидких сред, неправильной формы черный с металлическим блеском	Прочность при истирании не менее 90%, массовая доля влаги не более 5%, адсорбционная активность по йоду 80,0%, суммарный объем пор по воде 0,51 см ³ /г, объем микропор 0,34 см ³ /г, насыпная плотность 550 г/дм ³ .	[117]

Окончание таблицы 2.3

1	2	3	4	5
МеКС	АО «ЭНПО Неорганика»	Активный уголь, полученный путем парогазовой активации косточкового сырья	Прочность гранул на истирание не менее 75 %, массовая доля золы не более 2 %, насыпная плотность не более 550 г/дм ³ , суммарный объем пор по воде не менее 0,9 см ³ /г	[117]
ФАС	АО «ЭНПО Неорганика»	Сферический активный уголь	Прочность гранул на истирание не менее 90 %, насыпная плотность 500 г/дм ³ , массовая доля влаги не более 3 %, массовая доля золы не более 0,1 %, суммарный объем пор по воде не менее 0,8 см ³ /г, объем микропор не менее 0,4 см ³ /г, рН водной вытяжки 6,0–7,5	[117]
ФАС мелкий	АО «ЭНПО Неорганика»	Сферический активный уголь мелкой фракции до 0,5 мм	Прочность гранул на истирание не менее 90 %, насыпная плотность 550 г/дм ³ , массовая доля влаги не более 3 %, массовая доля золы не более 0,1 %, суммарный объем пор по воде не менее 0,8 см ³ /г, объем микропор не менее 0,4 см ³ /г, рН водной вытяжки 6,0–7,5	[117]

«Сорбер-10», «Даусорб» и «Каусорб» производства АО «Сорбент» представляют интерес как технологически доступные сорбенты с высокими значениями йодного числа и активности по четыреххлористому углероду. «Сорбер-10» имеет цилиндрическую гранулированную форму, что способствует более предсказуемому распределению частиц при нанесении на клеевой слой, но, с другой стороны, требует оценки устойчивости гранул к механическому закреплению и последующему изгибу текстильной основы. «Даусорб» и «Каусорб» представлены дроблеными частицами неправильной формы [116]. Такая морфология, относительно сферических частиц, увеличивает площадь контакта с клеевой композицией, однако, требует контроля равномерности

распределения и возможного осыпания частиц при эксплуатационных деформациях.

Угли «ВСК», «МеКС» и «ФАС» производства АО «ЭНПО «Неорганика» выбраны для сопоставления сорбентов с различной исходной природой и структурой. Сорбент «ВСК», получаемый на основе карбонизированной скорлупы кокосового ореха, характеризуется развитой пористой структурой и рекомендуется для процессов очистки водно-спиртовых смесей. Марка «МеКС» производится путем парогазовой активации косточкового сырья и используется в медицинской практике как гемосорбент и энтеросорбент, вследствие развитой сорбционной поверхности и контролируемых показателей безопасности. Уголь марки «ФАС» и его более мелкая фракция до 0,5 мм представляют интерес из-за сферической формы частиц, высокой прочности при истирании, низкой зольности и наличия выраженного объема микропор [117].

Для закрепления частиц активированного угля на натуральной ткани выбран порошковый термоклей «Рототерм». Такой тип связующего может использоваться в интересах получения дискретного сорбционного слоя, когда микродозы клея распределяются на текстильном материале и в точке касания соединятся с частицами угля, что предотвращает полное экранирование внешней поверхности сорбента.

Функциональные характеристики клея Рототерм приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Функциональные характеристики порошкового термокля Рототерм

Характеристика	Показатель
Плотность, г/см ³	0,945
Показатель текучести расплава при температуре 125 °С, г/10 мин	34,20
Массовая доля винилацетата, %	27,000
Температура размягчения по Вика, °С, не менее	35,00

Применение порошкового термокля «Рототерм» распространено в швейной, обувной и текстильной отраслях в качестве термоплавкого клеевого материала в виде микрогранул специальной полимерной композиции. В рамках данной диссертационной работы его применение продиктовано необходимостью

закрепления активированного угля на поверхности натуральной текстильной основы без образования сплошной непроницаемой пленки. Плотность 0,945 г/см³ и показатель текучести расплава 34,20 г/10 мин при 125°C обеспечивают материалу способность к переходу в расплавленное состояние при умеренном нагреве и формированию контактных зон между основой и сорбентом. Массовая доля винилацетата 27% [118] подтверждает присутствие полярного компонента для адгезионного взаимодействия с текстильной поверхностью и частицами угля.

Мембранные материалы выбраны как отдельная группа объектов, составляющих внешний слой пакета материалов, для реализации первичной барьерной функции пакета. Исследовались гидрофильные беспоровые мембраны «Порелле П600», «Меркуритекс Турбо», «МТ-1» и пористая мембрана «Данафлекс», для выявления различий между беспоровыми и пористыми структурами и их эффективности в пакете.

Характеристика выбранных мембран приведена в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Характеристика мембранных материалов

Наименование	Производитель	Состав	Тип мембраны	Пов. плот- ность, г/м ²	Источ- ник
Данафлекс	ООО «Данафлекс-Нано», г. Казань	100 % ПП	Гидрофоб-ная пористая	20	[119]
Порелле П600	ООО «Фотопринт-Иваново»	100 % ПУ	Гидрофиль-ная беспоровая	30	[120]
МТ-1	ООО «Мембранные технологии», г. Иваново	100 % ПУ	Гидрофиль-ная беспоровая	14	[121]
Меркури-текс Турбо	ООО «Фотопринт-Иваново»	100 % ПУ	Гидрофиль-ная беспоровая	20	[120]

Мембрана Данафлекс представляет собой ПП пористый материал с поверхностной плотностью 20 г/м², что позволяет сопоставить свойства пористой мембраны с гидрофильными ПУ аналогами. Пористый материал обеспечивает высокий массоперенос водяного пара, однако, в условиях заполнения пор токсичными соединениями и нефтепродуктами требует дополнительных

исследований сохранения барьерных свойств после нахождения в среде загрязнителей. «Порелле П600» относится к ПУ гидрофильным мембранам, которые применяются для создания водонепроницаемых и паропроницаемых текстильных систем в целях защиты от внешней влаги при сохранении отвода водяного пара из подкостюмного пространства [119, 120].

Мембрана «Меркуритекс Турбо» также относится к гидрофильным ПУ мембранам и применяется в различных видах одежды, включая изделия специального назначения и, согласно производителю, обеспечивает защиту от проникновения воды и препятствует прохождению ветра, поддерживая тепловое состояние индивида. Мембрана «МТ-1» выбрана как беспоровая гидрофильная мембрана для одежды повседневного и защитного назначения [120, 121]. Механизм работы гидрофильной мембраны связан не с наличием открытых пор, а с диффузионным переносом водяного пара через полимерную структуру. При насыщении водяным паром интенсивность диффузии может возрасти, что позволяет поддерживать дышащие свойства пакета.

Выбранный и обоснованный в данном разделе набор объектов исследования позволяет перейти от общей модели защитного пакета, предложенной в главе 1, к экспериментальному сопоставлению конкретных материалов и установлению оптимальных решений. Сформированная в разделе система объектов служит основой для оценки свойств отдельных марок в каждой группе материалов и определения результата влияния совместной работы слоев материалов в составе двуслойных и трехслойных пакетов защитной одежды на эксплуатационные, в том числе защитные, свойства.

2.2 Методы определения свойств текстильных основ, сорбентов и мембран

2.2.1 Методы оценки эксплуатационных и защитных характеристик объектов исследования

Определение прочности гранул угля. Механическая прочность гранул активированных углей определялась как показатель устойчивости сорбента к разрушению при локальном сжимающем воздействии. Метод основан на одноосном сжатии гранулы между неподвижной подложкой и движущимся пуансоном до момента разрушения образца. Для испытаний использовался измеритель прочности гранул ИПГ-1. Схема прибора включает кожух, пуансон, испытываемую гранулу, матрицу, штангу, стержень, дифференциально-трансформаторную катушку, корпус и пружину. Принцип действия основан на изменении индуктивности дифференциально-трансформаторной катушки датчика, пропорциональном усилию, затрачиваемому на разрушение гранулы. При работе прибора пуансон перемещается в направлении матрицы, оказывает давление на гранулу, после чего в момент разрушения на индикаторе фиксируется значение силы. Вращательное движение двигателя через систему конических шестерен преобразуется в поступательное движение пуансона. После разрушения гранулы направление движения пуансона меняется, а при достижении верхнего положения привод отключается конечным выключателем [122].

Для каждого сорбента отбирали серию из 10-20 гранул. Гранулы размещали на матрице в горизонтальном положении по образующей, чтобы направление усилия было перпендикулярно оси образца, а разрушение происходило в вертикальной плоскости. После каждого измерения рабочую поверхность матрицы очищали от частиц разрушенного сорбента. Полученные значения разрушающего усилия фиксировали в ньютонах. В качестве нормативной основы учитывали положения ГОСТ 21153.5–88, а также подход к определению статической прочности гранул, применяемый для минеральных материалов и сорбентов [123].

Среднее значение разрушающего усилия рассчитывали по формуле:

$$F_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{n}, \quad (2.1)$$

где $F_{\text{ср}}$ - среднее разрушающее усилие, Н; F_i - усилие разрушения отдельной гранулы, Н; n - число испытанных гранул.

Площадь поперечного сечения гранулы определяли по формуле:

$$S = \frac{\pi d_{\text{ср}}^2}{4}, \quad (2.2)$$

где S - площадь сечения гранулы, мм²; $d_{\text{ср}}$ - средний диаметр гранулы, мм.

Прочность гранул рассчитывали как отношение среднего разрушающего усилия к площади сечения:

$$\sigma = \frac{F_{\text{ср}}}{S}, \quad (2.3)$$

где σ - прочность гранулы при сжатии, Н/мм².

Паропроницаемость материалов. Паропроницаемость материалов оценивали согласно ГОСТ Р 12.4.287–2013, стандарт распространяется на полимерные мембраны, полимерные пленочные и текстильные материалы, включающие многослойные компоненты, применяемые в специальной защитной одежде [124]. Методика заключается в определении массы водяного пара, прошедшего через образец материала при заданной температуре, относительной влажности и времени выдержки. В металлический стакан наливали дистиллированную воду объемом 40 ± 1 см³, после чего на заплечико стакана помещали прокондиционированный образец мембранного материала. Ориентация лицевой или изнаночной стороны к воде выбиралась с учетом того, какая сторона материала при эксплуатации контактирует с парами воды. Образец фиксировали прокладками и крышкой. Стаканы с образцами термостатировали 6 ч при температуре 36 ± 1 °С и относительной влажности воздуха 65 ± 5 %, затем взвешивали с точностью 0,0001 г и помещали в гнезда нагревательного прибора. Через заданные промежутки времени стаканы повторно взвешивали.

Паропроницаемость P , г/(м²·ч), вычисляли по формуле:

$$P = \frac{(m_1 - m_2) \cdot 10^4}{S \cdot \tau}, \quad (2.4)$$

где m_1 , m_2 - масса стакана с образцом до и после испытания, г; S – рабочая площадь образца, м^2 ; τ - время испытания, ч. За окончательный результат принимали среднеарифметическое значение шести определений.

Разрывная нагрузка и удлинение текстильных материалов. Разрывные характеристики текстильных материалов определяли по ГОСТ 3813–72. Стандарт устанавливает методы определения разрывной нагрузки, раздирающей нагрузки и удлинения при разрыве для суровых и готовых текстильных тканей и штучных изделий из волокон и нитей различных видов [125]. Перед испытаниями точечные пробы выдерживали в нормальных климатических условиях не менее 24 ч. Из каждой точечной пробы вырезали элементарные пробы в виде полосок. Для оценки анизотропии текстильного материала пробы подготавливали отдельно по направлению основы и по направлению утка. Элементарную пробу закрепляли в зажимах разрывной машины с установленной зажимной длиной и предварительным натяжением, соответствующим поверхностной плотности материала. После включения машины образец растягивался до разрушения. В момент разрыва фиксировали максимальную нагрузку и удлинение. За разрывную нагрузку точечной пробы принимали среднеарифметическое значение результатов всех измерений по основе или по утку.

Удлинение при разрыве рассчитывали по формуле:

$$\varepsilon = \frac{l \cdot 100}{L}, \quad (2.5)$$

где ε - удлинение при разрыве, %; l - абсолютное удлинение элементарной пробы при разрыве, мм; L означает зажимную длину элементарной пробы, мм.

Испытания разрывной нагрузки текстильных материалов проводились на универсальной испытательной машине Шимадзу АГС-5000Н с максимальной нагрузкой 5 кН и автоматической калибровкой усилия. Точность испытательного усилия составляет $\pm 0,5\%$, максимальная скорость перемещения траверсы достигает 1000 мм/мин [126].

Прочность на разрыв мембран. Прочностные свойства плоских полимерных мембран определялись по ГОСТ Р 50111–92. Метод основан на растяжении образца с заданной скоростью деформирования до разрушения и применяется для определения прочностных свойств мембран в сухом состоянии, а также в условиях абсорбционного равновесия с водой [127]. Для испытаний использовали прямоугольные образцы размером 10×150 мм. Перед испытанием образцы в сухом состоянии кондиционировали не менее 16 ч при температуре 23 ± 2 °С и относительной влажности 50 ± 5 %. При подготовке образцов оценивали качество кромок, во избежание надрезов, заусенцев и локальных дефектов, способных стать центрами преждевременного разрушения и занижить фактическое значение прочности мембраны.

Испытания мембран проводились на разрывной машине Метротест РЭМ-5-1. Машины серии РЭМ применяются для определения прочностных характеристик материалов при растяжении, сжатии и других видах механического нагружения. Для РЭМ-5 верхний предел диапазона измерений нагрузки составляет 5 кН, что соответствует диапазону испытаний тонких полимерных мембран, пленок и ламинированных материалов [128].

Раздирающая нагрузка тканей определялась по ГОСТ 3813–72. Метод применялся для оценки сопротивления текстильной основы распространению локального разрыва. Данный показатель дополняет систему оценки прочностных свойств, т. к. материал в составе защитной одежды разрушается не только равномерным растяжением, но и за счет локальных повреждений, зацепов, напряжений в около шовных участках и других, где возникают концентрации нагрузки. Для определения раздирающей нагрузки от каждой точечной пробы отбирали элементарные пробы размером 70×200 мм, часть проб подготавливали для оценки раздирающего по основе, часть – по утку [125].

На каждой элементарной пробе выполняли продольный надрез по средней линии длиной около 120 мм для получения двух язычков. Затем образец складывали и закрепляли в зажимах разрывной машины без перекручивания язычков. Раздирающие проводили на длине 50 мм, не доводя образец до полного

разделения на 2 части. Раздирающей нагрузкой считали показание прибора после окончания процесса раздираания. Испытания выполнялись на машине Shimadzu с соблюдением направления отбора проб и условий закрепления образца.

Оценка пористости и удельной поверхности. Удельная поверхность и параметры пористой структуры текстильных материалов, промышленных аналогов, сорбентов, мембран определялись методом Брунауэра, Эммета и Теллера (БЭТ), а распределение мезопор по размерам оценивалось методом Барретта, Джойнера и Халенды (БДжХ). Оба метода основаны на анализе сорбции газа и применяются для характеристики порошковых и гранулированных пористых материалов. В качестве оборудования использовался анализатор Nova 1200e Quantachrome Instruments. Опирались на методические указания по работе на данном приборе, в которых представлен порядок определения удельной площади поверхности, объема пор и распределения пор по размерам для пористых материалов, катализаторов, сорбентов, керамик и других дисперсных твердых объектов [129, 130].

Метод БЭТ применялся для определения удельной поверхности объектов исследования по изотермам адсорбции азота. В основе метода лежит определение количества адсорбата, необходимого для образования монослоя на доступной поверхности твердого тела. Чем больше площадь внешней и внутренней поверхности пор, тем больше количество газа, удерживаемое материалом в области относительных давлений, соответствующей линейному участку изотерм. В качестве адсорбтива применялся азот при температуре около 77,3 К, который физически адсорбируется на поверхности за счет слабых межмолекулярных взаимодействий и в последующем десорбируется при изменении давления. Перед анализом образец сорбента подвергался подготовке, связанной с удалением влаги и ранее адсорбированных веществ с поверхности пор. Затем в измерительной системе регистрировалась изотерма адсорбции азота при последовательном изменении относительного давления. По линейному участку изотермы рассчитывалась емкость монослоя и удельная поверхность, выражаемая в $\text{м}^2/\text{г}$.

Метод БЭТ позволяет сопоставить сорбенты разной природы по величине доступной поверхности.

Метод БДжХ использовался для оценки распределения пор по размерам в области мезопор, т. е. применим преимущественно для пор диаметром примерно от 2 до 100 нм. Мезопоры участвуют в транспорте молекул к более мелким порам и влияют на скорость сорбции, и на предельную сорбционную емкость. Расчет по методу БДжХ выполнялся по данным десорбционной или адсорбционной ветви изотермы. Результатом выступали ценка суммарного объема пор и их среднего размера, т. к. для защитного пакета материалов важно не только количество сорбционного пространства, но и его доступность при кратковременном контакте с токсичными веществами и нефтяными углеводородами.

Время защитного действия материалов и пакетов. ВЗД материалов и пакетов при воздействии газообразного аммиака определялось как промежуток времени от начала подачи газовой смеси на образец до момента обнаружения вещества за материалом. Испытания проводились с использованием секундомера электронного интегрального С-01, специализированной лабораторной динамической установки для оценки ВЗД (прибора №5) и измерителя параметров микроклимата Метеоскоп-М. Испытания проводили при 20-22 °С и относительной влажности воздуха 40%. Воздействие на образцы производилось с контролем содержания смеси по ГОСТ Р 12.4.286–2017 [131]. Газовоздушную смесь подавали на образец с одной стороны, затем с другой, когда требовалась оценка направленности защитного барьера. Площадь воздействия составляла 20,0 см², скорость подачи смеси через прибор составляла 0,01 ± 0,02 л/мин. Воздух над образцами контролировали индикаторными трубками на аммиак по ГОСТ Р 51712–2001 [132]. При испытании пакетов материалов методика сохраняла тот же принцип, но смесь подавалась со стороны мембраны.

ВЗД при воздействии газовой смеси нефти определялось по аналогичному принципу, но с учетом специфики нефтяных углеводородов как менее летучей и более сложной по составу загрязняющей среды. Газовоздушная

смесь нефти подавалась под образец пакета со стороны мембраны, для исключения влияния механического контакта прибора на мембрану и предотвращения осыпания угля использовали дополнительный слой отбеленной бязи. Контроль воздуха над образцами проводился постоянно индикаторными трубками на углеводороды нефти по гексану согласно ГОСТ Р 51712–2001 [132]. Момент появления углеводородов за образцом принимался за окончание защитного действия.

Измерение краевого угла смачивания. Краевой угол смачивания измеряли на анализаторе формы капли KRÜSS Drop Shape Analyzer DSA25 методом сидящей капли. Для модели DSA25 программный диапазон измерения краевого угла составляет 0-180° [133]. Исследуемый образец размещался на предметном столике прибора, после чего на его поверхность дозировали каплю исследуемой или стандартной тестовой жидкости, производили регистрацию оптической системой прибора изображения профиля капли. Программное обеспечение анализатора обеспечило определение контура капли и установление положения базовой линии на поверхности образца, далее, краевой угол рассчитывался как угол между касательной к контуру капли в точке контакта фаз и поверхностью твердого образца, на которую нанесена жидкость.

2.2.2 Методы оценки структуры и состава объектов исследования

Микроскопия. Микроскопический анализ применялся для получения микрофотографий поверхности текстильных основ, активированных углей, мембранных материалов и промышленно-производимых ХЗМ. Метод позволяет зафиксировать визуальную оценку поверхности текстиля и мембран, форм и размеров частиц сорбента. Использовали цифровой микроскоп Levenhuk D85L LCD со встроенной светодиодной подсветкой, штативом с фокусировкой и координатным столом [134]. При подготовке микрофотографий образцы размещали на предметном столе без дополнительного механического натяжения, чтобы не исказить структуру поверхности. Для текстильных основ фиксировали

характер переплетения, плотность расположения нитей, выраженность ворсистости, наличие поверхностных дефектов и участков с различной степенью разрыхления волокнистой структуры. В случае активированных углей оценивали форму частиц, размерные различия, шероховатость, наличие сколов и мелких фрагментов. Для мембранных материалов анализировали целостность поверхности, наличие видимых пор, складок, повреждений, участков загрязнения и следов механического воздействия.

ИК-спектроскопия. Инфракрасная спектроскопия применялась для оценки химического состава и функциональных групп мембран, используемых при разработке пакета материалов. В работе анализировались ПУ и ПП мембраны по регистрации присутствия характерных полос поглощения, связанных с гидроксильными, карбонильными, эфирными, уретановыми и другими функциональными группами. ИК-спектры регистрировали на спектрометре Perkin Elmer FT-IR Spectrum Two, оборудованном алмазной приставкой нарушенного полного внутреннего отражения. Спектры фиксировали в области $4000\text{--}650\text{ см}^{-1}$ при температуре $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ с разрешением 4 см^{-1} . Для каждого спектра выполняли коррекцию НПВО и автоматическую коррекцию базовой линии [135].

Образцы размещали на кристалле приставки, после чего прижимали штифтом для обеспечения плотного контакта с рабочей поверхностью. Для мембранных образцов анализ проводился непосредственно по поверхности материала. Метод НПВО подходит для анализа полимерных, волокнистых и композиционных материалов, в связи с отсутствием в нем необходимости растворения образца и минимизирует длительность подготовки пробы. При контакте образца с кристаллом НПВО инфракрасное излучение многократно отражается внутри оптически плотного элемента, а в приповерхностный слой материала проникает затухающая электромагнитная волна. Глубина такого анализа обычно составляет несколько микрометров и зависит от длины волны, угла падения излучения, показателя преломления кристалла и свойств образца. В случае алмазной приставки глубина ее проникновения в области около 1000 см^{-1} находится на уровне порядка $1\text{--}2\text{ мкм}$, поэтому метод чувствителен именно к

поверхностному слою, где происходят адгезионные и сорбционные взаимодействия [136]. Интерпретация спектров выполнялась путем сопоставления положения и интенсивности полос поглощения с известными областями колебаний функциональных групп. Для ПУ мембран информативными являются области, отвечающие N–H, C=O и C–O–C связям. При анализе мембран после воздействия токсичных веществ и нефтепродуктов оценивалась сохранность полиуретановой химической структуры в результате пропускания газовой смеси токсинов как через единственный мембранный слой, так и через пакет материалов для защитной одежды.

Совмещенный дифференциально-термический анализ (ДТА), термогравиметрический (ТГ) и дифференциальный термогравиметрический (ДТГ) анализ. Снятие кривых ДТА, ТГ, ДТГ проводилось на совмещенном анализаторе PerkinElmer STA 6000 [137]. Метод ДТА основан на регистрации разности температур между исследуемым образцом и эталоном при нагревании в диапазоне 29-700⁰С со скоростью 10 град/мин. Возникновение температурной разности связано с протеканием в образце эндо- или экзотермических процессов, например плавления, кристаллизации, фазовых превращений, дегидратации или химического разложения, что отражается на термограмме в виде соответствующих тепловых эффектов, положение и характер которых позволяют устанавливать температуры превращений и оценивать термическое поведение материала.

ТГ анализ заключается в непрерывной регистрации изменения массы исследуемого образца в зависимости от температуры, при его нагревании по заданной программе в контролируемой газовой атмосфере, в данном случае в среде воздуха. Результирующая ТГ-кривая позволяет определить температурные интервалы потери или приращения массы, связанные, например, с удалением адсорбированной воды, дегидратацией, термическим разложением, окислением или др. процессами. ДТГ представляет собой математическое дифференцирование ТГ-кривой, когда регистрируется скорость потери массы во времени dm/dt . Пики на ДТГ-кривой соответствуют температурным областям максимальной скорости

изменения массы и позволяют более точно разделять перекрывающиеся стадии термического разложения и устанавливать характерные температуры отдельных процессов. Совместная интерпретация ТГ, ДТГ и ДТА направлена как на оценку термического поведения материала в целом, так и на определение в структуре материала фрагментов различной термостойкости.

2.3 Методы статистической обработки результатов исследований

Определение погрешности прямых многократных измерений проводили в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 [138]. Анализ результатов экспериментальных данных представлен на примере определения разрывной нагрузки по основе текстильного материала «Саржа», испытания которого проводились в соответствии с ГОСТ 3813-72 [125]. Систематическая погрешность при определении разрывной нагрузки ткани «Саржа» по основе минимизировалась посредством регулярной поверки и калибровки разрывного оборудования, применяемого при испытаниях.

Результаты измерений приведены в таблице 2.6.

Среднее арифметическое значение результатов наблюдений вычисляли по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i, \quad (2.7)$$

где: $\bar{x}$ – среднеарифметическое значение результатов измерений, Н;

n – число результатов измерений (n = 15);

x_i – i-й результат измерения, Н.

$$\bar{x} = (742,10 + 742,30 + 741,95 + 742,40 + 742,05 + 742,25 + 741,80 + 742,50 + 742,15 + 741,90 + 742,35 + 742,20 + 741,75 + 742,45 + 742,40) / 15 = 742,17 \text{ Н}$$

Таблица 2.6 – Результаты измерений разрывной нагрузки по основе текстильного материала «Саржа»

№ п/п	Результаты наблюдений x_i , Н	$[x_i - \bar{x}]$	$[(x_i - \bar{x})^2]$
1	742,10	-0,07	0,0049
2	742,30	0,13	0,0169
3	741,95	-0,22	0,0484
4	742,40	0,23	0,0529
5	742,05	-0,12	0,0144
6	742,25	0,08	0,0064
7	741,80	-0,37	0,1369
8	742,50	0,33	0,1089
9	742,15	-0,02	0,0004
10	741,90	-0,27	0,0729
11	742,35	0,18	0,0324
12	742,20	0,03	0,0009
13	741,75	-0,42	0,1764
14	742,45	0,28	0,0784
15	742,40	0,23	0,0529

Абсолютное отклонение i -го результата измерений от среднего значения определяли по формуле:

$$\Delta x_i = \pm (x_i - \bar{x}), \quad (2.8)$$

Максимальное абсолютное отклонение в данной серии измерений: $\Delta x_{\max} = \pm 0,42$ Н (наблюдение № 13: $741,75 - 742,17 = -0,42$ Н).

Относительное отклонение δ , %, характеризующее разброс результатов относительно среднего значения, вычисляли по формуле:

$$\delta = \frac{\Delta x_{\max}}{\bar{x}} \cdot 100, \quad (2.9)$$

$$\delta = (0,42 / 742,17) \cdot 100 = 0,06 \%$$

Среднеквадратическое отклонение серии измерений (выборочное стандартное отклонение) рассчитывали по:

$$S_n = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}}, \quad (2.10)$$

$$S_n = \pm \sqrt{[0,804 / (15 - 1)]} = \pm \sqrt{0,0574} = \pm 0,2396 \text{ Н}$$

где сумма квадратов отклонений $\sum(x_i - \bar{x})^2 = 0,0049 + 0,0169 + 0,0484 + 0,0529 + 0,0144 + 0,0064 + 0,1369 + 0,1089 + 0,0004 + 0,0729 + 0,0324 + 0,0009 + 0,1764 + 0,0784 + 0,0529 = 0,804 \text{ Н}^2$.

Среднеквадратическое отклонение среднего арифметического (стандартная погрешность среднего) рассчитывали по:

$$s\bar{x} = \frac{S_n}{\sqrt{n}}, \quad (2.11)$$

$$s\bar{x} = 0,2396 / \sqrt{15} = 0,2396 / 3,8730 = 0,0619 \text{ Н}$$

Доверительные границы случайной погрешности результата измерений определяли по формуле:

$$\varepsilon = t \cdot s\bar{x}, \quad (2.12)$$

где t – квантиль распределения Стьюдента, устанавливаемый в соответствии с таблицей приложения к ГОСТ Р 8.736-2011 при заданной доверительной вероятности P и числе степеней свободы $(n - 1)$.

При доверительной вероятности $P = 0,95$ и числе степеней свободы $(n - 1) = 14$ квантиль Стьюдента составляет $t = 2,145$:

$$\varepsilon = 2,145 \cdot 0,0619 = 0,1328 \text{ Н}$$

Доверительные границы неисклученной систематической погрешности результата измерений определяли по:

$$\theta = k \cdot \sqrt{\sum \theta_i^2}, \quad (2.13)$$

где θ_i – граница i -й составляющей неисклученной систематической погрешности; k – коэффициент, определяемый принятой доверительной вероятностью и числом слагаемых.

При $P = 0,95$ коэффициент $k = 1,1$.

В соответствии с требованиями ГОСТ 3813-72 разрывная машина, применяемая при испытании текстильных материалов, должна обеспечивать относительную погрешность показаний разрывной нагрузки не более $\pm 1 \%$ от измеряемой величины. Таким образом, граница систематической погрешности оборудования при среднем значении $\bar{x} = 742,17 \text{ Н}$ составляет:

$$\theta = 0,01 \cdot 742,17 = 7,42 \text{ Н.}$$

Для принятия решения о соотношении случайной и систематической составляющих погрешности вычисляли отношение $\theta / s \bar{x}$:

$$\theta / s \bar{x} = 7,42 / 0,0619 \approx 119,9$$

Поскольку значение $\theta / s \bar{x}$ значительно превышает 8, случайная погрешность по сравнению с систематической пренебрежимо мала. Граница суммарной погрешности результата измерений определяется систематической составляющей, обусловленной погрешностью применяемого оборудования:

$$\Delta = \theta = 7,42 \text{ Н}$$

Относительная погрешность результата измерения δd , %, рассчитывалась по формуле:

$$\delta d = \frac{\Delta}{\bar{x}} \cdot 100 \%, \quad (2.14)$$

$$\delta d = (7,42 / 742,17) \cdot 100 \% = 1,00 \%$$

Окончательный результат измерения разрывной нагрузки текстильного материала «Саржа» по основе записывается в виде: $\bar{x} \pm \Delta = 742,17 \pm 7,42 \text{ Н}$ ($P = 0,95$).

Таким образом, установлено, что случайная погрешность серии измерений разрывной нагрузки $\varepsilon = 0,1328 \text{ Н}$ составляет 0,018 % от среднего значения и более чем на два порядка меньше инструментальной систематической погрешности применяемого оборудования $\theta = 7,42 \text{ Н}$, соответствующей 1,00 %, согласно ГОСТ 3813-72. Отношение $\varepsilon/\theta \approx 0,018$ свидетельствует о высокой воспроизводимости результатов эксперимента и пренебрежимо малом вкладе случайной составляющей в суммарную погрешность измерений.

Погрешности остальных значений показателей физико-механических и физико-химических свойств материалов, оцененных в настоящей работе, характеризуются аналогичной закономерностью – во всех случаях значения среднеквадратических отклонений средних результатов серий измерений ниже нормированных метрологических характеристик измерительного оборудования. Указанное обстоятельство позволяет в дальнейшем при анализе полученных результатов пренебречь случайной составляющей погрешности и не отображать

доверительные интервалы случайных отклонений измеряемых величин в табличных данных.

2.4 Рекомендуемая методика создания экспериментальных образцов двуслойных и трехслойных пакетов материалов

Разработка экспериментальных образцов пакетов материалов выполнялась поэтапно, с последовательным формированием сорбционного и мембранного слоев на натуральном текстильном материале. Предлагаемая методика опиралась на принцип закрепления активированного угля на поверхности текстиля в виде дискретного сорбционного слоя. Размещение угля не внутри волокнистого текстильного материала, а на поверхности ткани-основы, обеспечивает доступность сорбционных центров и повышает технологичность процесса получения защитного пакета материалов. В научно-технической литературе по сорбционно-фильтрующим текстильным материалам поверхностное закрепление активированного угля обосновано в качестве перспективного способа формирования защитного слоя, позволяющего сочетать сорбционную активность углеродного компонента с гибкостью и комфортом слоя натуральной ткани [139].

Этап 1. Подготовка натурального текстильного материала включала раскрой фрагментов заданного размера, визуальный контроль поверхности и удаление посторонних механических включений. Образцы выкраивали без перекоса нитей, поскольку нарушение ориентации основы и утка негативно влияет на равномерность нанесения клеевого и сорбционного слоев. Перед нанесением компонентов основу выдерживали в лабораторных условиях до стабилизации влажности и геометрических размеров, так как изменение влажности волокна может влиять на адгезию полимерного связующего, гибкость материала и последующую усадку при термическом воздействии.

Этап 2. Для получения двуслойных образцов в качестве первого слоя использовали натуральную текстильную основу. На ее поверхность наносили порошковый термоклей «Рототерм», выполняющий функцию полимерного

связующего между волокнистой подложкой и частицами активированного угля. В отличие от жидких дисперсий, порошковый термоклей позволяет формировать дискретные зоны адгезионного контакта для закрепления сорбционного материала, исключая чрезмерное покрытие частиц клеем и снижение доступности пористой структуры угля. При использовании порошкового связующего частицы сорбента фиксируются преимущественно в контактных точках, при этом, значительная часть внешней поверхности остается открытой для взаимодействия с парами токсичных веществ и нефтепродуктов.

Нанесение клеевого слоя выполняли равномерным распределением порошкового Рототерм по рабочей поверхности текстильной основы. Массовый расход связующего задавался так, чтобы обеспечить фиксацию частиц угля без образования сплошной пленки. Минимальный расход полимерного связующего оценивался через критерий надежной фиксации гранул на текстильной основе, а увеличение расхода сверх рационального уровня рассматривалось как нежелательное, вследствие риска снижения пористости и паропроницаемости материала.

Этап 3. После нанесения термоклей на поверхности основы распределяли активированный уголь. Сорбент наносили рассевом до получения равномерного слоя частиц. Основная технологическая проблема заключалась в создании максимально однородного покрытия без выраженных скоплений, пустот и участков с избыточной концентрацией угля. При формировании сорбционного слоя учитывалось, что слишком плотное размещение частиц обусловит снижение гибкости и паропроницаемости материала, а недостаточное количество угля создает предпосылки к сокращению защитного ресурса. В этой связи сорбент распределяли так, чтобы частицы покрывали поверхность основы равномерно, не образуя жесткий непрерывный минеральный слой.

Этап 4. Закрепление активированного угля осуществлялось термической фиксацией. Под действием температуры порошковый термоклей переходил в размягченное состояние, смачивал контактные участки волокон текстильных основ и частиц сорбента, после чего при охлаждении формировал адгезионные

мостики. Полученный двуслойный материал включал натуральную тканную основу и сорбционный слой, закрепленный на ее поверхности. При этом клеевой компонент выполнял технологическую роль придания образцам дополнительной устойчивости угольного слоя для реализации последующих испытаний.

Особое внимание уделялось сохранению открытой поверхности активированного угля. При нагревании клея и закреплении частиц не допускалось глубокое их погружение в расплав клея, во избежание блокирования пор, снижения доступности сорбционных центров и ухудшения скорости поглощения загрязнителей. Рациональная структура двуслойного материала предполагала, что гранулы или дробленые частицы угля удерживаются клеевыми контактами, и, одновременно, остаются выступающими над поверхностью основы. Данная схема соответствует принципу закрепления сорбента на поверхности «в точке».

Этап 5. После термофиксации образцы выдерживали до полного охлаждения и стабилизации клеевого слоя. Затем производили первичный визуальный контроль, когда оценивали равномерность распределения угля, наличие осыпания, локальные зоны недостаточного закрепления, загробление материала, складки и участки с нарушенной геометрией. При необходимости свободные частицы, не вошедшие в контакт с клеевым слоем, удаляли легким механическим воздействием, не повреждающим текстильную основу. Данная технологическая операция исключает наличие избыточного свободного угля, искажающего результаты испытаний, загрязняющего и повреждающего слои пакета, снижающего воспроизводимость свойств готового многолойного материала.

Двуслойный материал выступал как промежуточный экспериментальный объект для оценки влияния марки натуральной основы, марки активированного угля на защитные и эксплуатационные характеристики. Испытания такого материала позволили отделить вклад сорбционного слоя от вклада мембраны в защитные свойства пакета.

Этап 6. Получение трехслойного материала выполнялось путем закрепления мембраны на предварительно сформированном двуслойном пакете.

Итоговый образец включал натуральный текстильный материал, сорбционный слой с активированным углем и мембранный слой. Мембрана вводилась в структуру пакета как барьерный компонент, предназначенный для ограничения проникновения жидкой фазы нефтепродуктов и части газопаровой среды. При этом сорбционный слой сохранял функцию поглощения паров токсичных веществ и углеводородных компонентов. Решалась задача соединения слоев без сплошного клеевого перекрытия сорбента и без повреждения мембранного материала.

Трехслойный пакет собирали в заданной последовательности. На подготовленный двуслойный материал укладывали мембрану, ориентируя ее рабочей стороной в соответствии с принятой схемой испытаний. Слои выравнивали по краям, удаляли складки и локальные напряжения, после чего фиксировали положение образца для последующего скрепления.

Этап 7. Для соединения слоев трехслойного материала использовалась УЗ сварка. Метод УЗ-сварки выбран в качестве способа соединения, позволяющего получать прочные точки скрепления всех элементов пакета без введения дополнительного жидкого клеевого состава. В лабораторных условиях применялся переносной УЗ сварочный аппарат МФЭ-36 производства ООО «Мэлфиз», Россия, размер пятна сварного скрепления составлял 1,6 мм. УЗ-сварка соединяет материалы высокочастотными колебаниями, формирует локальный нагрев и применяется, в том числе, для мембран, пластмасс и нетканых материалов [140]. Точечное УЗ скрепление позволяет сохранить подвижность слоев в межточечных зонах с одновременным приданием пакету устойчивости к расслаиванию, что необходимо для сохранения требуемого уровня эксплуатационных свойств защитной одежды и выдерживания ей изгибов, растяжения, трения и контактных нагрузок.

Этап 8. После сварки образцы подвергали визуальному и тактильному контролю. Оценивали равномерность расположения точек скрепления, отсутствие прожогов, разрывов мембраны, складок, деформации основы и осыпания сорбента. Оценивали точку сварки, которая в месте фиксации слоев не должна

вызывать необратимую деформацию мембраны, и отбраковывали образцы с образованием дефекта, формирующего риск последующего разрыва образца при испытаниях. При корректном режиме УЗ-сварки трехслойный пакет сохраняет гибкость, а мембрана надежно удерживается на двуслойной сорбционной основе. Полученные образцы исследовались методом оценки времени защитного действия, приведенным в разделе 2.2, при воздействии газообразных токсичных веществ и газовой смеси нефтепродуктов.

2.5 Предлагаемая методика таксонометрической оптимизации состава слоев пакета материалов

Методы статистического многофакторного анализа, в том числе таксонометрического анализа, применяются для оценки конкурентоспособности швейных изделий специального назначения по совокупности разнородных характеристик. Например, в работе Ж.В. Горностаевой с соавторами [141] таксонометрия представлена как способ сопоставления многомерных объектов, которые отличаются значительным количеством признаков и свойств. Ключевым понятием методики выступает таксонометрическое расстояние, вычисляемое по правилам аналитической геометрии, которое позволяет определить положение каждого объекта в многомерном пространстве признаков относительно других объектов и относительно условной эталонной точки.

В настоящей работе методика таксонометрического анализа адаптируется для оптимизации состава слоев пакета материалов защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов. Простое сравнение по одному показателю в случае широкого ассортимента марок объектов каждого слоя при большом числе разнородных экспериментальных данных усложняет их интерпретацию и не отражает объективной картины рациональности использования тех или иных компонентов в пакете. Очевидно, что текстиль с высокой прочностью может демонстрировать недостаточную паропроницаемость, у мембраны с выраженной барьерной функцией – регистрироваться сокращение

воздухопроницаемости, у сорбента с высокой удельной поверхностью – наблюдаться недостаточная устойчивость к разрушению и т. д.

Для формирования обобщенной оценки предлагается использовать показатели, определяемые по методикам раздела 2.2.1. После получения экспериментальных значений для каждой марки основы, сорбента и мембраны формируется совокупность числовых характеристик, пригодная для ранжирования. Математический смысл предлагаемой процедуры состоит в том, что каждый вариант материала рассматривается как точка в многомерном пространстве. Координатами этой точки являются стандартизованные значения показателей и чем ближе объект к эталонному сочетанию свойств, тем выше его пригодность для включения в состав защитного пакета. Для натуральных текстильных основ это позволяет определить, какая ткань наиболее оптимально сочетает прочность, сопротивление раздиру, паропроницаемость и пр.

Первым этапом таксонометрической оптимизации является формирование исходной матрицы наблюдений X . В строках матрицы располагаются сравниваемые объекты, например, марки текстильных материалов, марки активированных углей, виды мембран или варианты готовых пакетов. В столбцах указываются признаки, по которым проводится сопоставление:

$$X = [x_{ij}], i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \quad (2.15)$$

где m - число сравниваемых объектов, n – число признаков, x_{ij} – значение j -го признака для i -го объекта. В исходной матрице могут одновременно присутствовать показатели в разных единицах измерения. Например, разрывная нагрузка выражена в ньютонах, воздухопроницаемость в мм/с, паропроницаемость в г/(м²·ч), время защитного действия в минутах или часах, удельная поверхность в м²/г и так далее. В данном случае прямое арифметическое сравнение исходных величин невозможно.

Вторым этапом выполняется стандартизация признаков, необходимая для перевода всех показателей к безразмерному виду и устранения влияния разных масштабов измерения. Стандартизованное значение рассчитывается по формуле:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - m_j}{\sigma_j}, \quad (2.16)$$

где z_{ij} – стандартизованное значение j -го признака для i -го объекта, x_{ij} – исходное значение признака, m_j – среднее значение j -го признака по совокупности объектов, σ_j означает среднее квадратическое отклонение данного признака. Среднее значение признака определяется по формуле:

$$m_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij}, \quad (2.17)$$

где суммирование выполняется по всем i от 1 до m .

Среднее квадратическое отклонение рассчитывается по формуле:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (x_{ij} - m_j)^2}, \quad (2.18)$$

где суммирование выполняется по всем i от 1 до m . После стандартизации формируется новая матрица Z , в которой все признаки приведены к сопоставимому виду.

Третьим этапом является разделение признаков на стимуляторы и дестимуляторы. Стимуляторами считаются показатели, увеличение которых повышает пригодность объекта для защитного пакета. К ним относятся, например, разрывная нагрузка, сопротивление раздиру, прочность гранул сорбента, удельная поверхность, суммарный объем пор, паропроницаемость (в пределах допустимого для сохранения защиты) и т. д. Дестимуляторами являются показатели, рост которых ухудшает качество объекта или снижает его пригодность. В зависимости от конкретной системы оценки к ним могут относиться избыточная поверхностная плотность и размер пор.

На основе разделения признаков задается эталонная точка z_0 . Для стимуляторов в качестве эталонного значения принимается максимальное стандартизованное значение по совокупности объектов; для дестимуляторов принимается минимальное стандартизованное значение, что позволяет

сформировать условный идеальный объект, который сочетает лучшие значения всех учитываемых характеристик:

$$z_{0j} = \max_{1 \leq i \leq m} z_{ij} \text{ для стимуляторов} \quad (2.19)$$

$$z_{0j} = \min_{1 \leq i \leq m} z_{ij}, \text{ для дестимуляторов} \quad (2.20)$$

Максимум и минимум берутся по индексу i , то есть по всем сравниваемым объектам для каждого фиксированного признака j .

Четвертым этапом рассчитывается расстояние каждого объекта до эталонной точки. Для этого используется показатель средней абсолютной разницы стандартизованных значений признаков в следующем виде:

$$c_{i0} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_{ij} - z_{0j})^2}, \quad (2.21)$$

где c_{i0} – расстояние i -го объекта до эталона, z_{ij} – стандартизованное значение j -го признака для i -го объекта, z_{0j} – эталонное значение j -го признака. Чем меньше значение c_{i0} , тем ближе рассматриваемая марка материала или вариант пакета к оптимальному сочетанию свойств.

Далее рассчитывается среднее расстояние между объектами и эталонной точкой:

$$\bar{c}_0 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m c_{i0}, \quad (2.22)$$

После этого определяется среднее квадратическое отклонение расстояний

$$S_0 = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (c_{i0} - \bar{c}_0)^2}, \quad (2.23)$$

Максимально допустимое расстояние до эталона рассчитывается по правилу трех сигм:

$$c_0 = \bar{c}_0 + 3S_0, \quad (2.24)$$

На основе этих величин определяется показатель уровня развития:

$$d_i = \frac{c_{i0}}{c_0} \quad (2.25)$$

На практике удобнее использовать модифицированный таксонометрический коэффициент:

$$K_i = 1 - d_i, \quad (2.26)$$

Чем ближе значение K_i к единице, тем выше комплексная предпочтительность объекта. В применении к настоящему диссертационному исследованию – материал или пакет с более высоким таксонометрическим коэффициентом имеет более сбалансированное сочетание эксплуатационных свойств. Предлагаемая методика переводит обоснование состава пакета материалов из алгебраического сопоставления в формализованную статистическую процедуру и позволяет ранжировать объекты по единому комплексному критерию.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ПАКЕТА МАТЕРИАЛОВ С СОРБИРУЮЩИМ И МЕМБРАННЫМ СЛОЯМИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АММИАКА И НЕФТЕПРОДУКТОВ

В главе представлены результаты экспериментальных исследований свойств текстильных материалов, сорбентов, мембран и промышленно производимых химзащитных материалов. Приведены результаты апробации методики таксонометрического анализа. Отражены результаты оценки защитных свойств отдельных слоев и пакетов материалов при воздействии аммиака и нефтепродуктов. Охарактеризован механизм защитного действия с учетом структуры и свойств сорбирующего и мембранного слоя [144-146, 148-152, 154].

3.1 Результаты исследования свойств текстильных материалов

Обеспечение устойчивости спецодежды ликвидаторов аварий к разрывам и деформациям является принципиально важным в условиях интенсивных механических нагрузок и контакта с поврежденными конструкциями и оборудованием, вследствие чего текстильный слой фильтрующего пакета должен обладать высокими показателями прочности на разрыв в сочетании с эластичностью. В главе 1 обосновано, что повышение надежности фильтрующих пакетов материалов спецодежды происходит в направлении совершенствования не только барьерных, но и физико-механических характеристик текстильного материала. Целесообразность проведения исследований разрывной нагрузки и удлинения текстиля различного состава и поверхностной плотности обусловлена необходимостью обоснованного подбора текстильного слоя с заданными разрывными характеристиками, что способствует повышению долговечности спецодежды и сохранению ее защитных свойств при эксплуатации в условиях механических воздействий [142, 143].

В качестве объектов исследования для данной серии экспериментов использовали ткани «Молескин» двух артикулов, 100% х/б ткани саржевого

переплетения компании «Балтийский текстиль» и «Брезент» состава лен/хлопок. Характеристики текстиля приведены в разделе 2.1. Испытания проводились на разрывной машине с программным управлением Шимадзу АГС-5000Н. Определение разрывных характеристик при растяжении осуществлялось по стандартизированной методике для текстильных материалов, охарактеризованной в разделе 2.2.1, согласно ГОСТ 3813-72.

Разрывные характеристики при растяжении исследуемых текстильных материалов представлены в таблице 3.1. Примеры кривых получаемых в результате разрыва образцов сведены в Приложение Е.

Таблица 3.1 – Разрывные характеристики текстильных материалов

Наименование	Нагрузка, Н	Прочность, МПа	Относительное удлинение, %
по основе			
Брезент	793,61	18,46	3,90
Саржа	742,17	26,51	28,39
Молескин С-174 ЮГ	822,83	26,12	29,92
Молескин С-159 ЮГ	829,43	25,92	34,28
по утку			
Брезент	579,62	13,48	12,89
Саржа	554,77	19,81	18,32
Молескин С-174 ЮГ	525,61	16,67	5,71
Молескин С-159 ЮГ	373,79	11,68	6,14

Анализ разрывных характеристик текстильных материалов (таблица 3.1) показал, что минимальное значение прочности по основе имеет «Брезент» – 18,46 МПа, по утку «Молескин С-159 ЮГ» – 11,68 МПа. Относительно минимального значения по основе прочность ткани «Саржа» выше на 43,6%, «Молескин С-174 ЮГ» – на 41,5%, «Молескин С-159 ЮГ» – на 40,4%. По утку минимальным является показатель «Молескин С-159 ЮГ» – 11,68 МПа; прочность ткани «Брезент» выше на 15,4%, «Саржа» – на 69,6%, «Молескин С-174 ЮГ» – на 42,7%. По относительному удлинению по основе минимальное значение имеет «Брезент» (3,90%); удлинение материала «Саржа» выше в 7,28 раза, «Молескин С-174 ЮГ» – в 7,67 раз, «Молескин С-159 ЮГ» – в 8,79 раз. По

утку минимальным значением относительного удлинения обладает «Молескин С-174 ЮГ» (5,71%), тот же показатель для марки «Молескин С-159 ЮГ» имеет значение выше на 7,5%. Наиболее существенно в большую сторону отличаются от «Молескин С-174 ЮГ» значения относительного удлинения ткани «Брезент», в 2,26 раз, и «Саржа» – в 3,21 раза.

Сопоставительный анализ показывает, что среди предлагаемых текстильных материалов наилучшее сочетание прочности и относительного удлинения по основе демонстрирует марка «Молескин С-159 ЮГ» (25,92 МПа; 34,28%), обеспечивая одновременно высокую разрывную нагрузку и устойчивость к растягивающим деформациям. По утку более сбалансированные показатели прочности и удлинения характерны для ткани «Саржа» (19,81 МПа; 18,32 %), что свидетельствует об ее устойчивости к поперечным нагрузкам.

Согласно разделу 2.1, поверхностная плотность исследуемых текстильных основ составляет: «Молескин С-159 ЮГ» – 280 г/м²; «Молескин С-174 ЮГ» – 250 г/м²; «Саржа» – 240 г/м²; «Брезент» – 400 г/м². Сопоставление поверхностной плотности с показателями прочности показывает, что «Брезент» при наибольшей массе (400 г/м²) не обеспечивает максимальных значений прочности по основе (18,46 МПа) и характеризуется минимальным относительным удлинением (3,90%), что свидетельствует о его жесткости и низкой деформационной способности. Соответственно, повышенная масса данного материала не приводит к пропорциональному росту прочностных характеристик. В то же время «Молескин С-159 ЮГ» (280 г/м²) и «Молескин С-174 ЮГ» (250 г/м²) демонстрируют значительно более высокие показатели прочности по основе (25,92-26,12 МПа) и удлинения (29,92-34,28%), при меньшей массе по сравнению с брезентом. «Саржа» при минимальной поверхностной плотности (240 г/м²) обеспечивает высокую прочность по основе (26,51 МПа) и сбалансированные показатели прочности и относительного удлинения по утку (19,81 МПа; 18,32%), что указывает на рациональное соотношение «масса–прочность–эластичность».

Следовательно, марки «Молескин» (особенно артикулы С-159 ЮГ по основе и С-174 ЮГ по сбалансированности показателей) и «Саржа» являются

предпочтительными текстильными материалами для фильтрующего пакета, поскольку обеспечивают оптимальное сочетание высокой прочности, достаточной эластичности и умеренной поверхностной плотности. Это позволяет сформировать устойчивый к механическим воздействиям, но не избыточно тяжелый пакет материалов, что критически важно для спецодежды, предназначенной для длительного ношения в условиях ликвидации аварий.

Таким образом, в ходе исследования проанализированы разрывные характеристики натуральных тканей, рассматриваемых в качестве материалов основы пакета фильтрующего типа для производства спецодежды. Установлено, что «Брезент» при наибольшей поверхностной плотности (400 г/м^2) имеет минимальную прочность по основе ($18,46 \text{ МПа}$) и пониженную деформационную способность (относительное удлинение по основе $3,90\%$), что свидетельствует о его жесткости и меньшей пригодности к длительной эксплуатации в условиях динамических нагрузок. Получено, что хлопчатобумажные ткани сатинового («Молескин») и саржевого переплетений при меньшей поверхностной плотности ($240\text{--}280 \text{ г/м}^2$) демонстрируют более высокую прочность по основе ($25,92\text{--}26,51 \text{ МПа}$) и существенно более высокое удлинение по основе ($28,39\text{--}34,28\%$), что подтверждает их преимущество по совокупности показателей «масса–прочность–эластичность» [144].

В ходе данной серии экспериментов оценивали устойчивость к воздействию раздирающих нагрузок (раздиру) текстильных материалов по основе и по утку. В качестве объектов испытаний, по аналогии с оценкой разрывной нагрузки, выбраны те же марки тканей. Раздирающая нагрузка определялась по ГОСТ 3813-72. Методика и оборудование охарактеризованы в разделе 2.2.1.

Результаты оценки устойчивости к раздиру исследуемых текстильных материалов представлены в таблице 3.2. Примеры зависимостей «сила–удлинение», полученных в результате раздира образцов, приведены в приложении Ж.

Таблица 3.2 – Показатель раздирающей нагрузки исследуемых текстильных материалов

Раздирающая нагрузка, Н	Брезент	Саржа	Молескин С-174 ЮГ	Молескин С-159 ЮГ
по основе	37,89	34,14	12,76	14,72
по утку	55,18	41,94	24,77	28,23

В группе текстильных материалов минимальная раздирающая нагрузка по основе зарегистрирована у марки «Молескин С-174 ЮГ» – 12,76 Н, «Молескин С-159 ЮГ» превышает этот показатель на 15,4%. Еще большие значения демонстрируют «Саржа» в 2,68 раза и «Брезент» в 2,97 раза. По утку минимальное значение также выявлено для материала «Молескин С-174 ЮГ» – 24,77 Н, в то время как «Молескин С-159 ЮГ» имеет устойчивость к раздиру выше на 14,0%, «Саржа» на 69,3%. Наиболее выраженное превышение прочности у ткани «Брезент» – в 2,23 раза относительно «Молескин С-174 ЮГ». Максимальными значениями оцениваемого показателя как по основе, так и по утку характеризуется «Брезент» – 37,89 Н и 55,18 Н соответственно, однако его поверхностная плотность составляет 400 г/м², тогда как «Саржа» имеет 240 г/м², «Молескин С-174 ЮГ» 250 г/м², а «Молескин С-159 ЮГ» 280 г/м². Следовательно, преимущество брезента по значению раздирающей нагрузки сопряжено с большей массой кв. метра материала, что обуславливает больший вес итогового пакета и готового костюма.

Важность установленного результата для внутреннего текстильного слоя пакета материалов спецодежды связана с тем, что разрушение ткани при локальном зацепе или надрезе костюма обломками объекта нефтехимической инфраструктуры развивается как в продольном, так и в поперечном направлении. С учетом поверхностной плотности наиболее рациональным является применение ткани «Саржа» в составе пакета материалов фильтрующего типа, которая при поверхностной плотности в 240 г/м² она устойчива к раздиру с нагрузкой 34,14 Н по основе и 41,94 Н по утку. В качестве второго перспективного варианта может рассматриваться «Молескин С-159 ЮГ», уступающий материалам «Саржа» и

«Брезент» по устойчивости к раздирающей нагрузке, но имеющий большее значение анализируемого показателя относительно марки «Молескин С-174 ЮГ» и меньшую поверхностную плотность по сравнению с тканью «Брезент» [145].

Определение поровых характеристик производилось вследствие их влияния на диффузионную проницаемость, сорбционную способность, влаго- и воздухообмен, гигроскопичность. В качестве объектов анализа выбраны текстильные материалы, охарактеризованные в разделе 2.1.

Характеристики пористости и удельной поверхности оценивали на анализаторе Nova 1200e, согласно методике, представленной в 2.2.1. Удельную поверхность определяли методом БЭТ, основанном на анализе количества адсорбированного газа, необходимого для формирования монослоя на внешней и доступной внутренней поверхности материала. Объем и размер пор рассчитывали по изотермам адсорбции/десорбции по методике БДжХ, которая позволяет оценить распределение пор по размерам с учетом капиллярной конденсации и толщины адсорбированного слоя на стенках пор.

Пример изотермы адсорбции представлены на рисунке 3.1 (приведены примеры кривых только для тех материалов, где ход адсорбции/десорбции существенно различается). Изотермы других марок текстиля вынесены в Приложение И. Результаты расчетов характеристик пористости и удельной поверхности сведены в таблицу 3.3.

Для исследуемых текстильных материалов характерен общий вид хода кривых адсорбции с постепенным увеличением количества адсорбированного азота при росте относительного давления p/p_0 и более резким подъемом кривых в области высоких давлений.

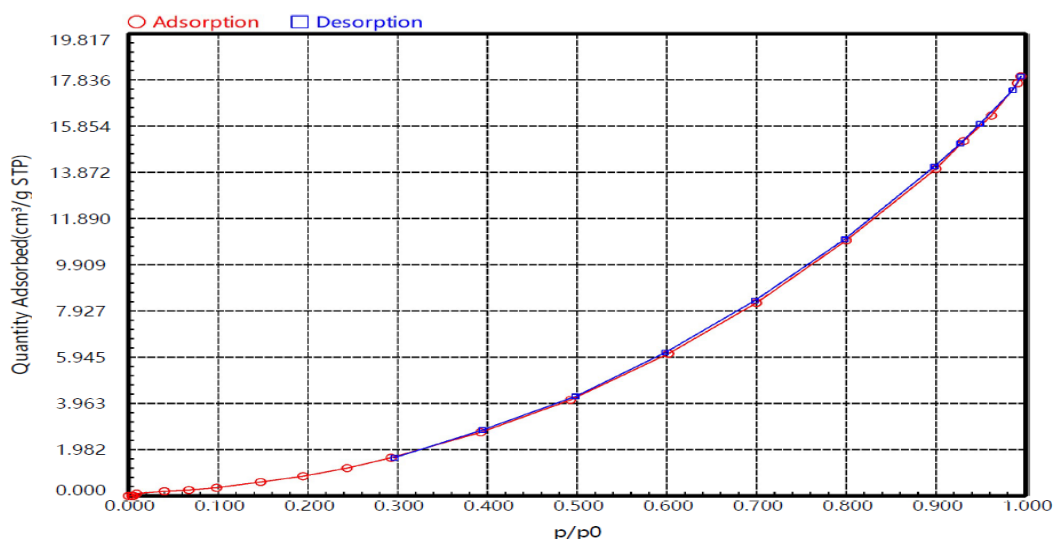


Рисунок 3.1 – Изотерма адсорбции/десорбции материала «Саржа»

У ткани «Брезент» (Приложение И) график идет наиболее плавно и достигает меньших значений сорбции, что согласуется с минимальной удельной поверхностью 12,41 м²/г и минимальным объемом пор 0,0225 см³/г. У саржи (рисунок 3.1) подъем выражен сильнее, а наиболее заметное накопление адсорбата наблюдается у марок «Молескин» артикулов С-174 ЮГ и С-159 ЮГ, что указывает на более развитую доступную поровую структуру. Так, у первого артикула марки «Молескин» объем пор составляет 0,0855 см³/г, а средний их размер достигает 14,05 нм (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Показатели пористости и удельной поверхности текстильных материалов

Наименование образца	Удельная поверхность, м²/г	Объем пор, см³/г	Размер пор, нм
Саржа	20,46	0,0277	5,43
Брезент	12,41	0,0225	7,26
Молескин С-174 ЮГ	24,35	0,0855	14,05
Молескин С-159 ЮГ	24,96	0,0626	10,04

По данным таблицы 3.3 в группе текстильных материалов минимальная удельная поверхность зафиксирована у ткани «Брезент» и составляет 12,41 м²/г. Относительно этого значения тот же показатель выше у саржи на 64,9%, у марки «Молескин С-174 ЮГ» на 96,2%. Выраженное превышение площади удельной поверхности относительно ткани «Брезент» у марки «Молескин С-159 ЮГ» - в 2,01 раза. Соответственно, марки «Молескин» имеют более развитую доступную поверхность, относительно брезента и саржи.

Минимальное значение объема пор регистрируется у материала «Брезент» 0,0225 см³/г, тот же показатель выше у саржи на 23,1%. Наибольшие значения у марок «Молескин С-159 ЮГ» и «Молескин С-174 ЮГ» - выше, чем у ткани «Брезент» в 2,78 и 3,80 раз соответственно. Среди текстильных материалов марка «Молескин С-174 ЮГ» отличается выраженным поровым объемом, что является положительным фактором для осуществления влагоотведения от тела индивида. Следовательно, марки «Молескин» перспективны для создания пакетов материалов, где кроме защитных свойств, обеспечивается поддержание воздухо- и влагообмена в пододежном пространстве.

При оценке размера пор текстильных материалов минимальные значения отмечены у ткани «Саржа» 5,43 нм (таблица 3.3), наибольшие у «Молескин С-179 ЮГ» (выше в 2,59 раза). Для ткани «Брезент» этот показатель выше минимального значения на 33,7%, у марки «Молескин» на 84,9%. По совокупности характеристик у ткани «Саржа» отмечается преимущество в части сочетания умеренного размера и среднего объема пор относительно других анализируемых материалов с достаточно развитой удельной поверхностью 20,46 м²/г. Марки «Молескин», напротив, имеют крупные поры с высокоразвитой поверхностью и значительным их объемом.

Сопоставление анализируемых текстильных материалов позволяет выделить перспективные варианты для внутреннего слоя пакета материалов защитной одежды фильтрующего типа. «Молескин С-174 ЮГ» отличается лучшим поровым объемом среди текстильных основ, что важно для обеспечения влагообмена. «Молескин С-159 ЮГ» демонстрирует максимальную удельную

поверхность среди текстильных основ и меньший размер пор, чем у марки «Молескин С-174 ЮГ», т. е. обладает более сбалансированным сочетанием развитости поверхности, объема и капиллярной структуры. «Саржа» при умеренном объеме пор обладает развитой удельной поверхностью и минимальным размером пор, что важно для стабильности эксплуатационных свойств внутреннего слоя при чрезмерном увлажнении со стороны пододежной среды.

Таким образом, в ходе оценки поровой структуры обосновано, что при разработке внутреннего текстильного слоя для защитной одежды фильтрующего типа необходимо оценивать параметры пористой структуры, так как объем пор, их размер и удельная поверхность определяют доступность внутренней структуры материала, характер влаго- и воздухообмена, а также способность текстильной основы работать в составе многослойного пакета без ухудшения физиологического состояния человека. Выявлено, что среди исследованных тканей наиболее выраженная поровая структура характерна для материалов группы «Молескин». «Молескин С-174 ЮГ» имеет максимальный объем пор $0,0855 \text{ см}^3/\text{г}$ и наибольший их средний размер $14,05 \text{ нм}$, а «Молескин С-159 ЮГ» отличается максимальной удельной поверхностью среди натуральных основ $24,96 \text{ м}^2/\text{г}$ при объеме пор $0,0626 \text{ см}^3/\text{г}$. «Саржа» сочетает умеренный объем пор $0,0277 \text{ см}^3/\text{г}$, развитую удельную поверхность $20,46 \text{ м}^2/\text{г}$ и минимальный размер пор среди текстильных материалов – $5,43 \text{ нм}$.

Установлено, что для внутреннего слоя пакета материалов защитной одежды фильтрующего типа наиболее перспективными (из анализируемых) являются марки «Молескин» и «Саржа». «Молескин С-174 ЮГ» целесообразно применять при необходимости обеспечения высокого влагопоглощения за счет его поровой емкости, наибольшей относительно рассмотренных материалов. «Саржа» предпочтительна, когда требуется сочетание умеренной пористости, достаточной удельной поверхности и более мелкого размера пор, для комфортного взаимодействия материала с кожными покровами [146].

Необходимость оценки паропроницаемости как одного из ключевых показателей при разработке многослойного пакета материалов защитной одежды обусловлена ее непосредственной связью с комфортом пододежного пространства и отведением водяного пара от тела человека. В случае защитной одежды от воздействия токсичных веществ и нефтепродуктов высокая барьерность не должна препятствовать влагообмену и ограничивать длительность безопасной работы, повышать тепловую нагрузку и ухудшать физиолого-гигиенические условия эксплуатации. В составе разрабатываемого пакета текстильный материал выполняет одновременно эксплуатационную и гигиеническую функции. Методика оценки паропроницаемости приведена в разделе 2.2.1, результаты измерений сведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Показатель паропроницаемости текстильных материалов

Материал	Паропроницаемость, г/м ² ·ч
Саржа	36,67
Брезент	39,00
Молескин С-174ЮГ	42,67
Молескин С-159ЮГ	38,00

Согласно данным таблицы 3.4, минимальная паропроницаемость среди исследуемых текстильных основ установлена у ткани «Саржа» и составляет 36,67 г/(м²·ч). Данный показатель принят в качестве базового для внутригруппового сравнения. Далее, большая паропроницаемость зарегистрирована у «Молескин С-159 ЮГ» 38,00 г/(м²·ч), что выше значения саржи на 3,6%. «Брезент» имеет показатель 39,00 г/(м²·ч), что превышает данные для «Саржи» на 6,4%. Наибольшая паропроницаемость отмечена у марки «Молескин С-174 ЮГ» и составляет 42,67 г/(м²·ч), т. е. выше минимального значения на 16,4%. Полученные различия не являются выраженными, все натуральные текстильные основы сохраняют близкий уровень паропроницаемости. Наиболее выраженное значение паропроницаемости у ткани «Молескин С-174 ЮГ» может быть связано с особенностями структуры хлопчатобумажной ткани с противоусадочной обработкой. «Молескин С-159 ЮГ» демонстрирует близкий показатель к ткани

«Саржа», что отражает большее сопротивление переносу водяного пара по сравнению с «Молескин С-174 ЮГ». «Брезент», несмотря на наивысшую из всех объектов поверхностную плотность, показывает паропроницаемость выше «Саржи», что, вероятно, обусловлено льносодержащим составом с иной капиллярной структурой волокнистой системы.

При распределении потенциальной применимости текстильных основ в пакете только по показателю паропроницаемости они располагаются в следующей последовательности – «Молескин С-174 ЮГ», «Брезент», «Молескин С-159 ЮГ», «Саржа». Следует учитывать, что слишком высокая пароницаемость при недостаточной структурной устойчивости или низких прочностных характеристиках не обеспечивает требуемой надежности пакета. Однако «Саржа» не исключается из набора анализируемых объектов, вследствие ее меньшей поверхностной плотности, высокой прочности и более мелкой поровой структуры. Поэтому данные таблицы 3.5 необходимо рассматривать во взаимосвязи с разрывной нагрузкой, сопротивлением раздиру, поверхностной плотностью, структурой пор и способностью материала удерживать сорбционный слой.

3.2 Результаты исследования свойств промышленно-производимых химзащитных материалов

Для сравнения разрывных характеристик разрабатываемого пакета материалов с имеющимися на рынке аналогами оценивали прочность и эластичность химзащитных материалов ХЗМ 8318, ХЗМ «Биоформ», ХЗМ «Форм», ХЗМ «Митрон», материала «ММС-Т». В приложении К представлены микрофотографии поверхности промышленных аналогов. Характеристики материалов приведены в разделе 2.1.

Разрывные характеристики при растяжении исследуемых ХЗМ представлены в таблице 3.5. Примеры зависимостей, получаемых при разрыве образцов – в Приложении Л.

Таблица 3.5 – Показатели разрывных характеристик промышленно-производимых химзащитных материалов

Наименование	Нагрузка, Н	Прочность, МПа	Относительное удлинение, %
по основе			
ХЗМ 8318	664,01	14,70	16,53
Биоформ	527,20	22,43	23,64
Форм	560,10	28,00	25,78
Митрон	1210,81	28,16	25,59
ММС-Т	363,20	7,042	31,51
по утку			
ХЗМ 8318	470,13	10,93	13,78
Биоформ	430,15	18,30	11,77
Форм	395,98	19,80	14,68
Митрон	493,92	11,49	15,86
ММС-Т	346,20	6,07	14,14

Среди промышленно-производимых ХЗМ (таблица 3.5) минимальная прочность по основе зафиксирована у материала «ММС-Т» – 7,04 МПа; остальные материалы превосходят его: «ХЗМ 8318» – в 2,09 раз; «Биоформ» – в 3,19 раз; «Форм» – в 3,98 раза; «Митрон» – в 4,00 раз. По утку минимальное значение также у «ММС-Т» – 6,07 МПа, «ХЗМ 8318» превышает его на 80,1%, Митрон – на 89,3%. Другие материалы имеют прочность, значительно превышающую «ММС-Т»: «Биоформ» – в 3,00 раз, «Форм» – в 3,26 раз.

Сравнение показателей, характеризующих устойчивость к разрыву (а также к раздиру) ХЗМ с текстильным слоем в разрабатываемом пакете материалов с сорбирующим и мембранным слоями целесообразно, вследствие того, что текстиль выполняет функции «несущего» слоя, принимая на себя механические нагрузки на пакет. При сравнении разрывных характеристик ХЗМ с теми же характеристиками материалов текстильного слоя в пакете материалов (раздел 3.1) установлено, что часть из них обладает сопоставимой или большей поверхностной плотностью (360–400 г/м²), однако их прочность по основе (например, ХЗМ 8318 – 14,70 МПа; ММС-Т – 7,04 МПа) существенно ниже показателей марок «Молескин» и ткани «Саржа».

Таким образом, минимальные значения прочности по основе и утку характерны для «ММС-Т» (7,04 и 6,07 МПа соответственно), тогда как ряд других ХЗМ демонстрирует более высокую устойчивость к разрывной нагрузке, однако, при этом их поверхностная плотность в отдельных случаях достигает 360–400 г/м², что определяет большую массу кв. метра материала и, как следствие, защитного костюма [144].

Результаты оценки устойчивости к раздиру промышленно-производимых ХЗМ представлены в таблице 3.6. Примеры графиков зависимостей «сила – удлинение» в Приложении М.

Таблица 3.6 – Показатели раздирающей нагрузки исследуемых ХЗМ

Раздирающая нагрузка, Н	ХЗМ 8318	Биоформ	Форм	Митрон	ММС-Т
по основе	54,21	38,85	54,71	50,6	47,73
по утку	72,39	69,47	73,66	55,05	24,26

Сравнение исследуемой характеристики в группе ХЗМ показало, что по раздирающей нагрузке в направлении основы минимальное значение регистрируется у материала «Биоформ» – 38,85 Н, другие материалы демонстрируют более высокие значения: «ХЗМ 8318» на 39,5%; «Форм» на 40,8%; «Митрон» на 30,2%; а «ММС-Т» на 22,9% относительно «Биоформ». Диапазон значений внутри группы составляет от 38,85 до 54,71 Н. В направлении утка минимальное значение отмечено у «ММС-Т» – 24,26 Н, «Митрон» превышает его в 2,27 раза, «Биоформ» в 2,86 раза, «ХЗМ 8318» в 2,98 раза, «Форм» в 3,04 раза. Наиболее равномерно устойчивым к раздиру в обоих направлениях является «Форм», для которого установлено значение исследуемой характеристики материала по утку 73,66 Н, по основе 54,71 Н.

Если сравнить устойчивость к раздиру ХЗМ с текстильными материалами, изученными в 3.1, то вторые уступают по раздирающей нагрузке в направлении основы. «Брезент» с максимальным для натуральных основ значением в 37,89 Н сопоставим с уровнем «Биоформ» (38,85 Н), значение того же показателя у «Саржи» достигает 87,9% от значения для марки «Биоформ». При этом по утку

ряд текстильных материалов имеет более высокий показатель разрывной нагрузки относительно аналога «ММС-Т», в наибольшей степени «Брезент» в 2,27 раза. Другие ткани имеют менее выраженное превышение: «Саржа» на 72,9%, «Молескин С-159 ЮГ» на 16,4%, «Молескин С-174 ЮГ» на 2,1%. Выявленные преимущества важны для реализации стойкости к раздиру текстильного слоя в пакете материалов, относительно имеющихся на рынке ХЗМ. Удельный суммарный показатель ткани «Саржа», рассчитанный как сумма раздирающей нагрузки по основе и утку на 1 г/м² поверхностной плотности, составляет 0,317 Н на г/м², что практически совпадает с «ХЗМ 8318» (0,317 Н на г/м²), и превышает «Митрон» (0,286 Н на г/м²) и «ММС-Т» (0,206 Н на г/м²) [145].

Характеристика пористости и удельной поверхности. В качестве объектов анализа выбрана та же группа ХЗМ, охарактеризованная в разделе 2.1. На рисунке 3.2 представлена изотерма адсорбции/десорбции на примере марки «ММС-Т» другие графики приведены в Приложении Н, в таблицу 3.7 сведены результаты расчетов характеристик пористости и удельной поверхности.

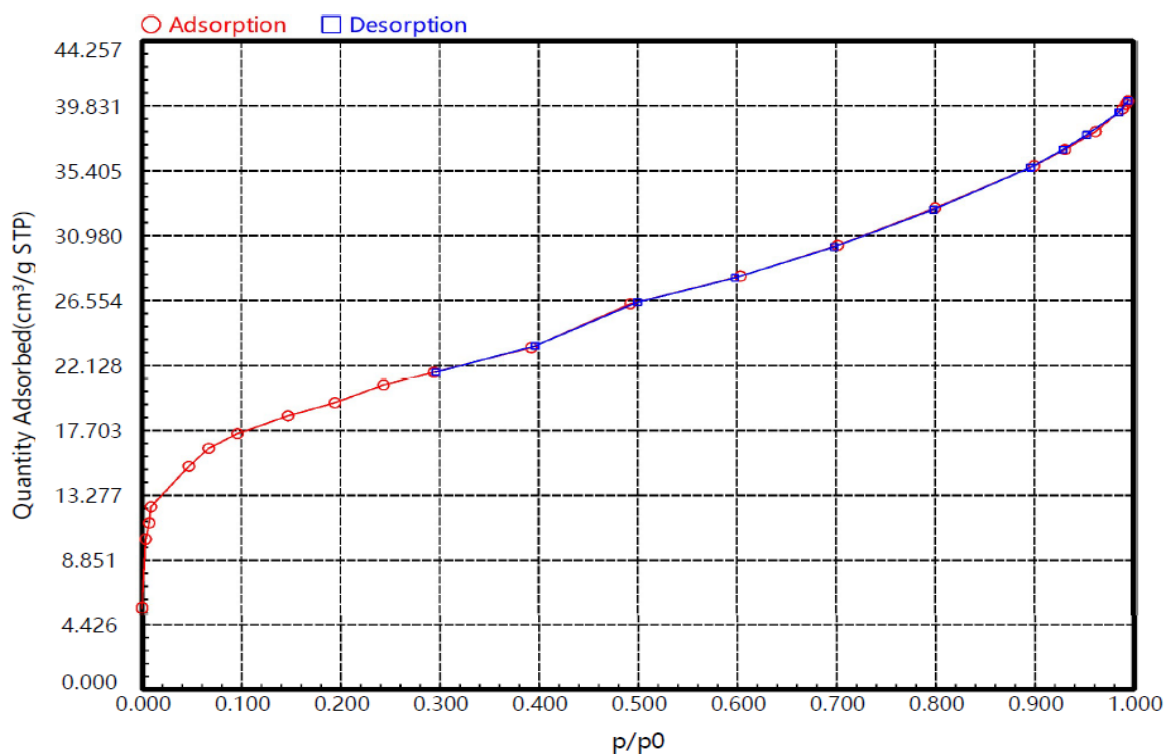


Рисунок 3.2 – Изотерма адсорбции/десорбции материала ММС-Т

Таблица 3.7 – Показатели пористости и удельной поверхности ХЗМ

Наименование образца	Удельная поверхность, м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Размер пор, нм
ХЗМ 8318	25,43	0,0326	5,13
ММС-Т	66,94	0,0621	3,71
Форм	42,60	0,0688	6,46
Митрон	17,09	0,0277	6,49
Биоформ	72,60	0,0971	5,35

В группе ХЗМ минимальное значение удельной поверхности имеет «Митрон» – 17,09 м²/г. Значение того же параметра выше у материала «ХЗМ 8318» на 48,8%. Более существенное, относительно «Митрон» значение показателя удельной поверхности у «Форм» в 2,49 раза, у «ММС-Т» в 3,92 раза, у «Биоформ» в 4,25 раз. При сравнении оцениваемых характеристик текстильных материалов, изученных в разделе 3.1, и промышленно-производимых ХЗМ можно отметить, что марки «Молескин С-159 ЮГ» и «Молескин С-174 ЮГ» приближаются по развитости удельной поверхности к материалу «ХЗМ 8318», но не достигают экстремально высоких значений, характерных для «ММС-Т». Отсутствие избыточно развитой поверхности внутреннего слоя пакета материалов защитной одежды предотвращает его излишнюю сорбционную активность и накопление влаги тела, способствует комфорту ношения.

Минимальный объем пор имеет «Митрон» 0,0277 см³/г, тот же показатель выше у «ХЗМ 8318» на 17,7%. Далее в ряду повышения значения анализируемого показателя относительно «Митрон» следуют «ММС-Т» (в 2,24 раза), «Форм» (в 2,48 раза), «Биоформ» (в 3,51 раза). Если сравнивать полученные данные со значениями раздела 3.1 для текстильных материалов, то «Молескин С-174 ЮГ» превосходит все промышленные аналоги, включая «Форм», у которого объем пор составляет 0,0688 см³/г, а марка «Молескин С-159 ЮГ» по характеристике объема пор близка к «ММС-Т» и несколько уступает «Форм».

Наименьшее значение размера пор имеет материал «ММС-Т» 3,70 нм. Тот же показатель характеризуется более высокими значениями для марок «ХЗМ 8318» – на 38,3%, «Форм» – на 74,1%, «Митрон» – на 74,9%, «Биоформ» на

44,2%. Из ранее изученных текстильных материалов (раздел 3.1) «Саржа» имеет близкие значения к марке «ХЗМ 8318» [146].

Полученные результаты оценки паропроницаемости ХЗМ представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Показатели паропроницаемости промышленно-производимых ХЗМ

Материал	Паропроницаемость, г/м ² ×ч
ММС-Т	21,67
ХЗМ 8318	27,33
Биоформ	27,33
Форм	34,33
Митрон	49,00

Минимальная паропроницаемость зарегистрирована у материала «ММС-Т» и составляет 21,67 г/(м²·ч). Материалы «ХЗМ 8318» и «Биоформ» имеют одинаковое значение 27,33 г/(м²·ч), что выше «ММС-Т» на 26,1%. Для материала «Форм» показатель составляет 34,33 г/(м²·ч), что выше минимального значения на 58,4%. Наибольшая паропроницаемость установлена у мХЗМ «Митрон» – 49,00 г/(м²·ч), что превышает показатель «ММС-Т» в 2,26 раза.

Значительное различие между «ММС-Т» и «Митрон» объясняется особенностями промышленных химзащитных материалов. «ММС-Т» производится в виде многослойной системы с угленаполненным материалом, мембраной и дублирином, поэтому его пониженная паропроницаемость закономерно связана с более сложной слоистой структурой и наличием барьерного компонента. Материалы «ХЗМ 8318» и «Биоформ» занимают промежуточное положение и демонстрируют умеренное сопротивление переносу водяного пара, «Митрон» выделяется наиболее интенсивным паропереносом среди исследованных материалов. Следует подчеркнуть, что в случае промышленно-производимых ХЗМ пониженная паропроницаемость, относительно текстиля изученного в разделе 3.1, обусловлена комплексным составом материалов с угленаполненным слоем или дополнительными пропитками, соответственно, более низкие значения у «ММС-Т», «ХЗМ 8318» и

«Биоформ» могут рассматриваться как следствие сложной структуры. Вместе с тем, для длительной эксплуатации защитной одежды избыточное снижение паропроницаемости нежелательно, т. к. оно повышает риск накопления влаги в пододежном пространстве и ухудшает условия работы ликвидаторов последствий аварий.

Сопоставление показывает, что среднее значение паропроницаемости текстильных материалов раздела 3.1 составляет 39,09 г/(м²·ч), среднее значение по ХЗМ – 31,93 г/(м²·ч). Следовательно, натуральный текстиль в среднем превосходит промышленные аналоги по паропроницаемости на 22,4%, что подтверждает их применимость как внутреннего слоя пакета, способного частично компенсировать снижение влагообмена после введения сорбента и мембраны. Минимальное значение среди текстиля – 36,67 г/(м²·ч) у «Саржи» выше минимума среди промышленных аналогов – 21,67 г/(м²·ч) у ММС-Т на 69,2%, следовательно, даже наименее паропроницаемая натуральная основа демонстрирует более высокий уровень отвода водяного пара, чем промышленно-производимые ХЗМ.

3.3 Результаты исследования свойств сорбентов

Микрофотографии поверхности частиц сорбентов (рисунок 3.3) получены в двух режимах освещения: для одних образцов – подсветка на просвет, передающая контур частицы сплошным темным силуэтом; для других – режим с сохранением полупрозрачности краев и сероватого отлива зерна; оба варианта обеспечивают четкую границу, удобную для измерения линейных размеров частиц.

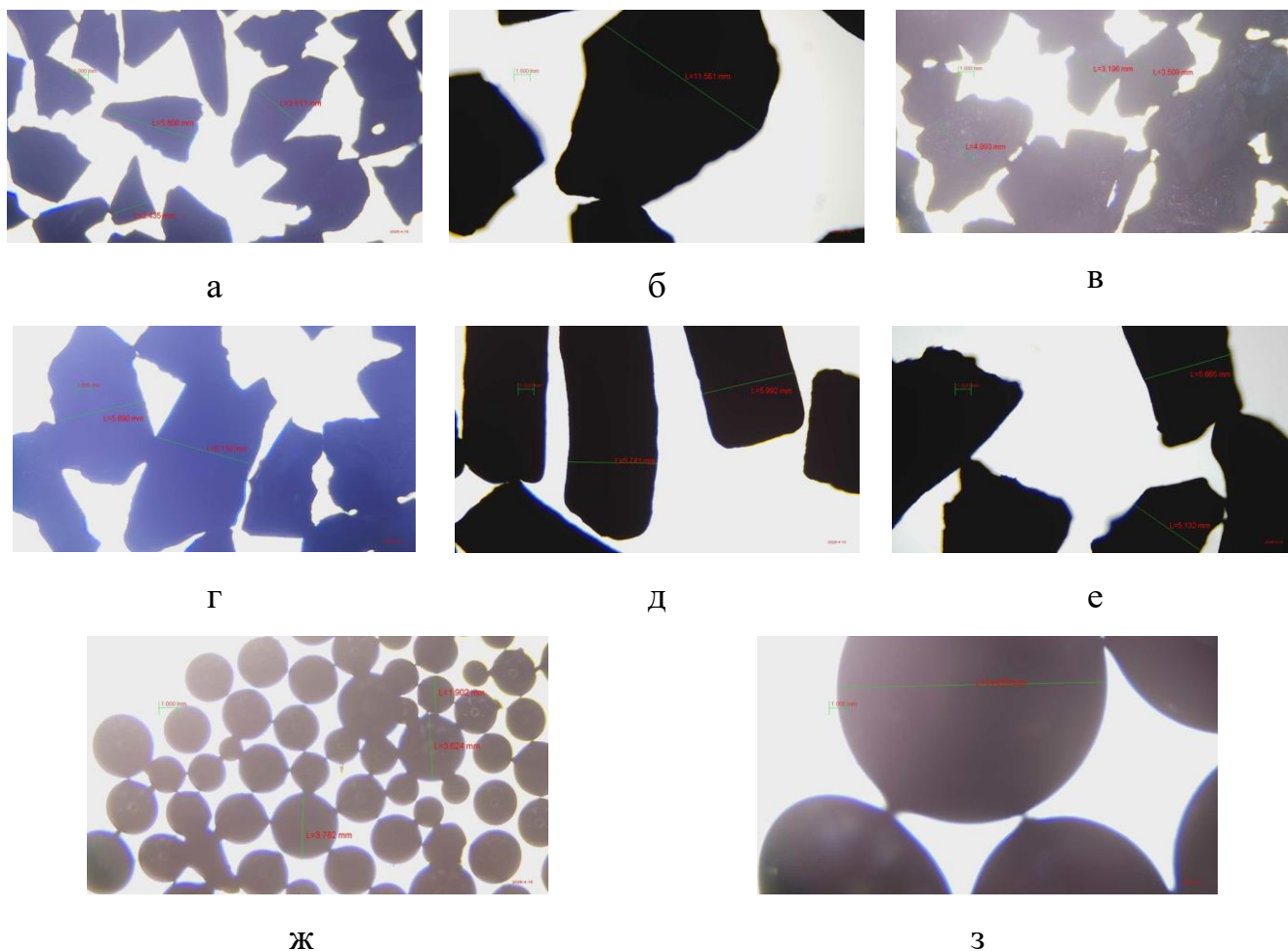


Рисунок 3.3 – Микрофотографии поверхности частиц сорбентов, увеличение $\times 60$: а – ВСК 8-30; б – ВСК А-2; в – Даусорб; г – Каусорб; д – Сорбер 10; е – МеКС; ж – ФАС мелкий; з – ФАС.

Частицы сорбентов «ВСК 8-30», «Даусорб» и «Каусорб» объединяет угловатая, многогранная форма с острыми ступенчатыми краями, характерными для раскола хрупкого зерна: ровных граней на них практически нет, а каждый скол образует новую плоскую грань, пересекающуюся с соседними под произвольным углом. У «ВСК 8-30» измеренные на снимке фрагменты имеют длину от 0,4 до 0,96 мм при выраженной непостоянной форме – от вытянутых клиновидных осколков до широких многоугольных пластин. Частицы «Даусорб» демонстрируют аналогичный угловатый облом, разброс размеров, с длиной отдельных сторон в поле снимка от 0,53 до 0,83 мм; острые, зубчатые кромки указывают на раковистый характер излома, типичный для дробления гранулированного угля. «Каусорб» характеризуется наиболее крупными в этой

группе многогранными обломками размером 0,95–1,017 мм того же угловатого, неправильного облика.

Частицы «МеКС», «ВСК А-2» и «Сорбер-10» сняты в режиме контурной подсветки, поэтому на снимках видна только их сплошная темная форма без текстуры поверхности. Длина фрагментов «МеКС» составляет около 0,86–0,94 мм при сохранении угловатого облика обломков с разбросом размеров частиц. Частица «ВСК А-2» оказывается самой крупной среди негранулированных образцов: ее измеренная длина в поле микрофотографии достигает 1,93 мм, а форма – вытянутая, блочная, с чуть скругленными углами и неровными боковыми гранями. Фрагменты «Сорбер-10» отличаются от дробленых сорбентов вытянутой формой с округлыми, затупленными торцами, т.е. представляют собой гранулированный цилиндрический сорбент, как и указано производителем, с размерами в поле снимка 0,95–1,0 мм. Такой вид предполагает, что измельчению подвергался первоначально экструдированный или колонновидный материал, от которого при разломе сохранились закругленные торцевые участки.

Частицы «ФАС» и «ФАС мелкий» имеют правильную сферическую форму и плотно прилегают друг к другу в кадре, соприкасаясь сразу с несколькими соседними гранулами. У стандартной фракции «ФАС» диаметр шарообразных частиц в поле снимка достигает 2,48 мм, это самые крупные по сечению объекты среди всех изученных сорбентов. Напротив, уголь «ФАС» мелкий имеет наименьшие размеры частиц относительно других сорбентов – 0,3–0,63 мм, что в целом подтверждает заявленную крупность фракции (до 0,5 мм), хотя отдельные частицы незначительно превышают номинальный порог.

Снимки показывают, что исследованные сорбенты заметно различаются по способу формирования частиц: дробление исходного гранулята дает неправильные многогранные обломки разного размера («ВСК 8-30», «Даусорб», «Каусорб», «ВСК А-2», «МеКС»); экструзия и последующее измельчение – регулярные цилиндрические зерна («Сорбер-10»); грануляция через сферообразование – правильные шарообразные частицы («ФАС» и «ФАС мелкий»).

В научных исследованиях подчеркнуто, что важными характеристиками при обосновании выбора различных марок углей для сорбирующего слоя выступают не только размер и форма частиц, но и их прочность [147]. Действительно, устойчивость угольных частиц к механическим нагрузкам определяет сохранность сорбента в ходе эксплуатации спецодежды, ее деформаций и трения, что важно при ликвидации аварий с потерей целостности и разрушением объектов.

Оценка прочности частиц сорбента проводилась по ГОСТ 21153.5–88, регламентирующему процесс измерений разрушающей силы при сжатии. Для испытаний использовались как гранулированные марки углей (типа «ФАС»), так и плоские образцы других марок с предварительным контролем их геометрических размеров. После фиксации разрушающей силы рассчитывался предел прочности по каждой марке. Вследствие неоднородности размеров сорбентов производили не менее 10 измерений с вычислением средних значений, согласно методике, представленной в разделе 1.2.1.

В таблицах отражены результаты оценки прочности частиц сорбирующего слоя в пакете материалов для спецодежды для марок «ФАС» (таблица 3.9) и «ФАС мелкий» сферической формы (таблица 3.10); «Сорбер-10», «Даусорб» и «Каусорб», «МеКС», «ВСК 8-30», «ВСК А-2» (таблица 3.11). Для марок «ФАС» и «ФАС мелкий» определяли диаметр и площадь частицы, после чего делением усилия нагрузки на площадь рассчитывалась прочность, в МПа. Для марок с плоской или условно плоской формой частиц использовалась площадь проекции, так как от нее зависит фактическое распределение нагрузки по поверхности разрушения.

Таблица 3.9 – Оценка прочности образцов частиц угля марки «ФАС»

№ образца	Диаметр гранулы, мм	Площадь гранул, мм ²	Усилие нагрузки, Н	Прочность гранул, МПа (Н/мм ²)
1	2,00	3,14	108,3	34,49
2	1,35	1,43	130,5	91,22
3	1,95	2,98	86,1	28,84
4	1,95	2,98	91,7	30,72
5	1,20	1,13	100,9	89,26
6	1,90	2,83	138,2	48,77
7	2,10	3,46	122,4	35,36
8	1,50	1,77	125,7	71,17
9	1,50	1,77	199,6	113,01
10	1,50	1,77	95,0	53,79
Среднее	1,70	2,33	119,8	59,66

Таблица 3.10 – Оценка прочности образцов частиц угля марки «ФАС мелкий»

№ образца	Диаметр гранулы, мм	Площадь гранул, мм ²	Усилие нагрузки, Н	Прочность гранул, МПа (Н/мм ²)
1	0,50	0,20	19,90	101,40
2	0,60	0,28	45,70	161,71
3	0,55	0,24	29,40	123,81
4	0,65	0,33	45,50	137,19
5	0,67	0,35	29,10	82,58
6	0,70	0,38	53,40	138,83
7	0,74	0,43	41,60	96,77
8	0,72	0,41	12,50	30,72
9	0,59	0,27	16,60	60,75
10	0,44	0,15	7,40	48,69
Среднее	0,62	0,30	30,10	98,25

Согласно таблице 3.9 у марки «ФАС» регистрируется неоднородность размеров, например, диаметр частиц варьируется в диапазоне от 1,2 до 2,1 мм, площадь от 1,13 до 3,46 мм², усилие разрушения от 86,1 до 199,6 Н, а прочность от 28,84 до 113,01 МПа. Средние значения для этой марки составили: по диаметру - 1,70 мм, по площади - 2,33 мм²; по усилию - 119,8 Н; по прочности - 59,66 МПа. По данным таблицы 3.10 можно отметить, что у марки «ФАС мелкий», также

наблюдается разброс размеров. Значения диаметра лежат в интервале 0,44-0,74 мм, площади 0,15-0,43 мм², усилия нагрузки 7,4-53,4 Н, прочности 30,72-161,71 МПа. Средние значения последовательно для всех диапазонов оцениваемых показателей составили 0,62 мм, 0,30 мм², 30,10 Н и 98,25 МПа.

Другие марки и средние значения их характеристик приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Оценка прочности образцов частиц угля исследуемых марок

Марка образца	Площадь частиц, мм ²	Усилие нагрузки, Н	Прочность частиц, МПа (Н/мм ²)
Сорбер-10	1,12	25,8	23,03
ВСК 8-30	0,64	5,3	8,28
ВСК А-2	1,26	5,1	4,05
Каусорб	0,83	9,1	10,96
Даусорб	0,84	6,3	7,50
МеКС	1,21	10,5	8,68

Сравнение марок таблиц 3.9-3.11 по показателю прочности показало следующее:

- Минимальная средняя прочность у марки «ВСК А-2» 4,05 МПа. Далее по возрастанию прочности частиц следуют «Даусорб», «ВСК 8-30», «МеКС», «Каусорб», «Сорбер-10», «ФАС» и «ФАС мелкий», лидирующий по прочности частиц.

- При принятии за расчетную базу прочность марку угля с наибольшей прочностью «ФАС мелкий» 98,25 МПа, остальные марки имеют меньшие значения: «ФАС» в 1,65 раз, «Сорбер-10» в 4,27 раза, «Каусорб» в 8,96 раз, «МеКС» в 11,32 раза, «ВСК 8-30» в 11,87 раз, «Даусорб» в 13,10 раз, «ВСК А-2» в 24,26 раз.

Таким образом, при выборе состава сорбирующего слоя пакета материалов для спецодежды (только по показателю прочности частиц) целесообразно использовать марки «ФАС» и «Сорбер-10», высокие показатели прочности

которых определяются их гранулированной формой сферического и цилиндрического вида соответственно. Среди дробленых марок наибольшее значение прочности демонстрирует «Каусорб», что обеспечит лучшее сохранение целостности частиц при механическом воздействии в составе пакета материалов. Показатель прочности частиц сорбента важен, так как в случае ее низких значений возникает угроза разрушения частиц, нарушения сплошности сорбирующего слоя и целостности защитного костюма [148].

Уголь, в зависимости от сырья и способа его получения имеет различную структуру, объем и размер пор, особенную удельную поверхность, что обеспечивает возможность использования сорбентов и для сплошного, и для избирательного поглощения токсичных веществ в зависимости от характеристик пористости.

Исследование пористой структуры угольных сорбентов производилось аналогично оценке поровых характеристик текстильных основ с последующими расчетами по методам БЭТ и БДЖХ, согласно методике раздела 2.2.1. Объем и размер пор оценивали с учетом того, что поры принимаются цилиндрической формы.

Результаты исследований ассортимента угольных сорбентов, охарактеризованных в разделе 2.1, отражены в таблице 3.12, примеры получаемых изотерм адсорбции азота на рисунке 3.4. Изотермы других марок материалов представлены в Приложении II.

В ходе экспериментов для представленного в таблице ассортимента активированных углей получены два типа изотерм адсорбции - типа I и типа IV (рисунок 3.4), причем тип I характеризуется подтипами Ia и Ib для различных сорбентов:

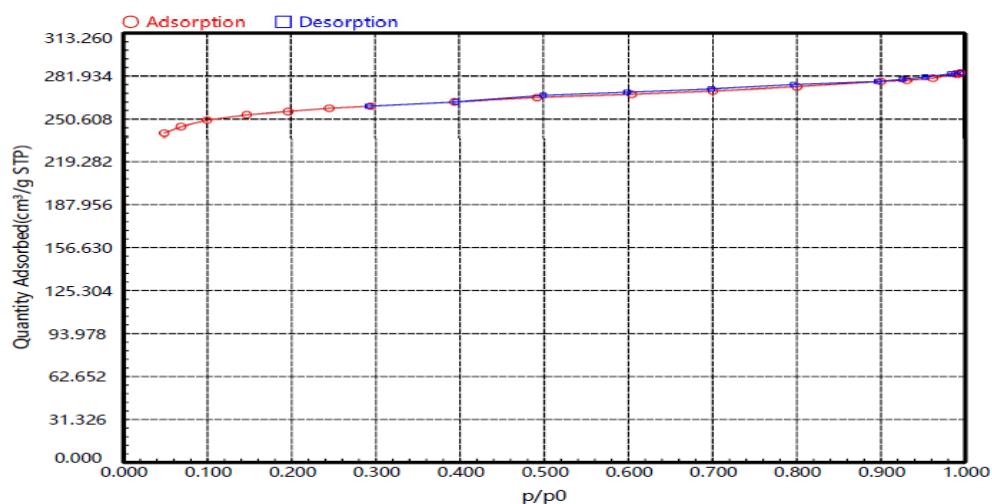
- тип изотерм Ia регистрируется для образца угля «Каусорб»;
- тип изотерм Ib получен для образцов «Сорбент -10», «Даусорб», «МеКС», «ВСК 8-30», «ВСК А-2»;
- тип изотерм IVa характеризует сорбцию азота образцами «ФАС» и «ФАС мелкий».

Таблица 3.12 – Характеристики пористой структуры угольных сорбентов

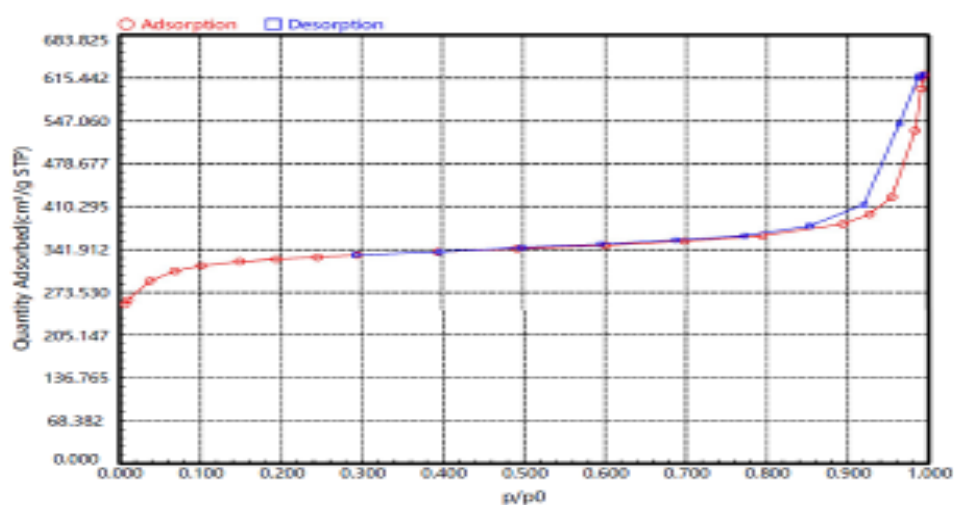
Наименование образца	Удельная поверхность, м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Размер пор, нм
Даусорб	838,27	0,3330	2,34
Каусорб	790,13	0,3689	2,23
МеКС	999,86	0,5896	2,36
ВСК 8-30	1235,28	0,7045	2,28
ВСК А-2	1014,10	0,5834	2,30
ФАС	997,11	0,9592	3,85
ФАС мелкий	2216,57	0,8527	3,63
Сорбер-10	849,11	0,5019	2,36

В целом изотермы типа I характерны для процессов сорбции/десорбции в случае, если сорбент представлен микропористыми твердыми веществами с меньшей развитостью поверхности, относительно сорбентов, характеризующихся изотермой типа IV. Кривые типа I отражают интенсивное поглощение подаваемого азота на начальном уровне в узких микропорах, сопоставимых по размеру с молекулами газа. Соответственно, заполнение таких микропор происходит при низких значениях давления подаваемого газа и практически не изменяется с его повышением. При этом вариация подтипов Ia и Ib обусловлена шириной пор, так, если вид кривых Ia характерен для ширины пор до одного нанометра, то вид кривых Ib отражает поведение системы пор, включающих как широкие микропоры, так и узкие мезопоры до 2,5 нм.

Изотермы типа IVa имеют перегиб и отражают свойства гистерезиса, т.е. запаздывания в изменении объема поглощаемого азота с наращиванием давления, который проявляется при наличии пор в диапазоне 3,5-4,0 нм. Такой характер изотерм присущ микромезопористым углям, к которым, согласно полученным результатам, можно отнести «ФАС».



а



б

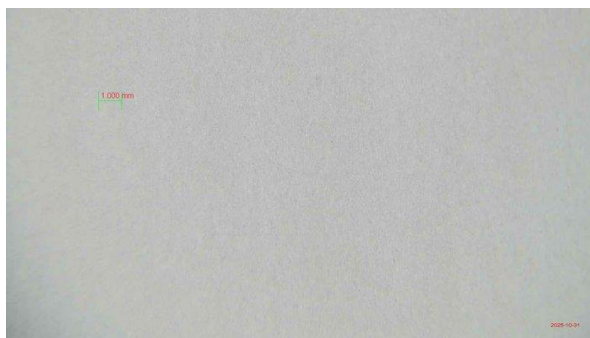
Рисунок 3.4 – Пример изотерм адсорбции типа I (для, слева) и типа IV (для, справа): а – Каусорб; б – ФАС.

Действительно, согласно таблице 3.12 «ФАС» и «ФАС мелкий» имеют преобладающие значения размеров пор 3,85 и 3,63 нм соответственно. Далее значения размеров пор убывают в ряду «МеКС», «Сорбер-10», «Даусорб», «ВСК А-2», «ВСК 8-30», «Каусорб». Также у «ФАС» обычной и мелкой фракции регистрируются наибольшие значения объема системы пор – 0,96 и 0,85 см³/г, что существенно выше, чем у других проанализированных углей. По уменьшению объема пор марки расположены в ряду: «ВСК 8-30», «МеКС», «ВСК А-2», «Сорбер-10», «Каусорб», «Даусорб». Площадь удельной поверхности, которая

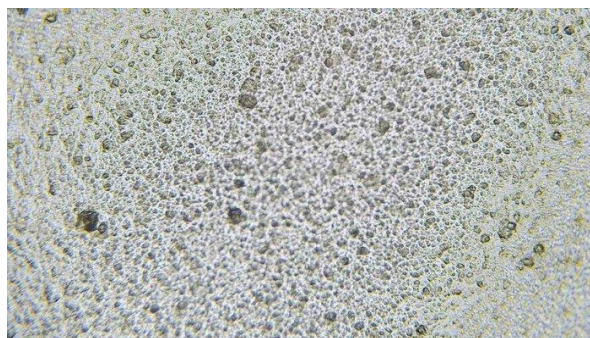
наряду с объемом микропор отражает сорбционные свойства активированного угля, наиболее выражена у мелкоразмерного «ФАС», относительно других углей, – 2216,57 м²/г, далее по уменьшению развитости поверхности следуют «ВСК 8-30», «ВСК А-2», «МеКС», «ФАС», «Сорбер-10», «Даусорб», «Каусорб» [149]. В таком случае можно предварительно заключить, что «ФАС» будет обладать лучшими сорбционными характеристиками, относительно других сорбентов, к аварийно-химическим опасным соединениям. Однако важным является соответствие размера пор угля размеру молекул поглощаемых соединений, а при аварийном выбросе их смесей, наличие в сорбенте развитой системы пор различного размера.

3.4 Результаты исследования свойств мембран

Микрофотографии поверхности отражают вид пористой структуры мембран. Характеристики производителей исследуемых мембран представлены в разделе 2.1. Согласно рисунку 3.5 марки «МТ-1» и «Меркуритекс Турбо» при увеличении $\times 150$ выглядят практически одинаково и демонстрируют плотно испещренный округлыми углублениями рельеф, в котором мелкие и более крупные вмятины неравномерно распределены по полю снимка, местами образуя более редкие, местами – более плотные скопления, без какой-либо регулярной геометрической упорядоченности. Поскольку оба материала относятся к беспоровым гидрофильным ПУ мембранам, эти углубления не являются сквозными каналами, соединяющими лицевую и изнаночную стороны пленки, а представляют собой микрорельеф поверхности, сформированный в процессе ее получения. В таком случае перенос водяного пара происходит не по физическим порам, а диффузионно, через толщу самого полимерного слоя [150].



а



б



в



г

Рисунок 3.5 – Микрофотографии поверхности мембранных материалов, увеличение $\times 150$: а – Данафлекс; б – МТ-1; в – Меркуритекс Турбо; г – Порелле П600

Поверхность мембраны «Данафлекс» при том же увеличении выглядит принципиально иначе – гладкой, визуалью почти однородной, без различимых округлых углублений или отверстий. Это не противоречит пористому характеру данного материала: рабочие поровые каналы полипропиленовой мембраны имеют субмикронные размеры и при оптическом увеличении $\times 150$ не разрешаются как отдельные отверстия, поэтому объектив фиксирует лишь тонкую, мелкозернистую фактуру поверхности, за которой скрыта реальная пористая структура, отвечающая за паро- и воздухопроницаемость материала.

Поверхность «Порелле П600» имеет отличающийся характер, на ней вместо отдельных крупных углублений различима мелкая, плотная и более равномерно распределенная по кадру зернистая текстура, не образующая выраженных дискретных лунок, как у «МТ-1» и «Меркуритекс Турбо». Мембрана имеет более регулярную микропористую структуру полиуретанового слоя, различающегося по

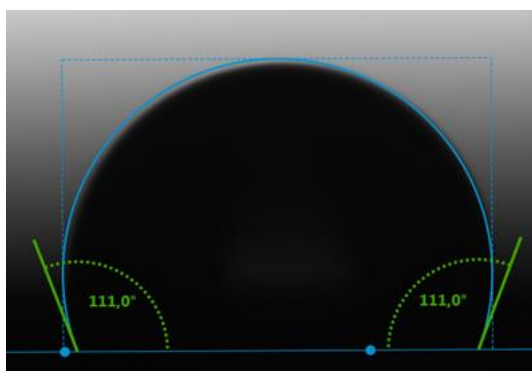
технологии формирования от двух предыдущих мембран, потенциально такое распределение микроканалов в мембране способствует лучшему удержанию токсинов в ней.

Оценка смачиваемости выполнена методом лежащей капли при температуре 20,0 °С с регистрацией краевого угла независимо с левой и правой стороны профиля капли. Оборудование и методика определения краевого угла смачивания представлены в разделе 1.2.1. Полученные значения сведены в таблицу 3.13, фотографии капель представлены на рисунках 3.6 и 3.7.

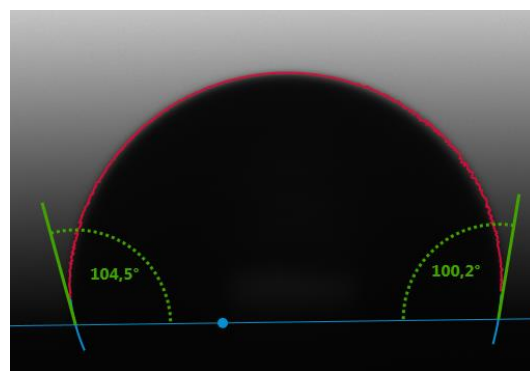
Таблица 3.13 – Показатели краевого угла смачивания мембранных материалов водой и нефтью

Мембрана	Вода, слева / справа, град	Вода, среднее, град	Нефть, слева / справа, град	Нефть, среднее, град
Данафлекс	111,0 / 111,0	111,0	17,6 / 17,6	17,6
МТ-1	104,5 / 100,2	102,4	17,8 / 13,0	15,4
Меркуритекс Турбо	91,8 / 91,8	91,8	22,5 / 23,5	23,0
Порелле П600	71,8 / 71,8	71,8	6,9 / 35,4	21,2

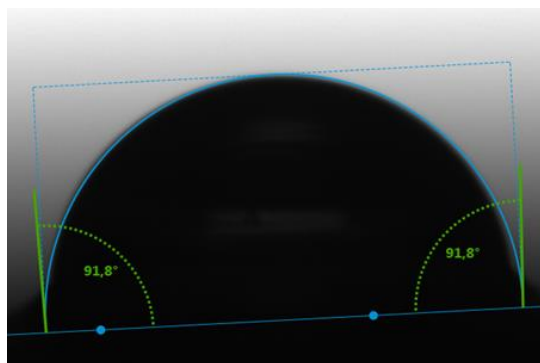
Наибольшее сопротивление смачиванию водой демонстрирует мембрана «Данафлекс», для которой зарегистрирован симметричный краевой угол 111,0° при полном совпадении левого и правого значений. Величина превышает порог 90°, разделяющий гидрофобные и гидрофильные поверхности на 23,3% и выше относительно наименьшего значения в ряду исследованных материалов на 54,6%. Результат согласуется с полипропиленовой природой материала, т.к. макромолекула ПП состоит из метиленовых и метильных групп, в ней отсутствуют гетероатомы и донорно-акцепторные центры, вследствие чего взаимодействие с водой ограничивается слабыми дисперсионными силами.



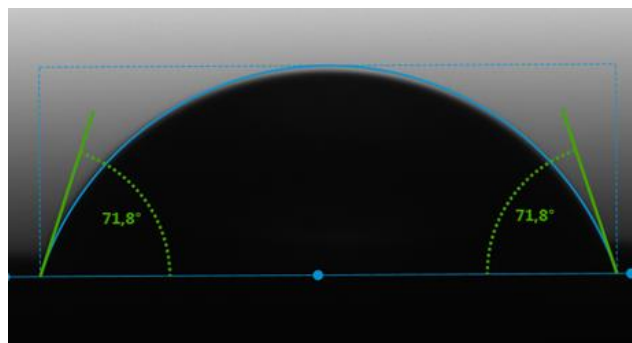
а



б



в



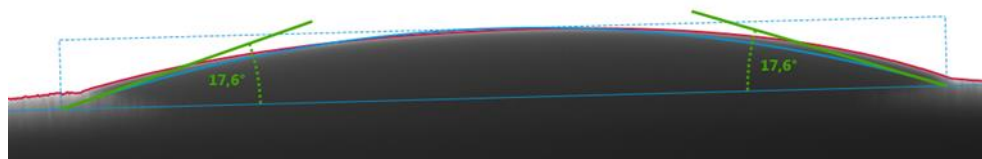
г

Рисунок 3.6 – Фотографии капли воды на поверхности мембранных материалов: а - Данафлекс, 111,0°; б - МТ-1, 104,5 / 100,2°; в - Меркуритекс Турбо, 91,8°; г - Порелле П600, 71,8°

Дополнительный вклад вносит морфология материала, у которого поровая структура формируется одноосным или двухосным вытягиванием наполненной пленки, при котором вокруг частиц наполнителя раскрываются субмикронные каналы, а поверхность приобретает развитый микрорельеф, что препятствует затеканию воды за счет захваченного в углублениях рельефа воздуха и повышает наблюдаемый угол сверх значения, характерного для полипропиленовых пленок.

ПУ мембраны по смачиваемости водой (рисунок 3.7) образуют ряд с разбросом значений свыше тридцати градусов: краевой угол смачивания «Порелле П600» – 71,8°, «Меркуритекс Турбо» – 91,8°, «МТ-1» – 102,4°. Вероятно, такие различия связаны с соотношением полиольной и изоцианатной частей мембран, что требует подтверждения оценкой состава ПУ материалов методом ИК-спектроскопии, т. к. карбонильный кислород уретановой группы,

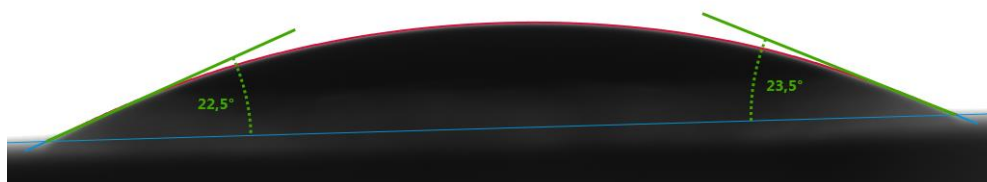
кислород мочевиной группировки, а также кислород полиэфирного блока ПУ выступает свободным акцептором водородной связи и доступен молекулам воды на границе раздела, за счет чего обеспечивается лучшее смачивание. Значение $102,4^\circ$, полученное для «МТ-1», формально относит поверхность этой мембраны к гидрофобным, что не противоречит ее классификации производителем как гидрофильной беспоровой, поскольку термин «гидрофильная» применительно к данному классу материалов характеризует объемный сорбционно-диффузионный перенос водяного пара через полярные участки полимера.



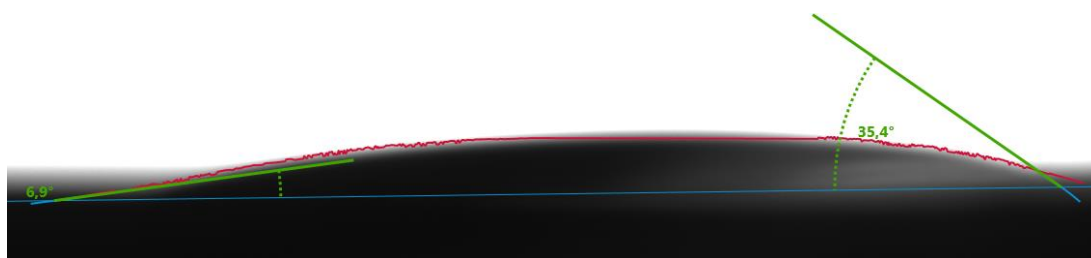
а



б



в



г

Рисунок 3.7 – Фотографии капли нефти на поверхности мембранных материалов:
а - Данафлекс, $17,6^\circ$; б - МТ-1, $17,8 / 13,0^\circ$; в - Меркуритекс Турбо, $22,5 / 23,5^\circ$; г - Порелле П600, $6,9 / 35,4^\circ$

Необходимо отметить, что меньшая смачиваемость поверхности полярного ПУ относительно ПП, не имеющего кислородсодержащих групп, не согласуется с природой полимеров и, вероятно, обусловлена не столько их химическим составом, сколько строением мембранного материала, его удельной площадью поверхности, размером и объемом пор, что требует исследований данных параметров.

По результатам оценки смачиваемости мембран нефтью можно заключить (таблица 3.13, рисунок 3.7), что исследованные материалы олеофильны, а зарегистрированные краевые углы укладываются в узкий интервал $15,4\text{--}23,0^\circ$, то есть в 3,4–6,3 раза ниже соответствующих значений по воде для тех же мембран. Наименьший угол среди усредненных значений имеет «МТ-1» ($15,4^\circ$), далее следуют «Данафлекс» ($17,6^\circ$), «Порелле П600» ($21,2^\circ$) и «Меркуритекс Турбо» ($23,0^\circ$); различие между крайними членами ряда составляет 49,4%.

Причина олеофильности и растекания капли обусловлена поверхностным натяжением нефти (в пределах 25-30 мН/м), сопоставимом, либо более низком относительно поверхностного натяжения рассматриваемых полимеров, даже независимо от полярности мембран. Необходимо отметить противоположное поведение марки «Данафлекс», которая, обладая максимальной гидрофобностью $111,0^\circ$, одновременно регистрируется второй по олеофильности, что характерно для неполярной низкоэнергетической поверхности, отталкивающей воду и беспрепятственно смачиваемой углеводородами. При оценке времени впитывания капли нефти на каждой из мембран установлено, что в течение часа не происходит ее поглощения, что свидетельствует о барьерности материалов к нефти в жидком состоянии, предположительно, за счет особенностей их поровой структуры.

Производили регистрацию значений предела прочности и относительного удлинения на разрывной машине Метротест РЭМ-5-1 по ГОСТ Р 50111-92. Методика основана на контролируемом растяжении образца стандартизируемых размеров с заданной скоростью деформации до момента разрушения и отражена в разделе 2.2.1. Полученные в ходе испытаний данные позволяют оценить

устойчивость мембранного слоя к механическим нагрузкам и определить его пригодность для применения в составе пакетов материалов защитной одежды. Исследованы гидрофильные мембраны «Порелле П600», «Меркуритекс Турбо», «МТ-1» и пористая мембрана «Данафлекс».

Результаты оценки представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Показатели прочности и относительного удлинения мембран

Наименование	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение, %
Данафлекс	3,71	8,86
Порелле П600	7,53	87,73
МТ-1	10,62	181,90
Меркуритекс Турбо	8,83	218,85

Анализ механических характеристик исследуемых мембран свидетельствует о существенных различиях в показателях предела прочности и относительного удлинения. Минимальное значение предела прочности зафиксировано у мембраны «Данафлекс» и составляет 3,71 МПа. При сравнении с этим показателем установлено, что прочность мембраны «Порелле П600» (7,53 МПа) выше на 102,9%, «Меркуритекс Турбо» (8,83 МПа) – на 138,0%, а «МТ-1» (10,62 МПа) – на 186,3%. Наибольшее значение прочности наблюдается у мембраны «МТ-1», что отражает высокую устойчивость материала к растягивающим нагрузкам.

Сравнение показателей относительного удлинения (таблица 3.15) демонстрирует еще более выраженные различия между материалами. Наименьшее значение также характерно для мембраны «Данафлекс» – 8,86%. Относительное удлинение мембраны «Порелле П600» (87,73%) превышает этот показатель в 9,9 раз, «МТ-1» (181,90%) – в 20,53 раза, а «Меркуритекс Турбо» (218,85%) – в 24,7 раза. Максимальная эластичность характерна для мембраны «Меркуритекс Турбо», тогда как наибольшей прочностью обладает мембрана «МТ-1».

Согласно полученным экспериментальным данным мембраны «Порелле П600», «МТ-1» и «Меркуритекс Турбо» характеризуются как высокой прочностью относительно «Данафлекс», так и высокими значениями относительного удлинения, что указывает на их хорошую эластичность и стойкость к многократным разнопеременным нагрузкам. В тоже время следует отметить, что чрезмерно высокая эластичность мембранного слоя не всегда является положительным фактором для защитной одежды из многослойных материалов, т.к. другие слои пакета материалов, не обладающие той же эластичностью, могут претерпевать разрыв при меньшем удлинении, что негативно сказывается на работе пакета материалов как единого целого.

Таким образом, проведенные исследования предела прочности и относительного удлинения мембран позволяют рекомендовать как перспективную для пакета материалов по разрывным характеристикам марку «Порелле П600», одновременно, ее эластичность не является избыточной по сравнению с гидрофильными мембранами «МТ-1» и «Меркуритекс Турбо». Такое сочетание прочности и умеренной эластичности обеспечивает более стабильное поведение материала в составе многослойных пакетов и способствует сохранению эксплуатационных свойств защитной одежды при длительной эксплуатации [151].

Внешний мембранный слой выполняет двойную задачу – формирует преграду для попадания вредных веществ в жидкой фазе к кожным покровам индивида и, с другой стороны, участвует в процессе отведения испарений от тела человека. Отличие объекта сравнения поровой мембраны «Данафлекс» и исследуемых ПУ беспоровых мембран кроме прочего состоит в особенностях поровой системы. Первые имеют традиционную пористую структуру сквозных отверстий, когда их размер не позволяет проникать соединениям в состоянии капель, но является достаточным для диффузии паров. Вторые, условно именуемые беспоровыми, в действительности не являются сплошными изолирующими покрытиями, а имеют губчатую структуру полимера, включающую сеть канальцев, от строения которой зависят барьерные свойства по отношению к жидкостям и пропускающая способность к паровым и газообразным

средам [150]. Необходимость оценки поровой структуры обусловлена ее влиянием на важные эксплуатационные свойства мембранного слоя, например, на характеристики его паропроницаемости, водоупорности, селективности, скорости засорения, влияющей на допустимый срок эксплуатации защитного костюма, стойкости к механическим воздействиям и т. д.

В обоих случаях у материалов оценивали поровые характеристики методом БЭТ с пропусканием инертного газа через изучаемую мембрану и регистрацией значений удельной поверхности, с последующими расчетами объема и размера пор по методике БДжХ, представленной в разделе 2.2.1.

Поровые характеристики исследуемых мембран приведены в таблице 3.15, изотермы адсорбции оцениваемых мембран систематизированы на рисунке 3.8.

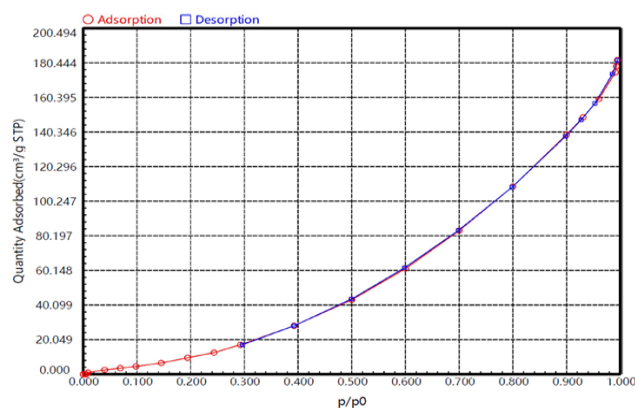
Таблица 3.15 – Показатели поровых характеристик мембран

Наименование	Удельная поверхность, м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Размер пор, нм
Данафлекс	121,90	0,2804	9,20
МТ-1	183,64	0,5052	11,00
Порелле 600	96,71	0,2495	10,32
Меркуритекс Турбо	332,06	0,4555	3,71

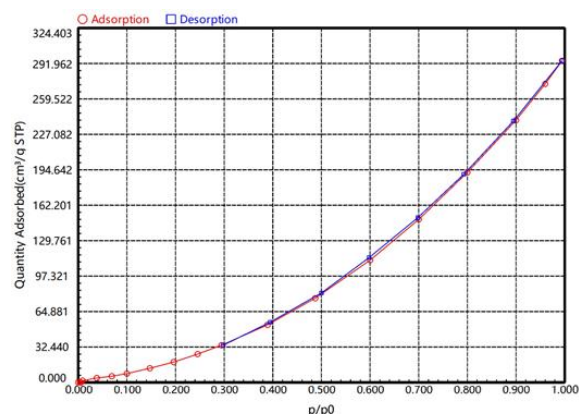
По данным таблицы 3.15 наибольшая удельная поверхность установлена у мембраны «Меркуритекс Турбо», далее в порядке убывания следуют «МТ-1», «Данафлекс» и «Порелле П600», значения которых ниже лидера в 1,8, 2,7 и 3,4 раза соответственно. Наибольший объем пор характерен для «МТ-1» с убыванием в ряду «Меркуритекс Турбо», «Данафлекс», «Порелле П600». По значению среднего размера пор материалы распределились следующим образом. Максимальное значение наблюдается у «МТ-1» – 11,00 нм, промежуточное у мембран «Порелле П600» 10,32 нм и «Данафлекс» 9,20 нм, минимальное у «Меркуритекс Турбо» 3,71 нм. Полученные размеры находятся в мезопористом диапазоне, что характерно для мембран, обеспечивающих диффузию паров и газов, и сохраняющих барьерные свойства к жидкостям. Минимальная удельная

поверхность и минимальный объем пор наблюдаются у мембраны «Порелле П600».

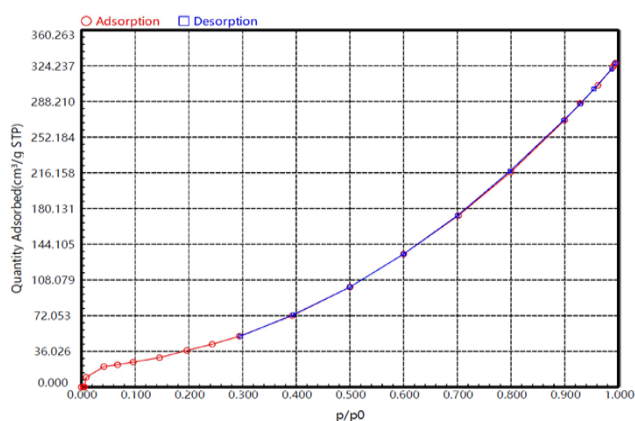
Характер изотерм адсорбции образцов (рисунок 3.8) схож, особенно для хода кривых Данафлекс и Меркуритекс Турбо.



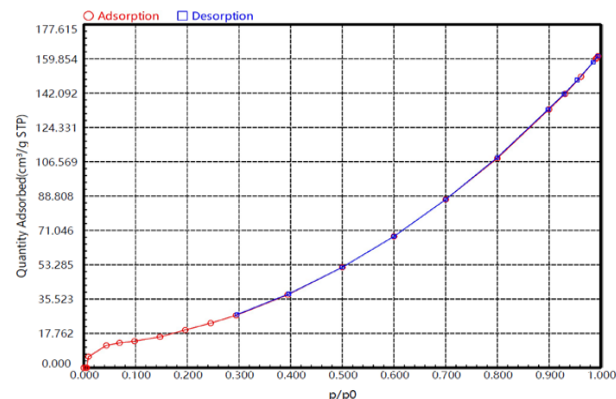
а



б



в



г

Рисунок 3.8 – Изотермы адсорбции мембран: а - «Данафлекс»; б - «Меркуритекс Турбо»; в - «МТ-1»; г - «Порелле П600»

На начальном участке при низких значениях относительного давления p/p_0 рост адсорбции идет плавно, далее, по мере увеличения p/p_0 наклон кривых возрастает, затем, в области высоких относительных давлений наблюдается резкий подъем. Такая форма кривых указывает на развитую мезопористую структуру образца, при которой заполнение порового пространства сначала происходит постепенно, а затем более интенсивно – в средней и высокой области

p/p_0 . На графиках можно заметить близость расположения ветвей адсорбции и десорбции. Гистерезис выражен слабо, но сохраняется, что также согласуется с наличием мезопор и капиллярных эффектов при заполнении и освобождении пор.

Для мембран «Данафлекс» и «Меркуритекс Турбо» кривая адсорбции отражает наличие развитой внутренней поверхности. При малом среднем размере пор материал демонстрирует компактную поровую структуру. Форма изотермы, полученная для данных мембран, соответствует достаточно активному заполнению мезопор в средней области относительных давлений и ограниченному росту сорбции на завершающем участке. Такой характер кривых отражает наличие достаточного числа доступных пор в структуре материала, но с ограниченной их сорбционной емкостью, например, по сравнению с «МТ-1». Максимальный уровень адсорбции у этих образцов выше, чем у мембраны Порелле, но ниже, чем у «МТ-1».

Изотерма мембраны «МТ-1» (рисунок 3.7) проходит выше остальных практически по всему диапазону относительных давлений. На начальном участке уровень адсорбции значительно выше, чем у других мембран, в средней и в конечной части графика превышение также более выражено. Относительно других данная мембрана демонстрирует наивысший уровень адсорбированного азота. Кривая для «МТ-1» показывает, что материал обладает наибольшим внутренним пространством и сорбционной емкостью среди сравниваемых мембран, т. е. имеет более выраженную способность порового объема вовлекаться в процессы массопереноса.

Изотерма адсорбции мембраны «Порелле П600» также имеет восходящий характер с усилением подъема в области высоких p/p_0 , однако по абсолютному уровню адсорбции она проходит ниже других. Начальный участок плавный, средняя часть менее интенсивна по сравнению с «Данафлекс» и «МТ-1». Такая кривая свидетельствует о меньшей развитости внутренней поверхности и меньшем суммарном объеме доступных пор по сравнению с другими мембранами, что подтверждается данными таблицы 3.16. При этом форма кривой показывает, что поры (в случае беспоровых мембран, которой является Порелле,

канальца) присутствуют, но их вклад в общий объем поглощенного азота ограничен относительно других мембран [152].

По результатам исследования можно сделать вывод, что все оцениваемые мембраны имеют мезопористую структуру, однако, мембраны «Меркуритекс Турбо» и «МТ-1» демонстрирует наиболее развитую внутреннюю поверхность, а «МТ-1» – максимальную сорбционную емкость. Образец «Данафлекс» занимает промежуточное положение и сочетает выраженную пористость с умеренным объемом вовлекаемого в поглощение азота пространства. Мембрана «Порелле П600» характеризуется наименьшей сорбционной емкостью, что указывает на менее развитую поровую структуру. Высокая удельная поверхность и большой объем пор обеспечивают мембране лучшие сорбционные свойства, паро- и газоперенос, в то время как меньший размер пор способствует их лучшему барьерному действию по отношению к жидкой и капельной фазам. Для создания пакета материалов с защитными свойствами необходимы дальнейшие сравнительные испытания эксплуатационных свойств и времени защитного действия мембран.

Обеспечение паропроницаемости мембранного слоя необходимо для сохранения физиолого-гигиенического уровня пакета материалов защитной одежды. Мембрана вводится в структуру пакета как преграда для жидкой фазы нефтепродуктов, загрязнителей и части токсичных компонентов в виде газа и пара, однако чрезмерное сопротивление паропереносу может привести к ухудшению микроклимата пододежного пространства. Для защитного материала фильтрующего типа важно, чтобы мембрана препятствовала проникновению загрязнителя извне с сохранением возможности вывода водяного пара от тела человека. Результаты оценки паропроницаемости представлены в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Показатели паропроницаемости мембран

Наименование	Показатель паропроницаемости, г/м ² *24 час
Данафлекс	5460
Порелле П600	5650
Меркуритекс Турбо	3700
МТ-1	3150

Минимальная паропроницаемость зарегистрирована для мембраны «МТ-1», далее в порядке повышения значений следуют «Меркуритекс Турбо», «Данафлекс» и «Порелле П600» со значениями выше минимума на 17,46%, 73,33% и 79,36% соответственно. Наибольший показатель демонстрирует мембрана «Порелле П600» – 5650 г/(м²·24 ч), что выше ближайшей по значению ПУ мембраны Меркуритекс Турбо на 52,7%. Различие между «Порелле П600» и «Данафлекс» незначительно, так как «Порелле П600» превосходит «Данафлекс» на 3,5%.

«Данафлекс», согласно характеристике раздела 2.1, является ПП пористой мембраной, что обеспечивает высокий массоперенос пара через поровую систему. Недостаточно высокая паропроницаемость ПУ мембраны «МТ-1» относительно других объектов может являться следствием иной структуры полимерного слоя и большей плотности полимерной сетки, что требует исследования мембранных материалов методом ИК-спектроскопии. В интересах дальнейшего применения в пакете материалов по показателю паропроницаемости наиболее предпочтительной является мембрана марки «Порелле П600», сочетающая максимальный уровень паропереноса с гидрофильной полиуретановой природой, необходимой для создания беспорового или малопористого барьерного слоя.

3.5 Результат апробации методики таксонометрического анализа

Методика проведения таксонометрической оптимизации приведена пошагово с соответствующими расчетными формулами в разделе 2.5 и апробирована в данном разделе на примере выбора наиболее предпочтительной текстильной основы для включения в пакет материалов защитной одежды.

Действительно, при обосновании включения конкретного вида и марки текстильной основы в состав пакета требуется учет комплекса показателей эксплуатационных свойств, поскольку слой в составе защитного пакета выполняет несколько функций и должен обладать умеренной поверхностной плотностью, воспринимать растягивающие и раздирающие нагрузки, сохраняя деформационную способность, обеспечивать парообмен и т. д. Дальнейшее сравнение выполнено по совокупности характеристик, приведенных в разделах 3.1, 3.3, 3.4 для текстильных основ, сорбентов, мембран. Расчеты таксонометрического анализа выполнялись в среде Microsoft Excel с использованием встроенных функций обработки табличных данных. Программный продукт применялся для формирования исходной матрицы наблюдений, стандартизации показателей, задания эталонной точки, расчета расстояний до эталона и определения таксонометрического коэффициента для ранжирования исследуемых текстильных основ.

Исходная матрица показателей текстильных основ для таксонометрического анализа, средние значения и среднеквадратические отклонения показателей, стандартизированная матрица, эталонные значения признаков для таксонометрической оптимизации приведены в таблицах приложения Р. В целях осуществления вычислений в таблицу 3.17 сведены все значения показателей свойств текстильных материалов, оцененные в разделе 3.1.

В число дестимуляторов, когда значения показателя, чем ниже, тем предпочтительнее объект, при таксонометрической оценке включены поверхностная плотность и размер пор. Для первого показателя это объясняется тем, что менее плотная ткань снижает массу пакета, уменьшая нагрузку на пользователя защитной одежды. Размер пор принят как дестимулятор применительно к защитному пакету, вследствие того, что чрезмерно крупная поровая структура может приводить к нарушению устойчивости закрепления сорбента и ухудшать структурную равномерность текстиля.

Таблица 3.17 – Сводная характеристика текстильных материалов для таксонометрического анализа

Свойства	Саржа	Брезент	Молескин С-159 ЮГ	Молескин С-174 ЮГ
Поверхностная плотность, г/м ²	240	400	280	250
Прочность по основе, МПа	26,51	18,46	25,92	26,12
Прочность по утку, МПа	19,81	13,48	11,68	16,67
Удлинение по основе, %	28,39	3,90	34,28	29,92
Удлинение по утку, %	18,32	12,89	6,14	5,71
Раздирающая нагрузка по основе, Н	34,14	37,89	14,72	12,76
Раздирающая нагрузка по утку, Н	41,94	55,18	28,23	24,77
Размер пор, нм	5,43	7,26	10,04	14,05
Объем пор, см ³ /г	0,0277	0,0225	0,0626	0,0855
Удельная поверхность, м ² /г	20,46	12,41	24,96	24,35
Паропроницаемость, г/(м ² ·ч)	36,67	39,00	38,00	42,67

При этом объем пор, удельная поверхность и паропроницаемость отнесены к стимуляторам, поскольку они характеризуют развитость внутренней структуры и способность материала участвовать во влагообмене. Прочностные и деформационные характеристики также приняты как стимуляторы.

После стандартизации значений сформирована матрица признаков, в которой устранено влияние размерности показателей. Данная процедура позволяет сопоставлять в одной расчетной системе изученный спектр характеристик, таких как поверхностная плотность, прочность, удлинение, раздирающая нагрузка, параметры пористой структуры и паропроницаемость. Эталонная точка задавалась по лучшим значениям каждого признака: минимальным для дестимуляторов и максимальным для стимуляторов.

Расчет расстояния каждого материала до эталонной точки показал, что наименьшее отклонение имеет «Саржа», что свидетельствует, о наибольшей близости материала к условному оптимальному сочетанию свойств (таблица 3.18).

Таблица 3.18 – Результаты таксонометрического анализа текстиля

Текстиль	Расстояние до эталона s_{i0}	Показатель d_i	Таксонометрический коэффициент K_i	Ранг
Саржа	3,8241	0,4933	0,5067	1
Молескин С-174 ЮГ	5,0486	0,6513	0,3487	2
Молескин С-159 ЮГ	5,4029	0,6970	0,3030	3
Брезент	6,2539	0,8068	0,1932	4

Несмотря на то, что по паропроницаемости «Саржа» уступает марке «Молескин С-174 ЮГ» и «Брезенту», ее преимущества проявляются в низкой поверхностной плотности, высокой прочности по основе и утку, наибольшем удлинении по утку и минимальном размере пор среди текстильных материалов. В условиях проектирования защитного пакета такая сбалансированность свойств предпочтительнее, чем выраженные преимущества по отдельному показателю. Максимальное значение таксонометрического коэффициента получено для саржи и составляет 0,5067, что подтверждает наиболее оптимальное сочетание характеристик среди исследуемых текстильных основ. Важным показателем для получения пакетов материалов защитной одежды является минимальная поверхностная плотность «Саржи» 240 г/м² относительно других объектов. Очевидно, что после нанесения термокля, сорбента и мембраны суммарная масса материала возрастает, поэтому легкая основа снижает риск получения чрезмерно плотного и жесткого пакета. Второе место занимает «Молескин С-174 ЮГ» с коэффициентом 0,3487, преимущества применения которого в пакетах материалов определяются наибольшей паропроницаемостью и максимальным объемом пор. Необходимо заметить, что данные признаки важны для обеспечения влагообмена, однако материал уступает сарже по прочности по утку, удлинению по утку, сопротивлению раздиру и имеет наиболее крупный размер пор среди исследуемых основ, что в совокупности может привести к меньшей стабильности пакета при локальном повреждении и при закреплении сорбирующего слоя.

«Молескин С-159 ЮГ» имеет коэффициент 0,3030 и занимает третье место с преимуществами по высокой удельной поверхности и максимальному удлинению по основе относительно другого текстиля. Одновременно, низкая

прочность по утку, малое удлинение по утку и более низкие показатели раздирающей нагрузки ограничивают его предпочтительность как несущего слоя. При эксплуатации защитной одежды требуется устойчивость пакета не столько в одном направлении, сколько при разнонаправленных нагрузках, возникающих при раскрое, соединении слоев, носке, изгибе. «Брезент» имеет минимальный таксонометрический коэффициент 0,1932, демонстрируя преимущества в высоких значениях раздирающей нагрузки по основе и утку, а также достаточно высокой паропроницаемости. Однако высокая поверхностная плотность 400 г/м² и низкое удлинение по основе существенно ухудшают его интегральную оценку и, в случае формирования многослойного пакета с сорбентом и мембраной, такая основа является избыточно массивной и менее пригодной для формирования гибкого материала защитной одежды.

По результатам таксонометрической оптимизации наиболее предпочтительным текстильным материалом для дальнейшего применения в пакете выбрана «Саржа» по совокупности показателей, значимых для защитной одежды, вследствие сочетания в материале наименьшей поверхностной плотности, высокой прочности в обоих направлениях, достаточной деформационной способности, развитой удельной поверхности, умеренного объема пор и приемлемой паропроницаемости. Многокритериальный таксонометрический анализ позволяет обоснованно выбрать данный материал рациональной основой для закрепления углеродного сорбента и последующего формирования трехслойного пакета с мембранным слоем.

Таксонометрический анализ показателей сорбентов и мембран производится по аналогии с расчетами для текстиля. В таблице 3.19 приведен свод оцененных характеристик углей – исходные данные для анализа, в таблице 3.20 результаты таксонометрического анализа для сорбентов. Аналогичные данные для мембран представлены в таблицах 3.21 и 3.22. Стимуляторы/дестимуляторы, стандартизированные матрицы, расчет эталонных точек для сорбентов вынесены в Приложение С, для мембран – в Приложение Т.

Для угольных сорбентов в расчет включены прочность частиц, удельная поверхность, объем и размер пор. Все признаки приняты в качестве стимуляторов, т. к. рост прочности повышает устойчивость сорбента к разрушению при эксплуатации защитной одежды, а развитая поровая структура определяет потенциальную способность угля удерживать пары токсичных веществ и нефтепродуктов.

Таблица 3.19 – Исходная матрица показателей сорбентов для таксонометрического анализа

Сорбент	Прочность частиц, МПа	Удельная поверхность, м ² /г	Объем пор, см ³ /г	Размер пор, нм
Даусорб	7,50	838,27	0,3330	2,34
Каусорб	10,96	790,13	0,3689	2,23
МеКС	8,68	999,86	0,5896	2,36
ВСК 8-30	8,28	1235,28	0,7045	2,28
ВСК А-2	4,05	1014,10	0,5834	2,30
ФАС	59,66	997,11	0,9592	3,85
ФАС мелкий	98,25	2216,57	0,8527	3,63
Сорбер-10	23,03	849,11	0,5019	2,36

Таблица 3.20 – Результаты таксонометрического анализа для сорбентов

Сорбент	Расстояние до эталона s_{i0}	Показатель d_i	Таксонометрический коэффициент K_i	Ранг
ФАС мелкий	0,6276	0,0677	0,9323	1
ФАС	3,0537	0,3296	0,6704	2
ВСК 8-30	4,5898	0,4954	0,5046	3
МеКС	4,9789	0,5374	0,4626	4
ВСК А-2	5,1029	0,5507	0,4493	5
Сорбер-10	5,1186	0,5524	0,4476	6
Каусорб	5,7771	0,6235	0,3765	7
Даусорб	5,7815	0,6240	0,3760	8

Согласно таблицам 3.19 и 3.20 лидирующее положение в группе сорбентов занимают угли «ФАС» по совокупности расчетных признаков, что объясняется сочетанием высокой прочности гранул, развитой удельной поверхности, большого объема и крупного размера пор, относительно большей части сорбентов. Наименьший ранг получен для марки «Даусорб». Однако при формировании двух- и трехслойных образцов материалов для защитной одежды,

кроме приоритетных марок угля, где три оценочных показателя связаны с поровой структурой, интерес представляют марки с выраженным показателем прочности частиц. Например, в группе дробленых, а не гранулированных углей «Каусорб» предпочтителен по прочности (10,96 МПа), превышающей показатели «Даусорб», «МеКС», «ВСК 8-30» и «ВСК А-2».

Для группы мембранных материалов расчет включал показатели угла смачивания водой и нефтью, прочности, удельной поверхности, размера пор и паропроницаемости. Угол смачивания водой и удельная поверхность были отнесены к дестимуляторам, остальные показатели к стимуляторам, что позволяет учитывать и механические свойства мембраны, и ее способность поддерживать барьерно-гигиенический баланс защитного пакета (таблицы 3.21, 3.22).

Таблица 3.21 – Исходная матрица показателей мембран для таксонометрического анализа

Показатель	Данафлекс	Порелле П600	МТ-1	Меркуритекс Турбо
Угол смачивания водой, град	111,0	71,8	102,4	91,8
Угол смачивания нефтью, град	17,6	21,2	15,4	23,0
Прочность, МПа	3,71	7,53	10,62	8,83
Удельная поверхность, м ² /г	121,90	96,71	183,64	332,06
Размер пор, нм	9,20	10,32	11,00	3,71
Паропроницаемость, г/м ² за 24 ч	5460	5650	3150	3700

Таблица 3.22 – Результаты таксонометрического анализа для мембран

Мембрана	Расстояние до эталона c_{i0}	Показатель d_i	Таксонометрический коэффициент K_i	Ранг
Порелле П600	1,3804	0,1900	0,8100	1
МТ-1	4,1369	0,5695	0,4305	2
Данафлекс	4,2877	0,5903	0,4097	3
Меркуритекс Турбо	4,3215	0,5950	0,4050	4

Наиболее высокий ранг среди мембран получила «Порелле П600», $K_i = 0,8100$. Второе место заняла «МТ-1», $K_i = 0,4305$. Преимущество «Порелле П600»

связано с лучшей паропроницаемостью, выраженной гидрофильностью и низкой удельной поверхностью, что делает ее наиболее сбалансированной для включения в пакет материалов защитной одежды. Мембрана «МТ-1» уступает «Порелле П600» из-за низкой паропроницаемости и большей склонности к смачиванию нефтью, но сохраняет высокий расчетный ранг благодаря максимальной прочности.

3.6 Защитные свойства слоев и пакетов материалов при воздействии аммиака и нефтепродуктов

Оценка ВЗД использована в качестве основного показателя, позволяющего установить фактическую способность мембран и двуслойных и трехслойных сорбционных материалов задерживать проникновение газообразного аммиака и газовой смеси нефти, методика оценки приведена в разделе 2.1.1. Полученные в разделах 3.1, 3.3, 3.4 эксплуатационные характеристики, например, прочность, паропроницаемость или развитая пористость важны для достижения общей работоспособности пакета, при этом именно ВЗД показывает момент проскока вещества через материал и позволяет сравнивать вклад мембраны, текстильной основы и углеродного сорбента в защитный эффект. В таблицы включены мономатериалы и двухслойные сорбционные образцы, вследствие целесообразности отдельной оценки защитного вклада мембран и системы «текстиль – угольный сорбент» до формирования полного пакета.

В таблице 3.23 приведены результаты оценки ВЗД по аммиаку для мембран, двуслойных пакетов материалов для спецодежды с различными видами основ и одним типом угольного сорбента, а также трехслойные пакеты с различными видами угля и мембран.

Аммиак выбран в качестве модельного токсичного вещества, поскольку он относится к промышленно-значимым газообразным загрязнителям и характеризуется высокой подвижностью молекул. В условиях аварийного или производственного воздействия данный газ способен быстро проникать через

проницаемые текстильные и полимерные структуры, поэтому результат ВЗД отражает способность материала задерживать низкомолекулярный полярный газ.

Таблица 3.23 – ВЗД материалов к газовой смеси аммиака

Наименование материала/пакета	ВЗД, мин
Мембрана «МТ-1», сторона 1	7,33
Мембрана «МТ-1», сторона 2	9,33
Мембрана «Порелле П600», сторона 1	2,17
Мембрана «Порелле П600», сторона 2	6,67
Мембрана «Меркуритекс Турбо»	4,45
Мембрана «Данафлекс», сторона 1	4,17
Мембрана «Данафлекс», сторона 2	3,67
Ткань «Молескин», уголь «Каусорб»*	3,00
Ткань «Саржа», уголь «Каусорб»*	5,83
Ткань «Саржа», уголь «Каусорб», мембрана «Порелле П600»*	17,67
Ткань «Саржа», уголь «ВСК А-2», мембрана «Порелле П600»*	19,83
Ткань «Саржа», уголь «ФАС», мембрана Порелле «П600»*	38,00
Ткань «Саржа», уголь «ФАС», мембрана «МТ-1»*	47,17

* Для закрепления угля в данных пакетах материалов применялся клей Рототерм

Для мембранных материалов барьерные свойства к аммиаку зависят от плотности полимерной структуры, наличия полярных функциональных групп и направленности слоя (стороны мембраны), в случае двухслойных пакетов «текстильная основа – угольный сорбент» влияние на ВЗД оказывает сочетание сорбционной способности угля, равномерности его закрепления и структуры текстильной основы.

Согласно таблице 3.23 среди мембран наибольшее время защитного действия при воздействии аммиака показала мембрана «МТ-1»: при подаче газовой смеси со стороны 1 ВЗД составило 7,33 мин, при воздействии с обратной стороны 9,33 мин; среднее значение для «МТ-1» равно 8,33 мин. Для «Порелле П600» среднее значение составляет 4,42 мин, Данафлекс 3,92 мин, Меркуритекс Турбо 4,45 мин. По среднему ВЗД мембрана «МТ-1» превосходит «Данафлекс» в 2,13 раза, «Порелле П600» на 88,7%, «Меркуритекс Турбо» в 1,87

раза. В части отдельных сторон наиболее низкое значение зарегистрировано для «Порелле П600» со стороны 1 – 2,17 мин, а максимальное у «МТ-1» со стороны 2 – 9,33 мин. Разница ВЗД между данными образцами составляет 4,30 раза.

Выраженная направленность результатов у «Порелле П600» и «МТ-1» в зависимости от испытываемой стороны показывает, что мембранный слой не является симметричным с двух сторон по отношению к воздействию газообразного аммиака. В случае «Порелле П600» переход от стороны 1 к обратной стороне увеличивает ВЗД с 2,17 мин до 6,67 мин, т. е. в 3,07 раза; для «МТ-1» различие менее резкое, но также заметное, рост составляет 27,3%; у «Данафлекс» значения по двум сторонам близки, 4,17 мин и 3,67 мин, что соответствует различию около 13,6%. Вероятно, для ПУ гидрофильных мембран существенную роль в защитных свойствах по отношению к аммиаку играет и химический состав, и ориентация функционального слоя, структура поверхности, степень ассоциации уретановых групп. Мембрана «Данафлекс» как объект сравнения, имеющий пористую полипропиленовую природу, демонстрирует слабую выраженность различий по сторонам воздействия, поскольку перенос аммиака в большей степени определяется доступностью поровой структуры в таком типе мембран. В последующих исследованиях мембраны располагались стороной с большим ВЗД к потоку газовой смеси аммиака и нефтепродуктов.

В группе двухслойных сорбционных пакетов наибольшее ВЗД получено для образца на основе «Саржи» и угля «Каусорб», где значение составило 5,83 мин. Образец на основе ткани «Молескин» с тем же сорбентом и связующим показал 3 мин, что свидетельствует о превышении защитных свойств саржевого образца над «Молескин» на 94,3% (почти в 2 раза). Поскольку марка сорбента и клеевой компонент в сравниваемых образцах идентичны, различие, вероятно, связано с характеристиками текстильной основы. «Саржа» характеризуется благоприятным сочетанием меньшей поверхностной плотности и высокой прочности относительно ткани «Молескин» [144, 145], и установленное для «Саржи»

большее ВЗД по сравнению с «Молескин» позволяет выбрать ее для дальнейшего применения в трехслойных пакетах материалов.

Трехслойные пакеты отличались типом угля и типом мембраны. По данным таблицы 3.23 по отношению к аммиаку ранжирование пакетов в зависимости от марки угля следующее: наибольшее ВЗД с мембраной «Порелле П600» обеспечил образец с углем «ФАС» (38 мин), ВЗД образцов с той же мембраной с углем «ВСК А-2» – 19,83 мин, с углем «Каусорб» – 17,67 мин. Превышение ВЗД трехслойных материалов с углем «ФАС» над «Каусорб» достигает 115,1%, над «ВСК А-2» 91,6%. Выявленные преимущества сорбента марки «ФАС» в опытных трехслойных пакетах согласуются с данными И.И. Морозовой [153] по двуслойным фильтрующе-сорбирующим материалам, а установленные значения ВЗД по аммиаку превышают ранее полученный автором результат на 58% за счет присутствия в пакете мембраны.

Наибольшее ВЗД к газовой смеси аммиака среди трехслойных пакетов (таблица 3.23) получено для образца, включающего ткань «Саржа», клей «Рототерм», уголь «ФАС» и мембрану «МТ-1». Данный состав пакета из ассортимента исследуемых материалов можно считать оптимальным для обеспечения защитных свойств спецодежды по аммиаку. Его показатель составил 47,17 мин. По сравнению с аналогичным пакетом на основе угля «ФАС» и мембраны «Порелле П600», где ВЗД равно 38 мин, применение «МТ-1» повысило защитное действие на 24,1%. Относительно пакета с углем «ВСК А-2» и мембраной «Порелле П600», показавшего 19,83 мин, преимущество составило 2,38 раза, а по сравнению с пакетом на основе угля «Каусорб» и мембраны «Порелле П600», где получено ВЗД 17,67 мин, значение увеличилось в 2,67 раза. При сопоставлении оптимального пакета с двухслойными пакетами без мембраны, можно выявить значительные преимущества первого по ВЗД. Пакет с «МТ-1» превосходит образец «Саржа», «Рототерм», «Каусорб» в 8,09 раза, образец «Молескин», «Рототерм», «Каусорб» в 15,72 раза. Это подтверждает, что сочетание угля «ФАС» с мембраной «МТ-1» дает максимальный результат по защите от аммиака среди испытанных вариантов.

Газовоздушная смесь нефти отличается от аммиака по механизму проникновения через материал, вследствие того, что нефтепродукты представляют собой сложную смесь углеводородных компонентов, для которых важны их распределение в полимерной фазе мембраны, диффузия через свободный объем и удержание в ее капиллярах, а также сорбция в развитой системе пор активированного угля. Полученное ВЗД мембран, двуслойных и трехслойных пакетов материалов приведено в таблице 3.24.

При оценке воздействия газовоздушной смеси нефти минимальное ВЗД среди мембран установлено для «Данафлекс» – 12,67 мин. Мембрана «МТ-1» продемонстрировала ВЗД выше результата «Данафлекс» в 3,08 раза. «Меркуритекс Турбо» обеспечила защитное действие длительностью 61 мин, что выше минимального значения в 4,82 раза. Наибольший показатель получен для «Порелле П600», 75 мин, что превосходит «Данафлекс» в 5,92 раза. ВЗД мембраны «Порелле П600» выше «МТ-1» на 92,3%, «Меркуритекс Турбо» на 23,0%.

Таблица 3.24 – ВЗД материалов к газовоздушной смеси нефтепродуктов

Наименование материала/пакета	ВЗД, мин
Мембрана «МТ-1»	39,00
Мембрана «Порелле П600»	75,00
Мембрана «Меркуритекс Турбо»	61,00
Мембрана «Данафлекс»	12,67
Ткань «Саржа», уголь «Каусорб»*	45,00
Ткань «Молескин», уголь «Каусорб»*	15,00
Ткань «Саржа», уголь «Каусорб», мембрана «Порелле П600»*	более 10 ч
Ткань «Саржа», уголь «ВСК А-2», мембрана «Порелле П600»*	8 ч
Ткань «Саржа», уголь «ФАС», мембрана «Порелле П600»*	8 ч

* Для закрепления угля в данных пакетах материалов применялся клей Рототерм

Наименее эффективной по отношению к парам нефтепродуктов является «Данафлекс», что согласуется с ее природой в виде пористой полипропиленовой

мембраны, где пористая структура обеспечивает пароперенос, однако, наличие каналов и сквозных участков облегчает прохождение газовой смеси углеводородов. В случае ПУ мембран на ВЗД к газовой смеси нефтепродуктов влияют плотность полимерной матрицы, сорбционно-диффузионный механизм переноса и наличие полярных уретановых групп, способных ограничивать движение неполярных углеводородных молекул. По этой причине ПУ мембраны существенно превосходят «Данафлекс» по ВЗД к нефти.

Среди двухслойных пакетов наилучший результат показал образец на основе саржи, клея «Рототерм» и угля «Каусорб» (таблица 3.24), ВЗД которого составило 45 мин. Образец на основе «Молескин» с тем же углем и клеевым компонентом выдержал 15 мин, что отражает преимущества саржевого образца с более высоким уровнем защитных свойств (в 3 раза). Результат выбора текстильной основы аналогичен исследованиям ВЗД аммиака, и для дальнейшего создания пакетов для спецодежды от воздействия нефтепродуктов также выбрана «Саржа».

Сопоставление ВЗД по нефти мембран и двухслойных пакетов без мембраны показывает, что саржевый образец с углем «Каусорб» имеет ВЗД 45 мин и превосходит «МТ-1» на 15,4%, а также «Данафлекс» в 3,55 раза, однако, он уступает «Порелле П600» на 40,0%, что подтверждает необходимость формирования трехслойного пакета с мембраной «Порелле П600».

Согласно таблице 3.24 наибольшее время защитного действия (более 10 ч) обеспечил образец с углем «Каусорб», а образцы с углем «ВСК А-2» и с углем «ФАС» продемонстрировали ВЗД в пределах 8 ч. Превосходство кокосового угля «Каусорб» над углями «ВСК А-2» и «ФАС» по парам нефти составляет не менее 25%, чем подтверждает его выбор в качестве оптимального сорбента разрабатываемого пакета материалов для внедрения в производство спецодежды в интересах обеспечения защиты от воздействия нефтепродуктов.

В ходе исследования определены оптимальные пакеты материалов спецодежды для защиты от воздействия токсичных веществ (по аммиаку) и

газовоздушной смеси нефтепродуктов. При воздействии аммиака наилучший результат среди испытанных вариантов обеспечивает трехслойный пакет на основе ткани «Саржа», угля «ФАС» и мембраны «МТ-1» (ВЗД 47,17 мин). Данный показатель выше ВЗД пакета «Саржа», «ФАС», «Порелле П600» на 24,1%, пакета с «ВСК А-2» и «Порелле П600» в 2,38 раза и выше результата пакета с «Каусорб» и «Порелле П600» в 2,67 раза. Установлено, что при воздействии газовоздушной смеси нефтепродуктов оптимальным является иной состав пакета. Наибольшее ВЗД, превышающее 10 ч, демонстрирует трехслойный образец «Саржа», уголь «Каусорб», мембрана «Порелле П600». Пакеты с углями «ВСК А-2» и «ФАС» при той же мембране показали 8 ч, соответственно, преимущество пакета с «Каусорб» по ВЗД к нефтепродуктам составило 25% [154].

3.7 Механизм защитного действия пакетов материалов защитной одежды от воздействия токсичных веществ и нефтепродуктов

По результатам экспериментов, отраженных в разделе 3.6, выявлены существенные различия защитного действия материалов при воздействии аммиака и нефтепродуктов. Действительно, время защитного действия по газовоздушной смеси нефти, измеряемое часами, превосходит соответствующие значения по аммиаку на 1-2 порядка. Различия в первую очередь обусловлены природой подаваемого газа. Аммиак является низкомолекулярным полярным газом, который способен быстро диффундировать через полимерные и пористые структуры, для его задерживания необходимы полярные группы и водородно-связанные участки ПУ, а также сорбционные центры активированного угля. Нефтяные углеводороды, напротив, менее полярные, имеют более крупные молекулы и взаимодействуют с материалами преимущественно через растворение в полимерной фазе, диффузию по свободному объему и сорбцию в гидрофобной углеродной поверхности. В этой связи углеродный сорбент «Каусорб» на саржевой основе в двухслойном пакете проявляет выраженное защитное действие

к нефтепродуктам, а ПУ мембраны демонстрируют высокую барьерность по сравнению с пористой «Данафлекс».

Вследствие того, что оптимальной в трехслойном пакете материалов для защиты от аммиака выступает мембрана «МТ-1», а от нефтепродуктов «Порелле П600» и для понимания различий в защитном действии ПУ мембран оценивали их состав и структуру методом ИК-спектроскопии. В ранних исследованиях на примере газоразделительных мембран определено, что большее содержание уретановых структур, мочевиновых изоциануратных групп, формирующих «жесткие» фрагменты ПУ, обуславливает повышение барьерных свойств материала [155-157].

Согласно данным ИК-спектроскопии мембраны «Порелле П600», «Меркуритекс Турбо» и «МТ-1» относятся к полиуретановым материалам, полученным на основе простых полиэфиров и ароматических изоцианатов (рисунки 3.9, 3.10). ИК-спектр объекта сравнения защитного действия с ПУ мембранами – пористой мембраны «Данафлекс» представлен на рисунке 3.11.

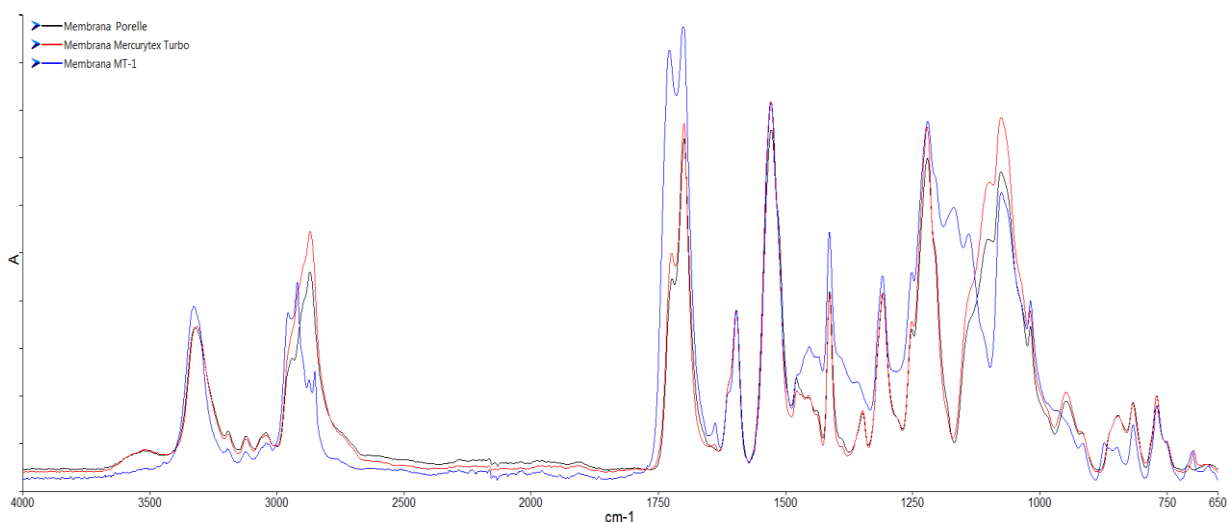


Рисунок 3.9 – Данные ИК-спектроскопии мембран «Порелле П600», «Меркуритекс Турбо» и «МТ-1» в широком диапазоне спектра

Для ПУ мембран наличие полос около 1076 и 1103 cm^{-1} на ИК-спектрах указывает на симметрические и асимметрические колебания связи C–O–C, характерной для простых полиэфиров. Полоса около 1598 cm^{-1} связана с валентными колебаниями C=C в ароматическом кольце, что подтверждает использование ароматического изоцианатного компонента. Полосы около 1414 и

1310 cm^{-1} относятся к колебаниям C–N и N–H в уретановых и мочевиновых фрагментах. Полоса 1414 cm^{-1} относится с триизоциануратным фрагментам.

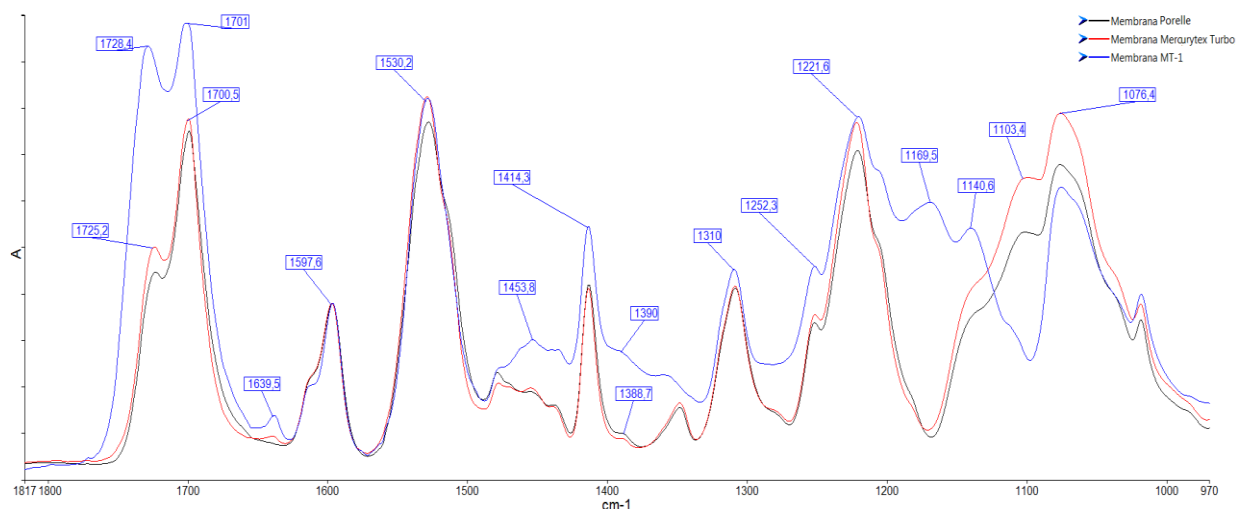


Рисунок 3.10 – Данные ИК-спектроскопии мембран «Порелле П600», «Меркуритекс Турбо» и «МТ-1» в диапазоне наибольших различий спектров

Полоса около 1390 cm^{-1} может быть связана с C–N колебаниями в уретаниминных структурах, что позволяет предполагать применение полиизоцианата на основе метилендифенилдиизоцианата или преполимера на его основе с небольшим содержанием полифункциональной фракции. Наиболее информативной для оценки барьерного механизма является карбонильная область спектров. Полоса около 1725 cm^{-1} соответствует свободным, неассоциированным карбонильным группам в уретановом фрагменте, тогда как область около 1700 cm^{-1} связана с ассоциированными уретановыми группами, включенными в систему водородных связей. Полоса около 1639 cm^{-1} указывает на наличие C=O групп мочевины. Полоса около 1530 cm^{-1} относится к области C–N и N–H колебаний уретановых и мочевиновых структур, а полоса около 1221 cm^{-1} характеризует C–O колебания в уретанах. Совокупность этих полос подтверждает сегментированное строение ПУ мембран, где мягкие полиэфирные участки обеспечивают эластичность и диффузионную подвижность, а жесткие уретановые, мочевиновые и ароматические фрагменты формируют более плотные домены, ограничивающие перенос низкомолекулярных соединений.

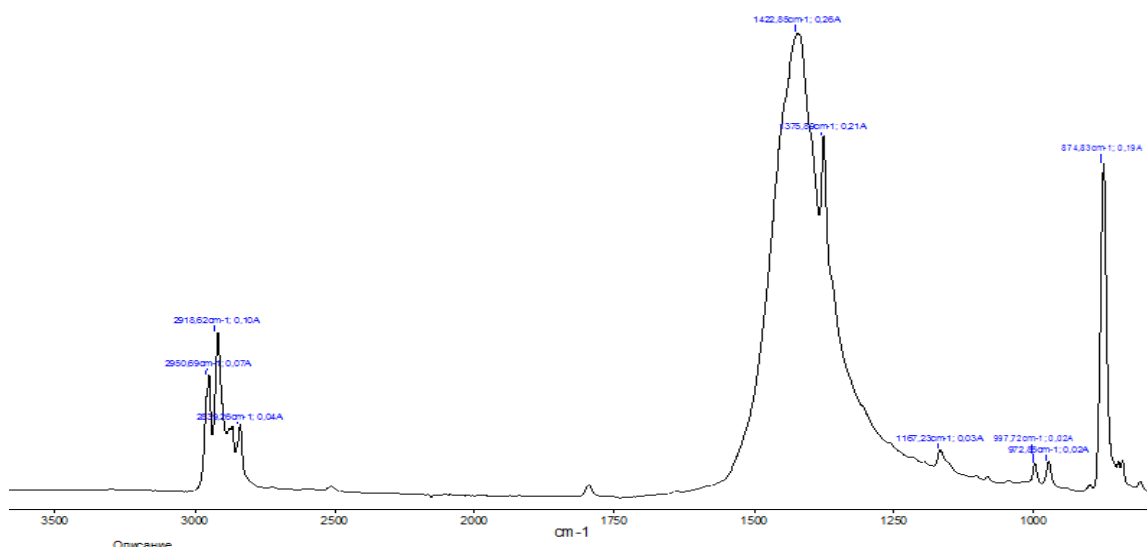


Рисунок 3.11 – Данные ИК-спектроскопии мембраны «Данафлекс»

На рисунке 3.10 приведен спектр мембраны «Данафлекс», который подтверждает, что материал является ПП и содержит значительное количество минерального наполнителя карбонатной природы. Полосы 2951, 2919 и 2839 см^{-1} относятся к валентным колебаниям C–H связей в ПП, а полосы 1167, 998 и 973 см^{-1} соответствуют колебаниям, характерным для ПП матрицы. Наличие полос 1796, 1422, 875 и 712 см^{-1} указывает на присутствие карбоната кальция. Дополнительные полосы 1459 и 1377 см^{-1} перекрываются с областью проявления карбонатного наполнителя. Такая спектральная картина согласуется с пористой структурой Данафлекс, поскольку в «дышащих» ПП мембранах карбонат кальция может выступать структурообразующим наполнителем, а поры формируются при растяжении наполненной пленки с отслоением полимерной матрицы от частиц наполнителя.

Производилась также оценка ИК-спектров мембран после испытаний на ВЗД, однако, изменений в спектральных картинах не установлено, что подтверждает отсутствие формирования новых устойчиво химически-связанных структур.

При сопоставлении исходных спектров ПУ материалов видно, что «Порелле П600» и «Меркуритекс Турбо» близки по химической природе, но различаются соотношением полиольной и изоцианатной частей. Мембрана «МТ-1», согласно

спектральной картине (рисунок 3.9), содержит большее число уретановых групп. В ранних исследованиях установлена большая прочность при растяжении «МТ-1», относительно «Порелле П600» и «Меркуритекс Турбо» [151]. Очевидно, высокая доля уретановых фрагментов формирует более жесткую и водородно-связанную структуру, способную эффективнее сопротивляться растягивающей нагрузке. Одновременно выявлено, что «МТ-1» имеет развитую внутреннюю поверхность 183,64 м²/г и максимальный объем пор 0,5052 см³/г, относительно «Порелле П600», у которой удельная поверхность составляет 96,71 м²/г, а объем пор 0,2495 см³/г. Различие по объему пор достигает 102,5%, т. е. «МТ-1» имеет более чем в два раза больший доступный поровый объем [152]. Совокупность данных о большем числе «жестких» фрагментов у МТ-1 и его развитой доступной внутренней поверхности объясняет лучшее ВЗД по аммиаку такой мембраны, поскольку аммиак является полярной молекулой и способен взаимодействовать с уретановыми и мочевиными группами через донорно-акцепторные и водородно-связанные взаимодействия.

По результатам оценки ВЗД к газовоздушной смеси нефти картина иная (раздел 3.5), так как «МТ-1» имеет ВЗД 39 мин, тогда как «Порелле П600» показывает 75 мин, что свидетельствует об отсутствии преимуществ более жесткой и уретанонасыщенной структуры в удержании паров нефтепродуктов. Одновременно, нефтяные углеводороды являются преимущественно неполярными компонентами, для которых перенос через мембрану определяется не столько способностью образовывать специфические связи с уретановыми группами, сколько растворением в полимерной фазе, диффузией через свободный объем и прохождением через доступные межцепные каналы. В этом случае значительная удельная поверхность и повышенный объем пор «МТ-1» могут создавать больше доступного пространства для сорбции и последующего переноса углеводородных молекул через мембрану.

«Меркуритекс Турбо» занимает промежуточное положение среди мембранных объектов и по ВЗД нефти показывает 61 мин, уступая «Порелле П600» на 23,0%, но превосходя «МТ-1» на 56,4%. По ИК-спектру «Меркуритекс

Турбо» близка по структуре и составу к «Порелле П600», однако регистрируются различия в соотношении полиольной и изоцианатной частей, что приводят к отличию в защитном действии. При этом «Меркуритекс Турбо» имеет максимальное относительное удлинение 218,85%, что указывает на более выраженную подвижность полимерной структуры. Выраженная эластичность благоприятна для деформационной устойчивости, но при контакте с углеводородной газовой смесью повышенная сегментальная подвижность может облегчать диффузионный перенос по мягким полиэфирным участкам. «Данафлекс» имеет минимальное ВЗД по нефти, равное 12,67 мин, что обусловлено типом мембраны, которая является пористой полипропиленовой. Даже при меньшем среднем размере пор 9,20 нм, по сравнению с «Порелле П600» и «МТ-1», наличие поровой структуры создает путь для газовой фазы. В интересах отведения водяного пара такая структура полезна, что подтверждается высокой паропрооницаемостью 5460 г/(м²·24 ч), но для нефтяных углеводородов открытая пористость становится недостатком. Газовоздушная смесь в таком случае проходит как через полимерную фазу, так и через доступные поровые каналы, вследствие чего ВЗД снижается.

Необходимо подчеркнуть, что для «Порелле П600» ранее зарегистрирована минимальная удельная поверхность среди исследованных мембран и минимальный объем пор. При среднем размере пор 10,32 нм материал не является полностью непроницаемым, но его доступный внутренний объем ниже, чем у «МТ-1» и «Данафлекс» [152]. Для водяного пара это не исключает массоперенос, поскольку гидрофильная ПУ мембрана способна работать по сорбционно-диффузионному механизму, а в случае нефтяных углеводородов меньшая доступность внутреннего пространства становится преимуществом, так как уменьшается вероятность их растворения, накопления и дальнейшей диффузии через полимерный слой.

Следовательно, для защиты от газовой смеси нефти решающим становится не максимальное содержание жестких сегментов, а их сочетание с плотностью полимерной матрицы, низким доступным поровым объемом,

ограниченным свободным пространством и отсутствием сквозных каналов. Применительно к нефтяным углеводородам барьерный эффект определяется совместным действием химического строения и порово-морфологической организации мембраны и для защиты от нефтепродуктов предпочтительной оказывается не столько более жесткая ПУ структура, а структура с ограниченным доступным объемом переноса и меньшим числом путей для диффузии углеводородных молекул.

Дополнительно для косвенной оценки структуры и свойств мембран по наличию в составе фрагментов различной термостойкости использовали методы совмещенного анализа ДТА-ТГА, с получением кривых по методике и в условиях, охарактеризованных в разделе 2.2.2.

Полученные результаты для 4 марок мембран представлены на рисунках 3.12 («Порелле П600»), 3.13 («Меркуритекс Турбо»), 3.14 («МТ-1»), 3.15 («Данафлекс»).

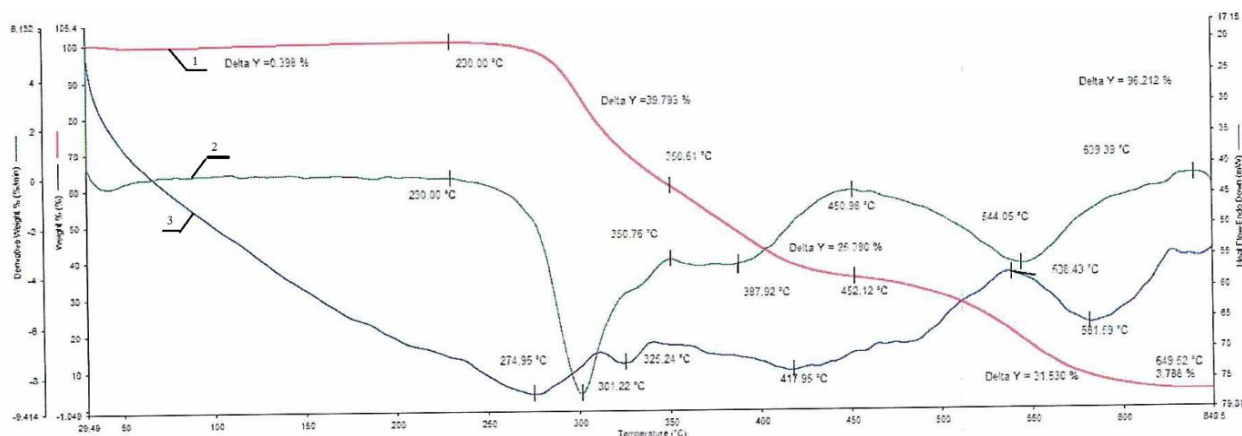


Рисунок 3.12 – Кривые ТГ (1), ДТГ (2), ДТА(3) «Порелле П600»

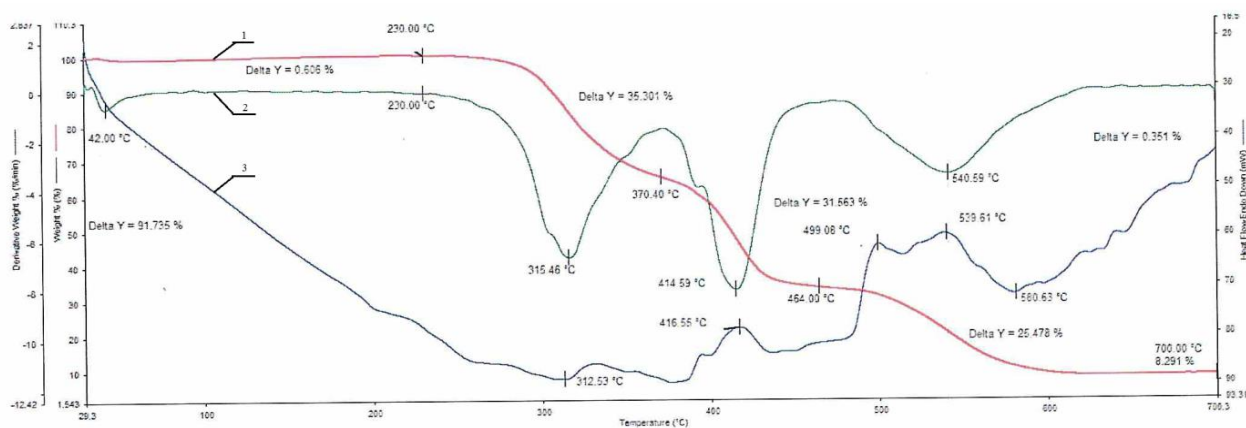


Рисунок 3.13 – Кривые ТГ (1), ДТГ (2), ДТА(3) «Меркуритекс Турбо»

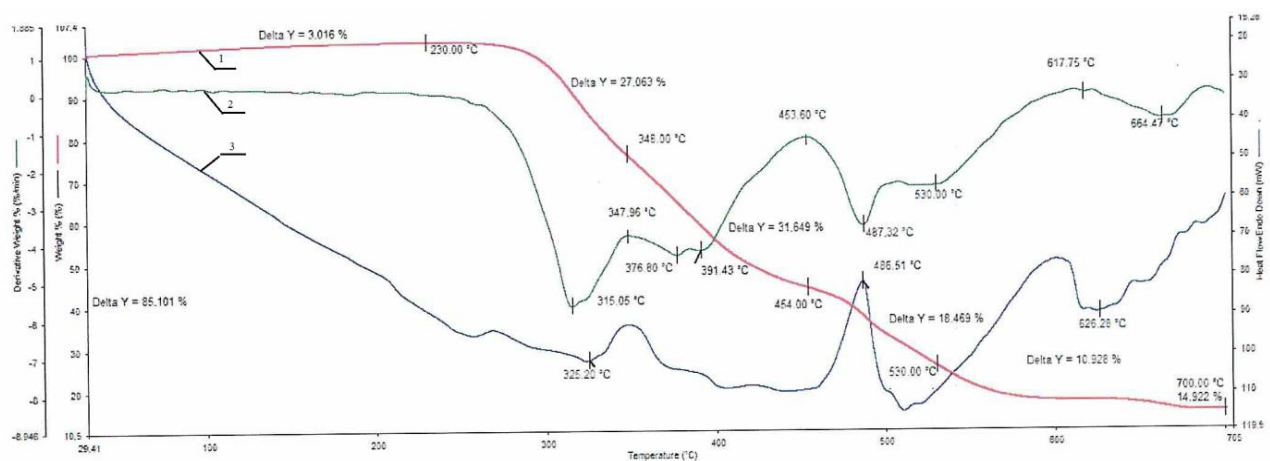


Рисунок 3.14 – Кривые ТГ (1), ДТГ (2), ДТА(3) «MT-1»

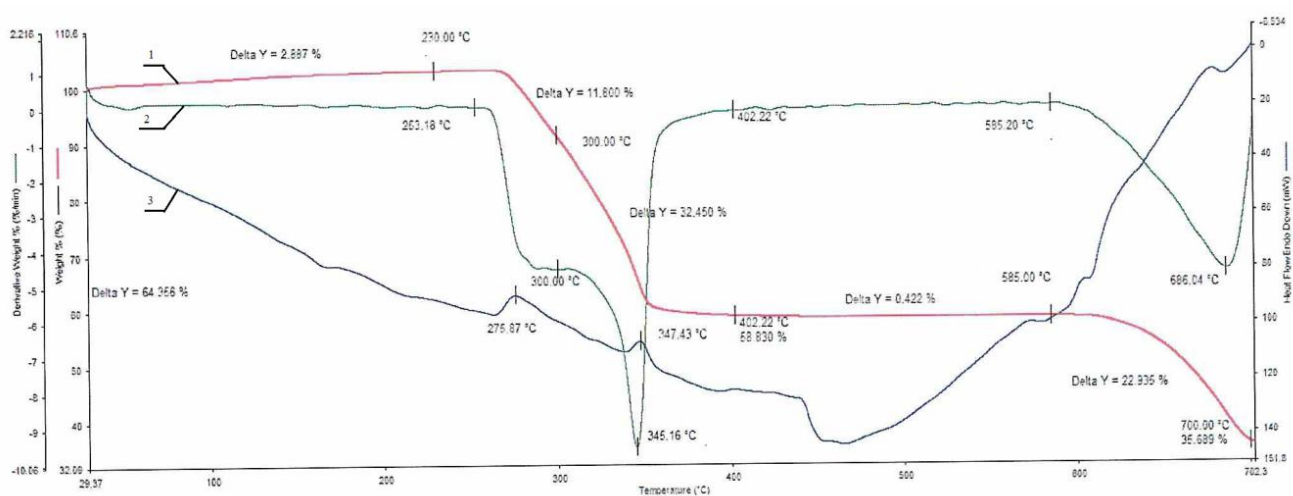


Рисунок 3.15 – Кривые ТГ (1), ДТГ (2), ДТА(3) «Данафлекс»

Изменение массы образцов мембран по данным ТГ, температуры максимумов скорости потери массы по кривым ДТГ, максимумы тепловых эффектов по кривым ДТА представлены в таблицах 3.25, 3.26, 3.27 соответственно.

По данным для мембраны «Порелле П600» (рисунок 3.12, таблицы 3.25-3.27) до 230 °C по кривой ТГ регистрируется не снижение, а незначительный прирост массы на 0,40% при отсутствии максимумов на ДТГ и тепловых эффектов на ДТА. Характерная для начальных участков потеря массы за счет десорбции влаги не регистрируется, слабый прирост, вероятно, отвечает стадии термоокисления, на которой кислород хемосорбируется по метиленовым атомам

углерода полиэфирных блоков с образованием гидропероксидных групп без выделения газообразных продуктов.

Наиболее интенсивная область потери массы охватывает 230-351°C с сокращением на 39,79% и максимумом скорости процесса по кривой ДТГ при 301°C. По данным ДТА ей соответствуют эндотермические эффекты 275 и 325°C. Поглощение тепла при столь значительной убыли массы свидетельствует о преобладании реакций диссоциации над окислением.

Таблица 3.25 – Изменение массы образцов мембран по данным ТГ

Мембрана	Интервал температур, °C	Изменение массы, % масс.	Остаточная масса, % масс.
Порелле П600	29–230	+0,40	3,79
	230–351	–39,79	
	351–452	–25,38	
	452–649	–31,53	
	29–650 (итого)	–96,21	
Меркуритекс Турбо	29–230	+0,61	8,29
	230–370	–35,32	
	370–464	–31,56	
	464–700	–25,48	
	29–700 (итого)	–91,74	
МТ-1	29–230	+3,02	14,96
	230–348	–27,06	
	348–454	–31,65	
	454–530	–18,47	
	530–700	–10,93	
	29–700 (итого)	–85,10	
Данафлекс	29–230	+2,89	35,69
	230–300	–11,80	
	300–402	–32,45	
	402–585	–0,42	
	585–702	–22,93	
	29–700 (итого)	–64,36	

Таблица 3.26 – Температуры максимумов скорости потери массы по кривым ДТГ

Мембрана	Максимумы, °С
Порелле П600	301; 388; 544
Меркуритекс Турбо	42; 315; 415; 541
МТ-1	315; 377; 391; 487; 530; 664
Данафлекс	285; 345; 686

Таблица 3.27 – Максимумы тепловых эффектов по кривым ДТА

Мембрана	Максимумы, °С (↓ – эндотермический эффект, ↑ – экзотермический эффект)
Порелле П600	275↓; 325↓; 418↓; 538↓; 581↓
Меркуритекс Турбо	312↓; 416↓; 499↑; 540↑; 580↓
МТ-1	325↓; 487↑; 626↓
Данафлекс	276↑; 347↑

Процесс отвечает распаду уретановой связи $-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$ по трем конкурирующим направлениям: обратной реакции с регенерацией изоцианата и полиола, образованию первичного амина, олефина и CO_2 , а также формированию вторичного амина с выделением CO_2 . Это согласуется с данными Ристича И. с соавторами, что первая ступень термодеструкции сегментированных ПУ инициируется вблизи 325°C и отвечает расщеплению уретановых и мочевиновых связей жестких блоков [158], кроме того Платоновой Е.О. зарегистрировано начало медленной потери массы в интервале $260-360^\circ\text{C}$ [159]. Полосы ассоциированных уретановых карбониллов около 1700 см^{-1} и мочевиновых $\text{C}=\text{O}$ около 1639 см^{-1} в спектре «Порелле П600» подтверждают наличие обоих типов расщепляемых фрагментов.

Область $351-452^\circ\text{C}$ отражает сокращение 25,38% массы с максимумом скорости при 388°C и эндозэффектом в области 418°C , что отвечает деструкции мягких блоков простого полиэфира, которым на ИК-спектрах соответствуют полосы $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ при 1076 и 1103 см^{-1} . Разрыв простой эфирной связи протекает по механизму деструкции цепи с выделением альдегидов, циклических эфиров и ненасыщенных углеводородов, что также требует затрат энергии. Значение 388°C практически совпадает с приведенной в работе [160] температурой максимальной

скорости деструкции ПУ 387-391°C. Высокотемпературная область 452-649°C сопровождается потерей 31,53% массы при максимуме скорости 544°C и эндотермических эффектах 538 и 581°C. Суммарная убыль в интервале 29–650°C достигает 96,21% при остаточной массе 3,79% (минимальной среди исследованных мембран). Принципиальной особенностью «Порелле П600» выступает полное отсутствие экзотермических эффектов во всем диапазоне: окислительное догорание карбонизованного остатка, сопровождающееся в воздушной среде выделением тепла, не регистрируется, а деструкция идет преимущественно по маршруту деполимеризации и улетучивания. Такое поведение согласуется с минимальными для ряда мембран удельной поверхностью 96,71 м²/г и объемом пор 0,2495 см³/г: плотная, малопроницаемая для кислорода матрица ограничивает развитие цепных окислительных реакций в объеме полимера.

При исследовании результатов для мембраны «Меркуритекс Турбо» (рисунок 3.13, таблицы 3.25-3.27) установлено, что до 230°C образец набирает 0,61% массы и на ДТГ присутствует слабый максимум 42°C, отвечающий удалению остаточной поверхностной влаги и не сопровождающийся выраженным тепловым эффектом. Интервал 230-370°C характеризуется потерей массы 35,32% с максимумом скорости при 315°C и эндоэффектом в области 312°C, что характерно для диссоциации уретановых и мочевиновых фрагментов жестких блоков. Смещение максимума на 14°C относительно «Порелле П600» указывает на несколько большую термическую устойчивость жесткой фазы и согласуется с различиями в соотношении полиольной и изоцианатной частей по ИК-спектрам. Область 370-464°C и потерей 31,56% массы с максимумом скорости при 415°C, а также эндоэффектом при 416°C можно отнести к деструкции полиэфирных мягких сегментов. Высокотемпературная область 464-700°C с потерей 25,48% массы и максимальной скорости ее потери при 541°C принципиально отличается от соответствующей области «Порелле П600» тепловым характером, так как на ДТА фиксируются экзотермические эффекты в областях 499 и 540°C, за которыми следует эндоэффект при 580°C. Выделение тепла преимущественно связано с

окислительным догоранием кокса, образующегося при термодеструкции ароматических фрагментов изоцианатной части. Суммарная потеря массы составила 91,74%, остаточная масса в 8,29% вдвое выше, чем у «Порелле П600». Более развитая система межцепных промежутков, косвенно подтверждаемая максимальным среди мембран относительным удлинением 218,85%, вероятно, облегчает диффузию кислорода вглубь образца и способствует развитию окислительной деструкции.

Согласно рисунку 3.14, таблицам 3.26-3.27 мембрана «МТ-1» демонстрирует наиболее сложную картину превращений, т.к. на кривой ДТГ регистрируются шесть максимумов скорости – при 315, 377, 391, 487, 530 и 664°C. Многоступенчатость отражает структурную неоднородность материала, содержащего по данным ИК-спектроскопии наибольшее количество уретановых фрагментов при, вероятно, более высокой степени сшивки. Прирост массы к 230°C достигает 3,02%, что является наибольшим значением среди ПУ мембран, отражая наиболее интенсивную хемосорбцию кислорода.

Область 230-348 °C сопровождается потерей 27,06% массы с максимумом скорости при 315°C и единственным в низкотемпературной части эндоэффектом при 325°C, отвечающим диссоциации уретановых связей. Потеря массы на данном участке наименьшая среди ПУ мембран, что при наибольшем содержании уретановых групп представляется противоречивым, однако, предположительно, в сшитой матрице продукты распада жестких блоков покидают образец не полностью, а участвуют в реакциях вторичной конденсации с образованием термостойких структур. Область 348-454°C с потерей массы на 31,65% содержит два близких максимума скорости при 377 и 391°C, что связано либо с отдельной деструкцией полиэфирных блоков различной длины, либо с наложением распада мягких сегментов и вторичного разложения продуктов первой ступени термодеструкции. Участок 454-530°C отвечает сокращению массы на 18,47% с максимальной скоростью ее потери при 487°C с экзотермическим эффектом при той же температуре. Совпадение температур подтверждает окислительную природу процесса вследствие выгорания карбонизованного остатка

ароматических фрагментов. Завершающая область 530-700°C характеризуется потерей 10,93% массы с максимумами скорости при 530 и 664°C и эндозффектом в области 626°C. Сочетание поглощения тепла с потерей массы выше 600°C нехарактерно для догорания органического остатка и позволяет предполагать присутствие в составе мембраны компонента карбонатной природы, разложение которого идет с поглощением тепла [161]. Остаточная масса мембраны «МТ-1» составляет 14,96%, что практически в 4 раза выше значения для «Порелле П600».

По данным рисунка 3.15, таблиц 3.25-3.27 термическое поведение ПП мембраны «Данафлекс» значительно отличается от ПУ образцов. Прирост массы до 230°C достигает 2,89% и отражает накопление гидропероксидных групп по третичному атому углерода, вследствие его чувствительности к окислению. Далее, интенсивная потеря массы происходит в 2 стадии: в области 230-300°C с потерей массы на 11,80% и максимумом скорости при 285°C и в диапазоне 300-402°C с сокращением массы на 32,45% с максимумом ее потери при 345°C. Ступеням отвечают экзотермические эффекты 276 и 347°C. Выделение тепла на всем протяжении деструкции указывает на термоокислительный механизм, вероятно, распад накопленных гидропероксидов инициирует цепное окисление с β -расщеплением окисленных цепей, после чего процесс переходит в стадию разрыва связей с улетучиванием низкомолекулярных продуктов. Полученные результаты согласуются с данными Эсмизаде Э., установившему для ПП в воздушной среде начало деструкции около 250°C и завершение вблизи 425°C при смещении тех же процессов в инертной атмосфере приблизительно на 50°C в область высоких температур [160].

Интервал 402-585°C представляет собой практически горизонтальный участок ТГ с потерей массы на 0,42% при отсутствии максимумов на ДТГ и эффектов на ДТА. Представляется, что органическая составляющая к 402°C выгорает полностью, и до 585°C образец термически инертен. Завершающая ступень 585-702°C отражает потерю 22,93% массы с максимумом скорости при 686°C. Существенная потеря массы у материала с уже израсходованной

органической частью отвечает разложению карбоната кальция, присутствие которого подтверждено ИК-спектроскопией, по реакции $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$.

По данным Чжуана Д. с соавторами, разложение карбоната кальция в воздухе характеризуется максимумом скорости вблизи 585°C и потерей массы 44%, процесс является эндотермическим [161]. Смещение максимума до 686°C объясняется затрудненным отводом диоксида углерода из плотной полимерной матрицы при достаточно высокой скорости нагрева образцов. Полученный результат имеет прямое отношение к структуре мембраны, т.к. пористость ПП «дышащих» пленок формируется одноосным или двухосным вытягиванием наполненной карбонатом кальция заготовки, при котором на границе раздела «частица наполнителя - матрица» происходит отслоение и раскрытие субмикронных каналов. Наполнитель выступает основой для получения сквозной поровой структуры, обеспечивающей, как установлено в разделе 3.3, высокую паропроницаемость $5460 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot 24 \text{ ч})$, но является причиной низкого времени защитного действия мембраны по газовоздушной смеси нефти (12,67 мин).

Сопоставление трех ПУ мембран выявляет соответствие термических характеристик с установленными методом ИК-спектроскопии различиями в содержании уретановых фрагментов. Остаточная масса возрастает в 3,95 раза в ряду «Порелле П600-Меркуритекс Турбо-МТ-1», в таком же ряду нарастает число максимумов на кривых ДТГ и температура первого максимума скорости потери массы. Такая тенденция связана с тем, что ароматические жесткие блоки на основе метиленидифенилдиизоцианата являются коксообразующими фрагментами, в то время как алифатические полиэфирные блоки улетучиваются практически полностью. В этой связи рост доли жестких сегментов увеличивает выход кокса и усложняет ступенчатость процесса, что согласуется с данными ИК-спектроскопии.

Механизм защитного действия материалов при воздействии аммиака и нефтепродуктов.

В таблицу 3.28 сведены характеристики мембран, позволяющие уточнить механизм защитного действия.

Таблица 3.28 – Сводная характеристика мембран

Показатель	Данафлекс	Порелле П600	МТ-1	Меркуритекс Турбо
Полимер, тип	Полипропилен пористая	ПУ, беспоровая	ПУ, беспоровая	ПУ, беспоровая
Поверхностная плотность, г/м ²	20	30	14	20
Предел прочности, МПа	3,71	7,53	10,62	8,83
Относительное удлинение, %	8,86	87,73	181,90	218,85
Содержание уретановых фрагментов по ИК-спектрам	не выявлено, спектр ПП с CaCO ₃	умеренное	наибольшее	умеренное
Удельная поверхность, м ² /г	121,90	96,71	183,64	332,06
Объем пор, см ³ /г	0,2804	0,2495	0,5052	0,4555
Средний размер пор, нм	9,20	10,32	11,00	3,71
Краевой угол по воде, град	111,0	71,8	102,4	91,8
Краевой угол по нефти, град	17,6	21,2	15,4	23,0
Остаточная масса по ТГ, % масс.	35,69	3,79	14,96	8,29
Максимумы ДТГ, °С	285, 345, 686	301, 388, 544	315, 377, 391, 487, 530, 664	42, 315, 415, 541
Эффекты ДТА, °С	276↑, 347↑	275↓, 325↓, 418↓, 538↓, 581↓	325↓, 487↑, 626↓	312↓, 416↓, 499↑, 540↑, 580↓
Паропроницаемость, г/(м ² ·24 ч)	5460	5650	3150	3700
ВЗД по аммиаку, среднее	3,92 мин	4,42 мин	8,33 мин	4,45 мин
ВЗД по нефти	12,67 мин	75 мин	39 мин	61 мин

Аммиак представляет собой низкомолекулярную полярную молекулу с дипольным моментом 1,47 Д и кинетическим диаметром около 0,26 нм. Малый размер и высокая подвижность обеспечивают его быстрое проникновение через полимерные и пористые структуры. Простая физическая адсорбция такой молекулы на углеродной поверхности недостаточна, поэтому защитное действие определяется физико-химическим удержанием. Уретановая группа –NH–CO–O– содержит центры, способные взаимодействовать с аммиаком. Атом водорода при азоте является донором протона и может связываться с неподеленной парой азота

аммиака, выступающего донором электронной пары, а карбонильный кислород, напротив, служит донором электронной пары для протона аммиака. Оба варианта комплексообразования представляют собой донорно-акцепторное взаимодействие водородносвязанного типа (рисунок 3.16 а, б). При длительном контакте с аммиаком не исключается протекание химической реакции аминолита уретановой группы, при которой аммиак атакует карбонильный атом углерода с разрывом связи С–О, образованием замещенной мочевины и выделением спирта, отвечающего полиольному блоку (рисунок 3.16 в), однако, поскольку устойчивые новые химически связанные структуры после испытаний по ИК-спектрам не выявлены, основной процесс корректнее описывать как обратимую физико-химическую сорбцию по вариантам а и б.

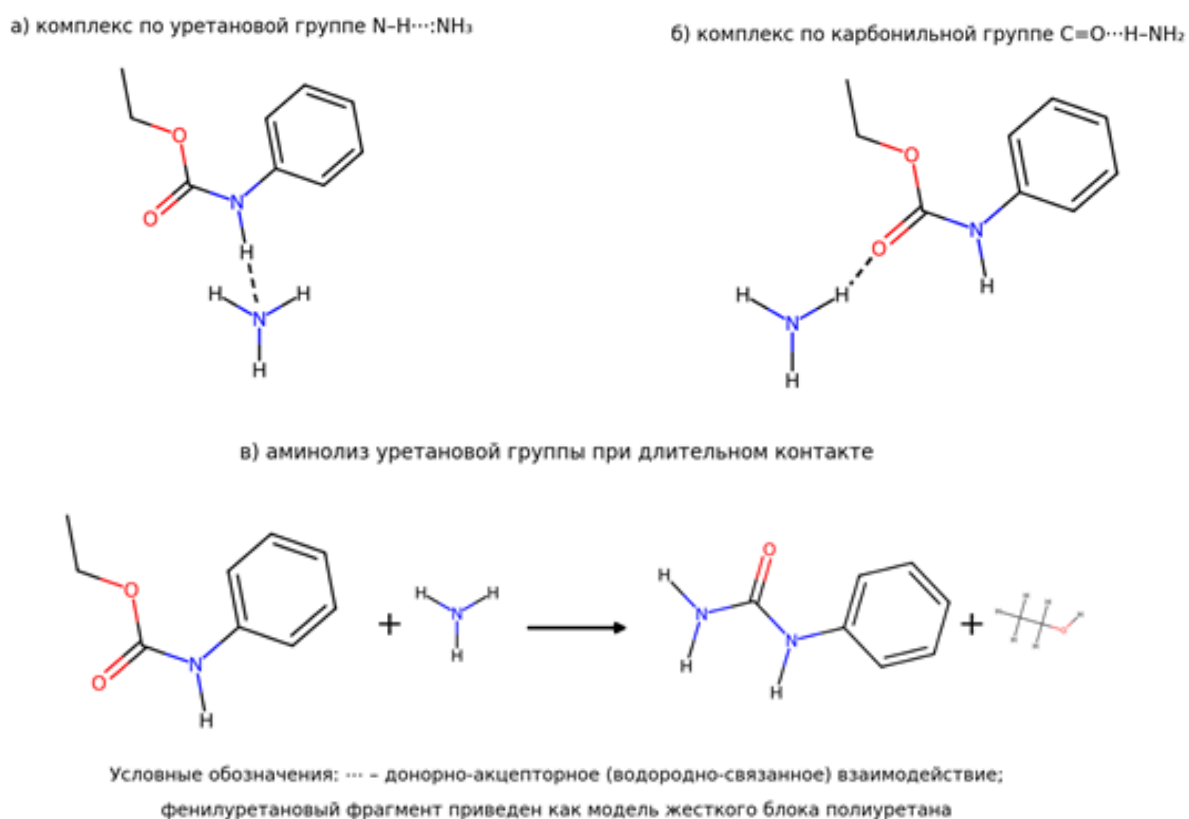


Рисунок 3.16 – Механизм защитного действия ПУ материалов при воздействии аммиака

Лучшие результаты по ВЗД к аммиаку демонстрирует материал «МТ-1». По данным ИК-спектроскопии он содержит наибольшее число уретановых фрагментов, что согласуется с его максимальной прочностью 10,62 МПа и повышенной остаточной массой при ТГА 14,96%. Кроме того, мембрана «МТ-1»

имеет развитую внутреннюю поверхность 183,64 м²/г и объем пор 0,5052 см³/г. За счет сочетания полярных уретановых и мочевиновых групп с доступной внутренней поверхностью «МТ-1» показывает среднее ВЗД по аммиаку 8,33 мин, тогда как «Порелле П600» дает 4,42 мин, «Меркуритекс Турбо» 4,45 мин, «Данафлекс» 3,92 мин.

Сорбирующий слой при воздействии аммиака работает иначе, чем при воздействии нефтепродуктов. Для аммиака важны не только площадь поверхности и объем пор, но и химическая природа поверхности угля. Уголь «ФАС» имеет развитую микромезопористую структуру, изотерму типа IVa, удельную поверхность 997,1118 м²/г и объем пор 0,9592 см³/г. Такая поровая структура повышает доступность сорбционных центров для малой полярной молекулы.

Пакет «Саржа-ФАС-МТ-1» продемонстрировал наибольшее защитное действие по аммиаку и выдержал 47,17 мин. Его преимущество связано с совместной работой двух слоев. «ФАС» задерживает аммиак в развитой пористой системе, а «МТ-1» усложняет перенос газа из внешней среды к сорбенту за счет большего количества уретановых фрагментов относительно других мембран и развитой внутренней поверхности. Замена «МТ-1» на «Порелле П600» при том же угле «ФАС» снижает ВЗД до 38 мин, что показывает решающее для барьерности к аммиаку значение мембранного слоя.

Газовоздушная смесь нефти образована преимущественно неполярными углеводородами с более высокой молекулярной массой и меньшей подвижностью по сравнению с аммиаком. Такие компоненты не образуют выраженных донорно-акцепторных связей с уретановыми группами. Их перенос определяется физическими процессами, включая смачивание поверхности, растворение в полимерной фазе, диффузию через доступный свободный объем и дисперсионную адсорбцию в микропорах углеродного сорбента (рисунок 3.17).

Данные по краевым углам показывают, что все изученные мембраны смачиваются нефтью. Краевой угол составляет 21,2° для «Порелле П600», 15,4° для «МТ-1», 23,0° для «Меркуритекс Турбо» и 17,6° для «Данафлекс». Поэтому

защитное действие «Порелле П600» нельзя объяснить олеофобностью, а корректно связывать его с плотностью ПУ матрицы, меньшим доступным объемом пор и отсутствием сквозных каналов.

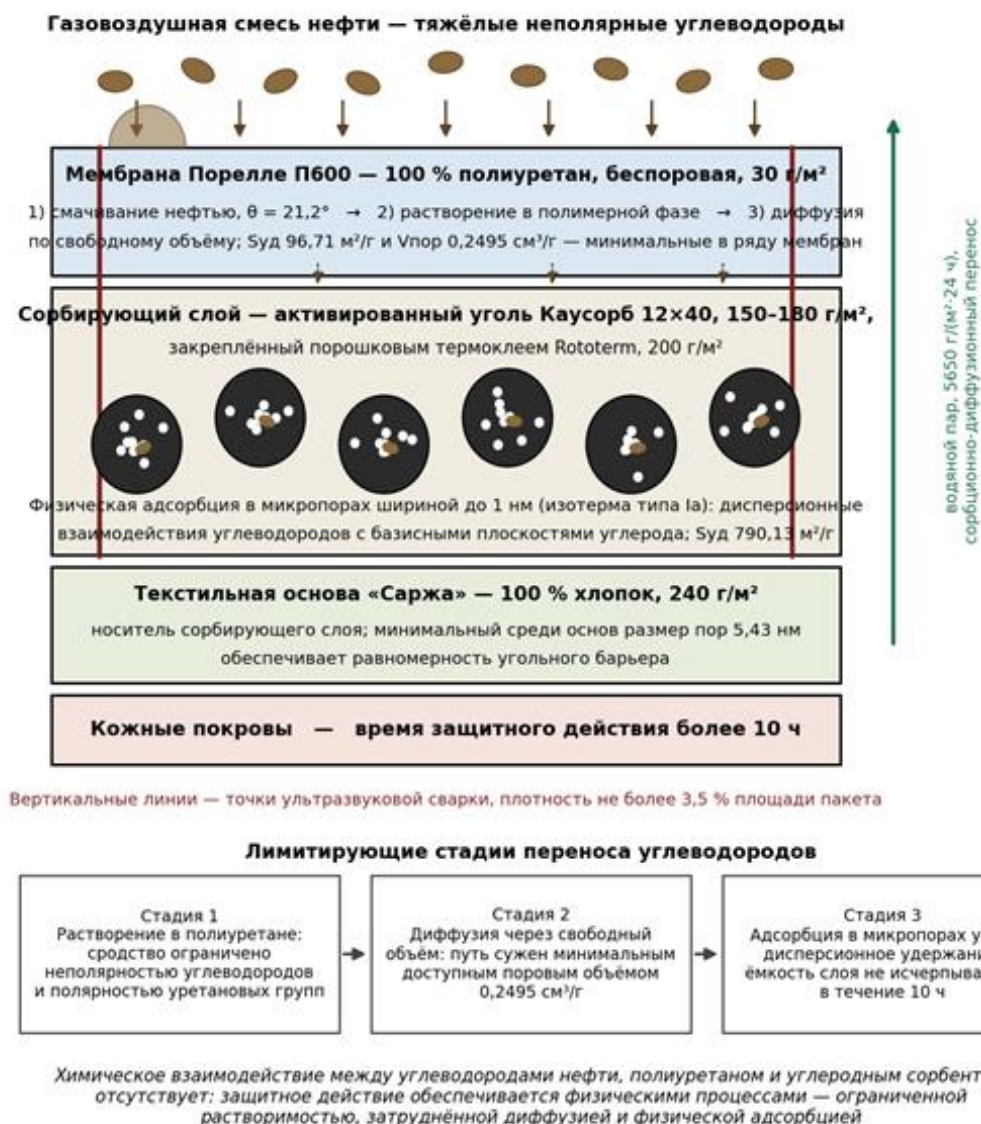


Рисунок 3.17 – Механизм защитного действия пакета материалов при воздействии газовой смеси нефти

Действительно, «Порелле П600» имеет минимальную удельную поверхность среди мембран 96,71 м²/г и минимальный объем пор 0,2495 см³/г. При среднем размере пор 10,32 нм материал не является полностью непроницаемым, но его доступный внутренний объем ниже, чем у «МТ-1» и «Данафлекс». В случае водяного пара это не препятствует сорбционно-

диффузионному переносу, а в случае нефтяных углеводородов становится сокращается вероятность их накопления и последующей диффузии через мембрану. Закономерно, что «Порелле П600» показывает максимальное ВЗД по нефти среди мембран, равное 75 мин. «МТ-1» при большей внутренней поверхности 183,64 м²/г и объеме пор 0,5052 см³/г дает 39 мин, «Данафлекс» показывает минимальный результат 12,67 мин, несмотря на поры 9,20 нм, поскольку его ПП пористая структура создает путь для газофазного переноса. Высокая паропроницаемость «Данафлекс» 5460 г/(м²·24 ч) обеспечивает отвод влаги, однако, при действии нефтяных паров открытая пористость снижает барьерные свойства.

Вклад сорбирующего слоя по нефти определяется соответствием поровой структуры размеру углеводородных молекул. «Каусорб» имеет удельную поверхность 790,13 м²/г, объем пор 0,3689 см³/г и размер пор 2,23 нм, при этом, именно для «Каусорб» зарегистрирована изотерма типа Ia, характерная для узких микропор до 1 нм. В таких порах крупные неполярные молекулы удерживаются за счет дисперсионных взаимодействий и перекрывания потенциалов противоположных стенок.

Таким образом, механизм защиты от аммиака и механизм защиты от нефтепродуктов различаются. Аммиак задерживается преимущественно через физико-химическое взаимодействие с полярными группами и доступными сорбционными центрами уретановых и мочевиновых групп, также важна развитая внутренняя поверхность мембраны и микромезопористая структура угля, что обеспечивает пакету «Саржа-ФАС-МТ-1» лучшее ВЗД по аммиаку, когда мембрана «МТ-1» работает как активный полярный барьер, а уголь «ФАС» усиливает удержание аммиака за счет развитой поровой системы. Для нефтепродуктов решающее значение имеет не количество уретановых фрагментов, а ограничение физического переноса неполярных углеводородов. Лучший результат показывает пакет «Саржа-Каусорб-Порелле П600», так как «Каусорб» эффективен за счет узких микропор и изотермы адсорбции типа Ia, а «Порелле П600» снижает диффузию нефтяных компонентов через мембранный слой благодаря минимальной удельной поверхности 96,71 м²/г и минимальному объему пор 0,2495 см³/г.

ГЛАВА 4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОИЗВОДСТВА ПАКЕТОВ МАТЕРИАЛОВ С СОРБИРУЮЩИМ И МЕМБРАННЫМ СЛОЯМИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АММИАКА И НЕФТЕПРОДУКТОВ

В главе разработана технологическая схема производства пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоями для защитной одежды от воздействия аммиака и нефтепродуктов, отражены технологические параметры работы участка каландрирования и непрерывной точечной УЗ-сварки. Приведены результаты испытаний опытных образцов пакетов материалов. Представлено экономическое обоснование внедрения в производство пакета материалов.

4.1 Технологическая схема производства пакетов материалов

При формировании технологических рекомендаций по выпуску пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоями опирались на результаты экспериментальных исследований эксплуатационных, в том числе защитных, свойств отдельных слоев пакетов материалов, изложенные в главе 3, где обоснован рациональный состав слоев в пакете по совокупности полученных данных о каждом слое и их совместном защитном действии.

Реализация разрабатываемых технологических рекомендаций планируется в условиях опытно-промышленного производства АО «КазХимНИИ», г. Казань, Россия, специализирующегося на разработках защитных костюмов, в т. ч. фильтрующего типа.

Технологические рекомендации и последующий расчет эффективности производства приводятся на примере пакета материалов для защиты от токсичных веществ и нефтепродуктов, представляющего собой многослойную систему, сформированную последовательным расположением функционально различающихся слоев:

- Внутренним слоем, обращенным к телу индивида, служит ткань «Саржа» – 100% хлопчатобумажное полотно саржевого переплетения производства

компании «Балтийский текстиль» (артикул ЦЦ35668) с поверхностной плотностью 240 г/м². Слой обеспечивает механическую прочность, гигиеничность и комфорт эксплуатации. Для закрепления сорбента на текстильной основе на нее наносится порошковый термоклей Рототерм, формирующий при плавлении адгезионный слой с постоянной липкостью.

- Слой с сорбирующей функцией реализуется посредством слоя активированного угля «Каусорб» производства АО «Сорбент», обладающего развитой системой микропор.

- Внешним слоем выступает гидрофильная мембрана «Порелле П600» производства ООО «Фотопринт-Иваново» (100% ПУ, поверхностная плотность 30 г/м²), скрепляемая с нижележащими слоями методом точечной УЗ сварки.

Послойное формирование пакета, объединяющего барьерную мембрану и сорбционный угольный слой, определяет совокупность его защитных свойств. Рекомендации по изготовлению сорбционно-мембранного пакета развивают технологические решения получения двуслойного сорбционно-фильтрующего текстильного материала с применением клеепромазочной машины, предложенные Морозовой И.И. [153]. В настоящем исследовании получение двуслойного материала «текстильная основа-сорбент» реализуется путем организации участка каландрирования. Для нанесения порошкового термокля и углеродного сорбента на текстиль с последующей термоактивацией и соединением слоев рекомендован каландр S4 560×1530, устройство и элементы которого отражены в приложении У, функциональные характеристики приведены в таблице 4.1. Каландр дополнительно оборудован порошковыми дозаторами термокля и сорбента, а также инфракрасными нагревателями для предварительного плавления термопластичного связующего.

Таблица 4.1 – Функциональные характеристики каландра S4 560×1530

Параметр	Значение
Скорость движения ткани, м/мин	7,0–35,0
Длина вала каландра, мм	1530,0
Ширина изделия, мм	1250,0
Мощность валков, кВт	7,5
Нагрев вала	электропарогенератор
Максимальная температура сушильных плит, °С	150,0
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм, не более	8300×3500×4250

Другой участок технологического процесса отвечает за скрепление гидрофильной ПУ мембраны «Порелле П600» с каландрированным сорбционным полотном посредством УЗ-сварки. В разработках Харапудько Ю.В. по производству мембранного технического текстиля соединение мембран рекомендовано производить на линии, оснащенной узлом УЗ-сварки Sonic Digital HS3 от компании WEBER ULTRASONICS (Германия), с шириной полотна до 1600 мм и производительностью до 50 м/мин [162].

Однако, в условиях целесообразности приоритетного использования оборудования российских производителей и импортозамещения предпочтительна замена импортного узла отечественным аналогом – рулонной установкой непрерывной точечной УЗ-сварки серии «Волна» производства ООО «Ультразвуковая техника – ИНЛАБ» (г. Санкт-Петербург), предназначенной для бесклевого соединения пленок и нетканых материалов с содержанием термопластов. Установка комплектуется роторным роликом-сонотродом, что обеспечивает непрерывное формирование точечного сварного шва при сопоставимых с импортным оборудованием ширине полотна и скорости обработки. Технические характеристики рекомендуемого узла представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Технические характеристики узла УЗ сварки серии «Волна»

Параметр	Значение
Тип установки	рулонная, непрерывной точечной УЗ сварки
Рабочая частота, кГц	20–35
Ширина обрабатываемого полотна, мм, до	1600
Скорость сварки, м/мин, до	50
Установленная мощность, кВт, не более	6,0
Тип рабочего инструмента	ролик-сонотрод (роторный)
Плотность точек скрепления, %	2,5–4,0 (регулируемая)
Электропитание	380 В, 50 Гц

Схема технологического процесса изготовления пакета материалов представлена на рисунке 4.1.

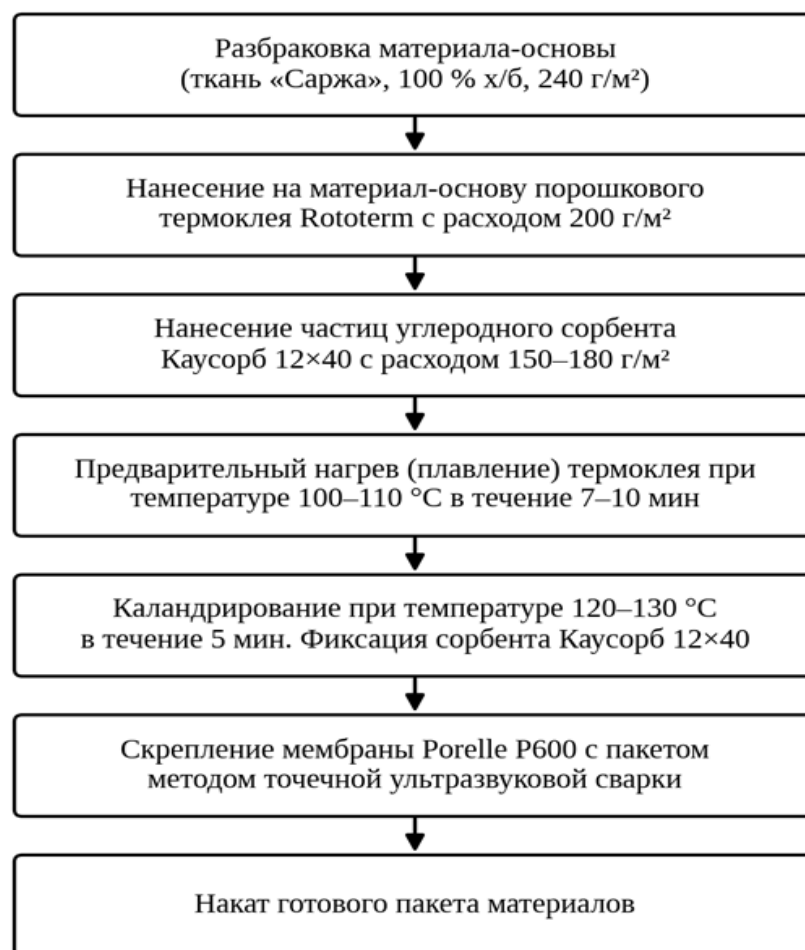


Рисунок 4.1 – Схема технологического процесса изготовления пакета материалов

Формирование пакета осуществляется в два основных этапа:

- на первом на текстильную основу последовательно наносятся порошковый термоклей «Рототерм» и частицы углеродного сорбента «Каусорб» с последующей термоактивацией и каландрированием;

- на втором, к полученному сорбционно-активному полотну, точечной УЗ сваркой присоединяется мембрана «Порелле П600».

Схема создания пакета материалов на каландре приведена на рисунке 4.2.

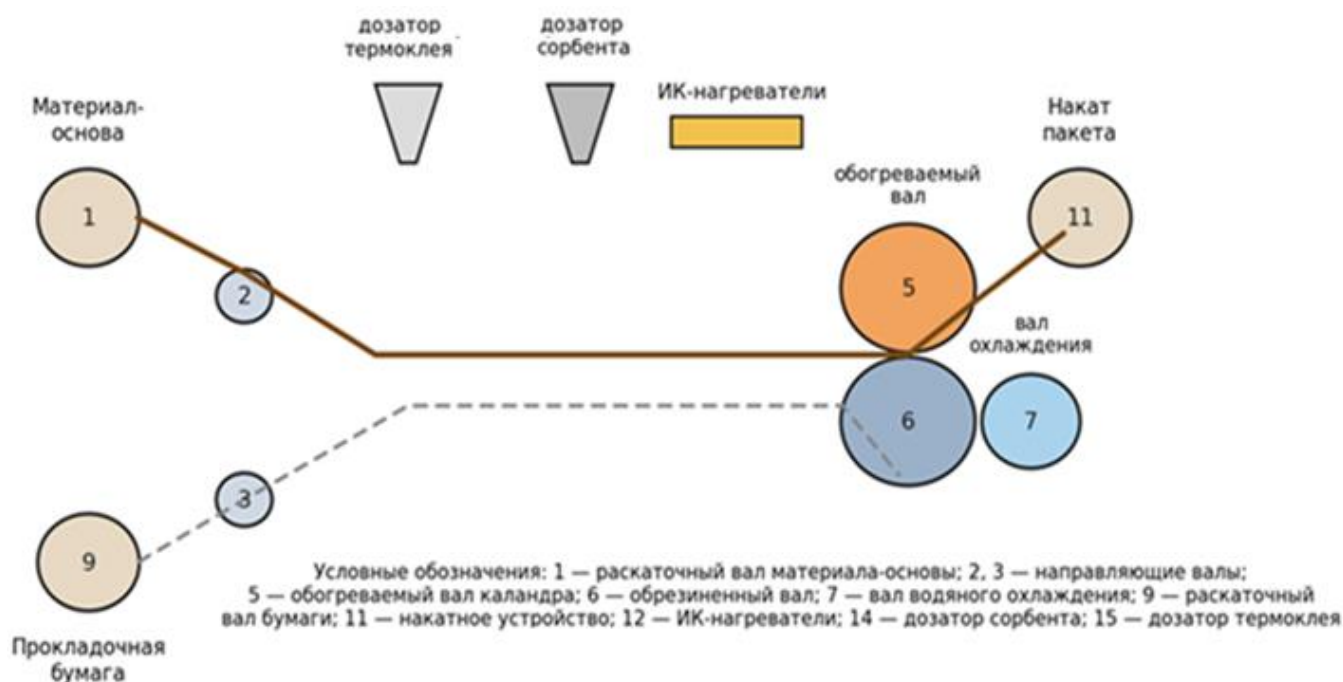


Рисунок 4.2 – Схема создания пакета материалов на каландре

Технологический процесс реализуется в несколько последовательных стадий, обозначаемых литерами:

А – раскат и заправка материалов в каландр;

В – нанесение на материал-основу термоклей «Рототерм» и частиц углеродного сорбента «Каусорб»;

С – предварительный нагрев клеевого состава;

Д – каландрирование;

Е – намотка готового сорбционного полотна.

Раскат и заправка материалов в каландр на стадии А производится следующим образом. Рулон текстильной основы устанавливают на раскаточный вал (поз. 1, рисунок 4.2) и через направляющие валы (поз. 2, 3) заправляют в

рабочую зону каландра; прокладочную бумагу заправляют с противоположной стороны с заднего раскаточного вала (поз. 9); пуску каландра предшествует прогрев металлического обогреваемого вала (поз. 5) электропарогенератором до температуры, обеспечивающей термоактивацию термокля Рототерм и фиксацию углеродного сорбента; нагружение валов формируется пневмосистемой.

Нанесение термокля и углеродного сорбента на стадии В осуществляется посредством раздельного введения компонентов. Порошковый термоклей «Рототерм» подается дозатором поз. 15 с расходом 200 г/м^2 , частицы углеродного сорбента «Каусорб» – дозатором поз. 14 с расходом $150\text{--}180 \text{ г/м}^2$. Дозаторы обеспечивают равномерное распределение компонентов по ширине полотна, масса наносимого материала регулируется скоростью движения текстильной основы. Нагрев клеевого состава на стадии С происходит путем доведения термокля «Рототерм» до температуры плавления $100\text{--}110 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 7–10 мин инфракрасными нагревателями (поз. 12) с целью его фиксации на основе и закрепления частиц сорбента перед поступлением полотна в зону каландрирования. Температура нагрева контролируется оператором каландра.

Каландрирование на стадии D способствует окончательной фиксации углеродного сорбента и происходит под совместным действием температуры $120\text{--}130 \text{ }^\circ\text{C}$ и давления в зоне между верхним обогреваемым валом (поз. 5) и средним обрезающим валом (поз. 6) в течение 5 мин. Для предотвращения осыпания гранул сорбента полотно прокладывают бумагой, во избежание перегрева обрезающий вал периодически охлаждается валом водяного охлаждения (поз. 7). На стадии Е производится намотка готового полотна, когда текстиль с закрепленным сорбентом поступает на накатное устройство (поз. 11) с последующей перемоткой на гильзы. Полученное полотно направляется на участок УЗ скрепления мембраны.

Схема узла УЗ-сварки мембраны отражена на рисунке 4.3.

Принцип действия УЗ-узла основан на преобразовании электрических колебаний высокой частоты в механические колебания ультразвукового диапазона с последующим их сообщением свариваемому материалу.

Высокочастотный сигнал УЗ-генератора (поз. 1, рисунок 4.3) поступает на пьезоэлектрический преобразователь (поз. 2), где электрическая энергия трансформируется в механические продольные колебания. Амплитуда колебаний корректируется бустером (поз. 3) и передается на ролик-сонотрод (поз. 4).

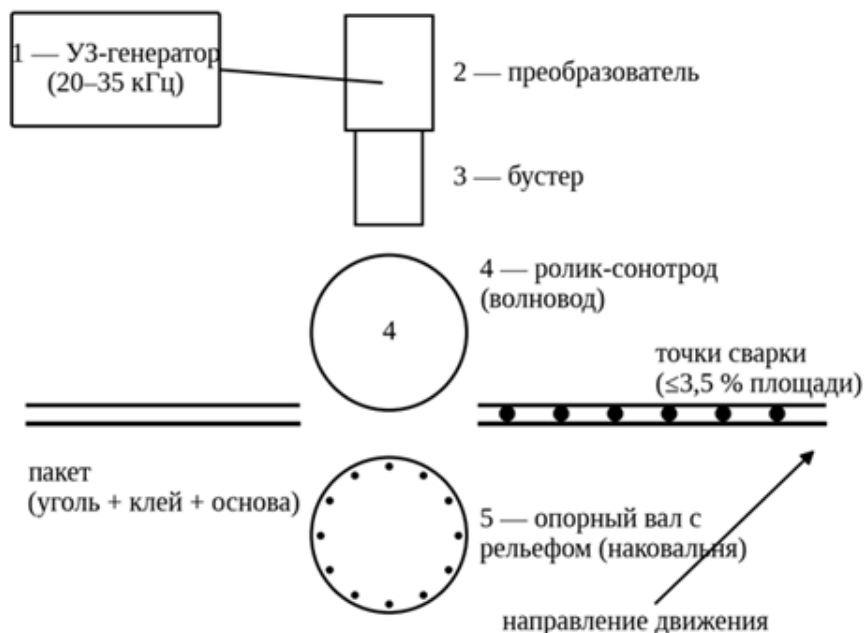


Рисунок 4.3 – Схема узла УЗ-сварки мембраны

При прохождении полотна в зазоре между сонотродом и опорным валом с рельефной поверхностью (поз. 5) в локальных зонах контакта за счет межмолекулярного и граничного трения выделяется теплота, инициирующая плавление термопластичных компонентов – полиуретана мембраны и термокля «Рототерм». Расплав при последующем охлаждении формирует прочные точечные сварные соединения, механически скрепляющие мембрану с сорбционным текстилем. Вследствие ограничений крепления натуральных основ ультразвуковыми технологиями, ввиду отсутствия в таком текстиле плавких компонентов, скрепление достигается за счет фиксации термопластичной мембраны и адгезионного слоя в точках сварки, что исключает применение дополнительных клеевых композиций, снижающих паропроницаемость слоев. Плотность распределения точек скрепления назначается не выше 3,5% площади пакета.

Общая схема изготовления пакета материалов, объединяющая производственные участки приведена на рисунке 4.4.

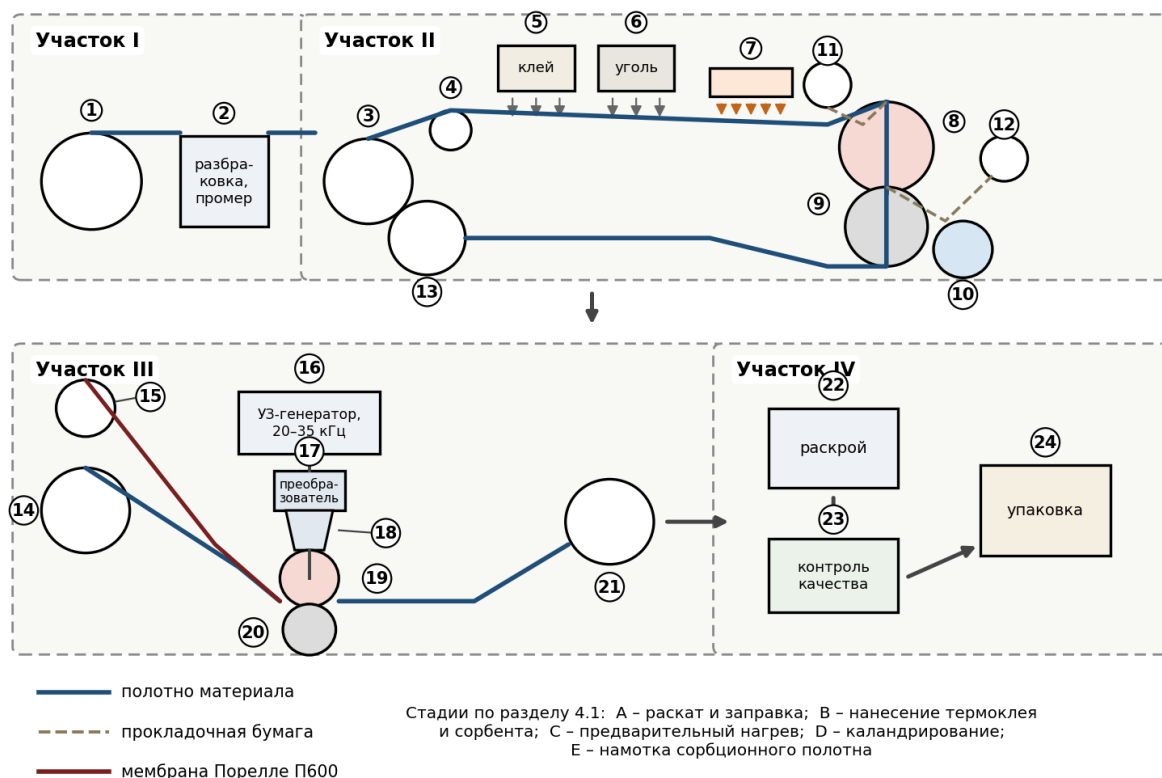


Рисунок 4.4 – Общая схема производства пакета материалов

Технологическая цепочка объединяет участок подготовки текстиля, участок каландрирования, на котором формируется сорбционное полотно, участок точечной УЗ-сварки, где к текстилю с углем присоединяется мембрана, а также участки раскроя, контроля качества и упаковки.

Согласно рисунку 4.4:

Участок I – подготовка текстильного материала.

1. Раскаточная стойка с рулоном ткани «Саржа».
2. Разбраковочно-промерочная машина: контроль сплошности полотна, отбраковка дефектных участков и отмер длины перед подачей в каландр.

Участок II – каландрирование (подробнее стадии процесса на рисунке 4.2).

3. Раскаточный вал каландра; полотно основы заправляется в рабочую зону через направляющие валы – стадия А.
4. Направляющий вал, задающий траекторию полотна и его натяжение.

5. Дозатор порошкового термокля – стадия В.
6. Дозатор углеродного сорбента – стадия В.
7. Инфракрасные нагреватели: доведение термокля до температуры плавления с фиксацией частиц сорбента на основе, стадия С.
8. Верхний металлический обогреваемый вал, нагреваемый электропарогенератором – стадия D.
9. Средний обрезиненный вал, нагружение валов формируется пневмосистемой, продолжительность воздействия 5 мин.
10. Вал водяного охлаждения, периодически охлаждающий обрезиненный вал во избежание его перегрева.
11. Раскаточный вал прокладочной бумаги, заправляемой с противоположной стороны для предотвращения осыпания гранул сорбента.
12. Намоточный вал прокладочной бумаги.
13. Накатное устройство сорбционного полотна с последующей перемоткой на гильзы, стадия Е.
- Участок III – непрерывная точечная ультразвуковая сварка.
14. Раскат сорбционного полотна «Саржа – термоклей «Rototerm» – Каусорб», поступающего с участка каландрирования.
15. Раскат мембраны «Порелле П600». Мембрана располагается стороной с большим временем защитного действия к внешней среде.
16. Ультразвуковой генератор, формирующий высокочастотный электрический сигнал.
17. Пьезоэлектрический преобразователь, трансформирующий электрическую энергию в механические продольные колебания ультразвукового диапазона.
18. Бустер, корректирующий амплитуду колебаний перед их передачей на рабочий инструмент.
19. Ролик-сонотрод роторного типа, обеспечивающий непрерывное формирование точечного сварного шва.

20. Опорный вал с рельефной поверхностью. В зазоре между соноотродом и опорным валом за счет межмолекулярного и граничного трения выделяется теплота, инициирующая плавление ПУ мембраны и термокля «Рототерм»; расплав при охлаждении формирует точечные сварные соединения.

21. Накатное устройство готового трехслойного пакета материалов.

Участок IV – раскрой, контроль качества и упаковка.

22. Раскройное оборудование: роспуск рулона на полотна заданной ширины и длины под последующий пошив защитной одежды.

23. Пост контроля качества: проверка сплошности мембранного слоя, равномерности распределения сорбента и целостности точечных сварных соединений; при необходимости отбор проб для определения времени защитного действия.

24. Упаковка и маркировка готовой продукции.

Послойная структура сформированного пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоем представлена на рисунке 4.5.

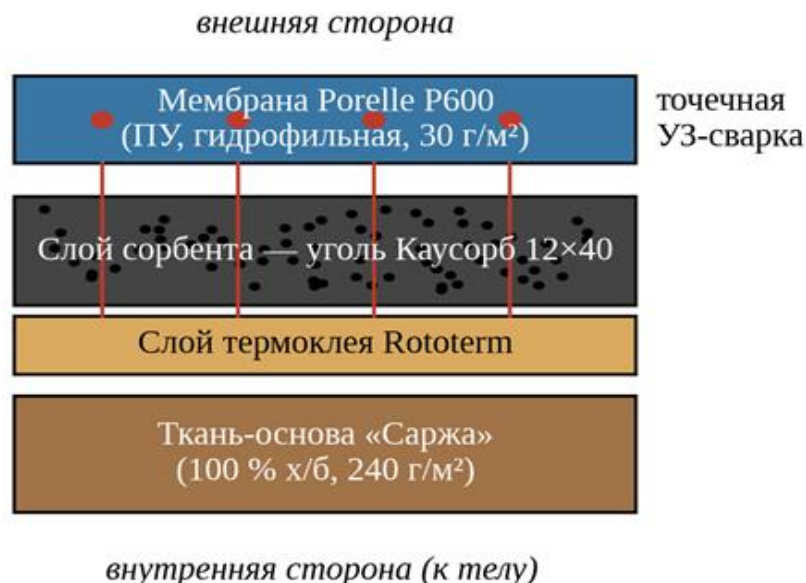


Рисунок 4.5 – Структура пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоями

Согласно рисунку 4.5 в направлении от внешней стороны пакета к внутренней опытный образец образован гидрофильной ПУ мембраной «Порелле П600», слоем сорбента «Каусорб» на термоклее «Рототерм» и текстильной

основой «Саржа». Мембрана зафиксирована точечными ультразвуковыми сварными соединениями, пронизывающими верхние слои пакета. Подобная организация слоев сочетает барьерную функцию мембраны с сорбционной емкостью угольного слоя, что обеспечивает защиту от токсичных веществ и паров нефтепродуктов при сохранении паропроницаемости и эксплуатационного комфорта. Опытный образец с мембраной «МТ-1» и углем «ФАС» на саржевой основе получен по аналогичной технологии.

4.2 Испытания опытных образцов пакетов материалов

Защитные характеристики опытных образцов пакетов материалов и промышленных аналогов оценивали по показателю времени защитного действия (ВЗД) при воздействии газовоздушных смесей нефти и аммиака. Испытания выполнены в испытательном центре АО «КазХимНИИ», акты испытаний приведены в приложении. Разрывные характеристики, паропроницаемость, поровую структуру методами БЭТ и БДЖХ пакетов и материалов-аналогов оценивали по методикам раздела 2.2.1.

Характеристики опытных пакетов и промышленных аналогов обобщены в таблице 4.3. Сопоставляются два разработанных пакета целевого назначения: «Саржа – Каусорб – Порелле» для защиты от нефтепродуктов и «Саржа – ФАС – МТ-1» для защиты от воздействия аммиака. В качестве базы сравнения приняты промышленные химзащитные материалы российского производства, охарактеризованные в разделе 2.1, свойства которых оценены в разделе 3.2.

Таблица 4.3 – Сводная характеристика разработанных пакетов материалов и промышленных аналогов

Показатель	Разработанные пакеты		Промышленные аналоги				
	Саржа–Каусорб–Порелле	Саржа–ФАС–МТ-1	ММС-Т	Митрон	ХЗМ 8318	Биоформ	Форм
Поверхностная плотность, г/м ²	520	504	350	370	400	280	230
Разрывная нагрузка по основе, Н	603,05	610,19	363,20	1210,81	664,01	527,20	560,10
Разрывная нагрузка по утку, Н	531,22	560,11	346,20	493,92	470,13	430,15	395,98
Прочность по основе, МПа	4,31	2,60	7,04	28,16	14,70	22,43	28,00
Прочность по утку, МПа	3,04	3,07	6,07	11,49	10,93	18,30	19,80
Относительное удлинение по основе, %	16,15	21,52	31,51	25,59	16,53	23,64	25,78
Относительное удлинение по утку, %	18,82	20,07	14,14	15,86	13,78	11,77	14,68
Раздирающая нагрузка по основе, Н	32,11	32,57	47,73	50,60	54,21	38,85	54,71
Раздирающая нагрузка по утку, Н	27,35	26,70	24,26	55,05	72,39	69,47	73,66
Удельная поверхность, м ² /г	397,98	525,75	66,94	17,09	25,43	72,60	42,60
Объем пор, см ³ /г	0,2277	0,4464	0,0621	0,0277	0,0326	0,0971	0,0688
Размер пор, нм	3,74	3,71	3,71	6,49	5,13	5,35	6,46
Паропроницаемость, г/(м ² ·ч)	26,15	12,39	21,67	49,00	27,33	27,33	34,33
ВЗД по газовоздушной смеси аммиака	17,67 мин	47,17 мин	3,83 мин	15,33 мин	5 мин	3,67 мин	3,33 мин
ВЗД по газовоздушной смеси нефти	10 ч	–	65,17 мин	13,33 мин	9,33 мин	10,67 мин	11,50 мин

Согласно таблице 4.3 среди промышленных аналогов ХЗМ по ВЗД к аммиаку наилучший результат показал материал «Митрон», равный 15,33 мин. Данный материал имеет преимущества по ВЗД относительно ХЗМ 8318 в 3,07

раза, и превышает «ММС-Т» в 4 раза, «Биоформ» в 4,18 раза, «Форм» в 4,6 раза. При этом разработанный трехслойный пакет с максимальной защитой по аммиаку, включающий ткань «Саржа», клей «Рототерм», уголь «ФАС» и мембрану «МТ-1», показал ВЗД 47,17 мин. Защитное действие оптимального пакета превосходит Митрон в 3,08 раза, ХЗМ 8318 в 9,43 раза, ММС-Т в 12,30 раза, Биоформ в 12,86 раза и Форм в 14,15 раза. Сравнительный анализ подтверждает, что разработанный пакет значительно эффективнее всех рассмотренных промышленных материалов при воздействии аммиака.

По газовой смеси нефтепродуктов среди промышленных аналогов наибольшее ВЗД установлено для «ММС-Т» (таблица 4.3), где показатель составил 65,17 мин, что выше в 4,89 раза относительно «Митрон», и превышает в 5,67 раза «Форм», в 6,11 раз «Биоформ» и 6,98 раза «ХЗМ 8318». Оптимальный пакет по нефти, включающий ткань «Саржа», клей «Рототерм», уголь «Каусорб» и мембрану «Порелле П600», обеспечил ВЗД более 10 ч. По отношению к лучшему промышленному аналогу «ММС-Т» его преимущество составляет более 9,21 раза. ВЗД оптимального пакета для спецодежды от воздействия нефтепродуктов выше, чем у ХЗМ «Митрон» в 45 раз, «Форм» в 52,17 раза, «Биоформ» более чем в 56,25 раза, «ХЗМ 8318» в 64,29 раза. Полученные результаты подтверждают выраженные преимущества разработанных трехслойных пакетов материалов относительно промышленно-выпускаемых ХЗМ части защиты от газовой смеси аммиака и нефтепродуктов [154].

Кроме того, согласно таблице 4.3 пакет «Саржа-ФАС-МТ-1» превосходит промышленный аналог «ММС-Т» по разрывной нагрузке по основе на 68,0%, по разрывной нагрузке по утку на 61,8%, по относительному удлинению по утку на 41,9%, по раздирающей нагрузке по утку на 10,1%, по удельной поверхности в 7,85 раза и по объему пор в 7,19 раза. Относительно «ХЗМ 8318» преимущества рассматриваемого пакета регистрируются по разрывной нагрузке по утку на 19,1%, относительному удлинению по основе на 30,1%, относительному удлинению по утку на 45,6%, удельной поверхности в 20,68 раз и объему пор в

13,69 раз. По сравнению с материалом «Биоформ» пакет лучше по разрывной нагрузке по основе на 15,7%, по разрывной нагрузке по утку на 30,2%, по относительному удлинению по утку на 70,5%, по удельной поверхности в 7,24 раза и по объему пор в 4,60 раза. Преимущества перед маркой химзащитного материала «Форм» заключаются в превышении значений показателей: на 8,9% по разрывной нагрузке по основе; 41,5% по разрывной нагрузке по утку; 36,7% по относительному удлинению по утку; в 12,34 раза по удельной поверхности и в 6,49 раза по объему пор. По сравнению с ХЗМ «Митрон» пакет лучше по разрывной нагрузке по утку на 13,4%, относительному удлинению по утку на 26,5%, удельной поверхности в 30,77 раза и объему пор в 16,12 раза.

Аналогичная оценка и сопоставительный анализ свойств пакета для защиты от газовоздушных смесей нефти показали, что пакет «Саржа-Каусорб-Порелле П600» относительно «ММС-Т» имеет преимущества по разрывной нагрузке по основе на 66,0%, разрывной нагрузке по утку на 53,4%, относительному удлинению по утку на 33,1%, раздирающей нагрузке по утку на 12,7%, удельной поверхности в 5,95 раза, объему пор в 3,67 раза и паропроницаемости на 20,7%. Сравнительно с «ХЗМ 8318» превышение значений показателей у пакета составляет 13,0% по разрывной нагрузке по утку, 36,6% по относительному удлинению по утку, 15,65 раза по удельной поверхности и 6,98 раза по объему пор. Рассматриваемый пакет обладает более высокими, чем «Биоформ» значениями разрывной нагрузки по основе на 14,4%, разрывной нагрузки по утку на 23,5%, относительного удлинения по утку на 59,9%, удельной поверхности в 5,48 раза и объема пор в 2,35 раза. Относительно «Форм» преимущество составляет 7,7% по разрывной нагрузке по основе, 34,2% по разрывной нагрузке по утку, 28,2% по относительному удлинению по утку, 9,34 раза по удельной поверхности и 3,31 раза по объему пор. В случае сопоставления с ХЗМ «Митрон» пакет демонстрирует лучшие значения разрывной нагрузки по утку на 7,6%,

относительного удлинения по утку на 18,7%, удельной поверхности в 23,29 раза и объема пор в 8,22 раза.

Если наиболее близким по строению пакета считать химзащитный материал ММС-Т, так как в его составе в отличие от других промышленных аналогов присутствует мембрана, то пакеты превосходят данный аналог:

- Пакет «Саржа – Каусорб – Порелле» по ВЗД от газовой смеси нефтепродуктов (9,21 раз), по разрывной нагрузке по основе (66,0%), по разрывной нагрузке по утку (53,4%), по относительному удлинению по утку (33,1%), по раздирающей нагрузке по утку (12,7%), по удельной поверхности в 5,95 раза, по объему пор в 3,67 раза и по паропроницаемости на 20,7 %.

- Пакет «Саржа – ФАС – МТ-1» по времени защитного действия от газовой смеси аммиака в 12,30 раза, по разрывной нагрузке по основе на 68,0%, по разрывной нагрузке по утку на 61,8%, по относительному удлинению по утку на 41,9%, по раздирающей нагрузке по утку на 10,1%, по удельной поверхности в 7,85 раза и по объему пор в 7,19 раза.

4.3 Экономическое обоснование внедрения в производство пакета материалов

Расчет экономического эффекта от внедрения пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоем в производство АО «КазХимНИИ» выполнен на основании разработанных в разделе 4.1 технологических рекомендаций. Расчет полной себестоимости проведен на месячный объем производства 12000 м. пог. пакета «Саржа-Каусорб-Порелле П600» с учетом норм расхода и стоимости ресурсов в пересчете на выработку 1 м. пог. продукции. Статьи затрат для калькуляции себестоимости приведены в таблицах 4.4-4.7.

Таблица 4.4 – Расчет потребности в материально-сырьевых ресурсах для изготовления пакета материалов

Материалы	Ед. изм.	Расход на 1 м. пог.	Расход общий	Цена без НДС, руб./ед.	Стоимость, руб.
Ткань «Саржа», 240 г/м ² (арт. ЦЦ35668)	м. пог.	1,000	12000	200,0	2400000
Термоклей «Рототерм»	кг	0,200	2400	833,3	1999920
Уголь «Каусорб»	кг	0,165	1980	450,0	891000
Мембрана «Порелле П600»	м. пог.	1,000	12000	130,0	1560000
Итого основные материалы	-	-	-	-	6850920
Вспомогательные материалы (бумага, гильзы)	-	-	-	-	60000

Потребность в топливно-энергетических ресурсах определена фактическим временем работы оборудования, задействованного в выпуске продукции. Для производства месячного объема 12000 м. пог. предусмотрена эксплуатация каландровой линии и узла УЗ сварки в течение 20 рабочих дней при восьмичасовой смене, что соответствует фонду рабочего времени оборудования 160 ч. Расчет потребности в топливно-энергетических ресурсах приведен в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Расчет потребности в топливно-энергетических ресурсах для изготовления пакета материалов

Статьи расходов	Ед. изм.	Фактическое время работы, ч	Расход общий	Цена с НДС, руб.
Энергопотребление каландра	кВт·ч	160	9744	53590
Энергопотребление узла УЗ-сварки	кВт·ч	160	8000	44000
Энергопотребление ИК-нагревателей	кВт·ч	160	720	3960
Техническая вода и сжатый воздух	–	160	–	43450
Итого	–	–	–	145000

Расходы на оплату труда определены, исходя из принятой на предприятии повременно-премиальной системы, с учетом фактически отработанного времени.

Основная заработная плата рассчитана по формуле (4.1):

$$P_{з/п} = T_{ч} \times \Phi_{о} + П, \quad (4.1)$$

где $P_{з/п}$ – основная заработная плата, руб.; $T_{ч}$ – часовая тарифная ставка, руб.; $\Phi_{о}$ – фактически отработанное время, ч; $П$ – сумма премии.

Часовую тарифную ставку определяли по формуле (4.2):

$$T_{\text{ч}} = 3n / 165, \quad (4.2)$$

где 3п – оклад, руб.; 165 – среднемесячное количество рабочих часов.

Расчет фонда оплаты труда приведен в таблице 4.6.

Калькуляция себестоимости производства пакета материалов приведена в таблице 4.7.

Таблица 4.6 – Расчет фонда оплаты труда для изготовления пакета материалов

Должность	Оклад, руб.	Численность, чел.	Премия, руб.	ЗП по тарифу, руб.
Аппаратчик каландра	52000	1	1664	53664
Оператор каландра	49000	1	1568	50568
Оператор линии УЗ-сварки	49000	1	1568	50568
Подсобный рабочий	42000	1	1344	43344
Итого основная ЗП произв. рабочих	—	4	—	192000
Дополнительная ЗП (8%)	—	—	—	15360
Отчисления во внебюджетные фонды (30%)	—	—	—	57600
Главный технолог (цеховой персонал)	50000	1	—	54000

Таблица 4.7 – Калькуляция себестоимости производства пакета материалов

№	Наименование статей затрат	Затраты всего, руб.	На ед. прод., руб.
1	Сырье и материалы	6850920	570,91
2	Вспомогательные материалы	60000	5,00
3	Энергия и топливо на технологические нужды	145000	12,08
4	Заработная плата производственных рабочих (осн. и доп.)	207360	17,28
5	Отчисления во внебюджетные фонды	57600	4,80
6	Расходы на подготовку и освоение производства	60000	5,00
7	Отчисления в ремонтный фонд	19200	1,60
8	Цеховые расходы	54000	4,50
	Цеховая себестоимость	7454080	621,17
9	Общезаводские расходы	745408	62,12
	Производственная себестоимость	8199488	683,29
	Оптовая цена (с прибылью 20%)	9839386	819,95
	Цена с НДС 22%	12004051	1000,34

Дополнительная заработная плата принята в размере 8% от основной, отчисления во внебюджетные фонды – 30% в соответствии с действующим законодательством, отчисления в ремонтный фонд – 10% от основной заработной

платы производственных рабочих, общезаводские расходы – 10% от цеховой себестоимости.

Согласно таблице 4.7 производственная себестоимость 1 м. пог. пакета материалов составляет 683,29 руб., оптовая цена – 819,95 руб., розничная цена с учетом НДС 22% – 1000,34 руб. Анализ экономической эффективности производства направлен на установление финансового потенциала внедряемой продукции и подтверждения ее практической значимости для производственной деятельности предприятия. Исходными данными служили режим работы предприятия (247 рабочих дней в году при пятидневной рабочей неделе и восьмичасовом рабочем дне), а также показатели себестоимости и отпускной цены, рассчитанные выше.

Годовой объем производства вычисляли по формуле (4.3):

$$V_{год} = V_{мес} \times 12 = 144\,000 \text{ м. пог.}, \quad (4.3)$$

Выручку от реализации за год определяли по формуле (4.4):

$$R = V_{год} \times 819,95 = 118\,072\,627 \text{ руб.}, \quad (4.4)$$

где 819,95 – рассчитанная выше оптовая цена за 1 м. пог., руб.

Полную себестоимость производства за год рассчитывали по формуле (4.5):

$$S = V_{год} \times 683,29 = 98\,393\,856 \text{ руб.}, \quad (4.5)$$

где 683,29 – определенная ранее себестоимость за 1 м. пог., руб.

Прибыль от реализации за год находили по формуле (4.6):

$$\Pi = R - S = 19\,678\,771 \text{ руб.} \quad (4.6)$$

Чистую прибыль за год определяли по формуле (4.7):

$$\mathcal{U} = \Pi - H = 15\,743\,017 \text{ руб.}, \quad (4.7)$$

где H составляет $0,25 \times \Pi$ (4919693 руб.) при налоге на прибыль 25%.

Рентабельность производства за год вычисляли по формуле (4.8):

$$P = \mathcal{U} / S \times 100\% = 15,0\% \quad (4.8)$$

Значения экономических показателей производства пакета материалов представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Значения экономических показателей производства пакета материалов

Наименование показателя	Значение
Производственная себестоимость 1 м. пог., руб.	683,29
Оптовая цена за 1 м. пог., руб.	819,95
Розничная цена за 1 м. пог. с НДС, руб.	1000,34
Годовой объем производства, м. пог.	144000
Выручка от реализации за год, руб.	118072627
Полная себестоимость за год, руб.	98393856
Прибыль от реализации за год, руб.	19678771
Чистая прибыль за год, руб.	14759078
Рентабельность, %	15,0

Таким образом, обоснована экономическая эффективность внедрения в производство пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоем по разработанным технологическим рекомендациям. Организация производства продукции на базе АО «КазХимНИИ» обеспечит формирование устойчивой операционной прибыли и повысит капитализацию предприятия. Согласно произведенным вычислениям, годовая чистая прибыль составит (округленно) 14,75 млн руб. при рентабельности производства 15%.

Достигнутый экономический результат подтверждает практическую целесообразность освоения выпуска разработанного пакета материалов, а выявленные защитные характеристики обеспечивают конкурентоспособность пакета в сегменте специальной одежды, препятствующей проникновению токсичных веществ и нефтепродуктов к кожным покровам индивида.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. По результатам теоретического анализа современного ассортимента химзащитных материалов, их состава и свойств и обосновано применение трёхслойной структуры пакета, включающей натуральный текстильный материал, угольный сорбционный слой и беспоровую гидрофильную ПУ мембрану. Такое сочетание обеспечивает совмещение несущей, сорбционной и барьерной функций при сохранении паропереноса.

2. Предложена и апробирована методика таксонометрической оптимизации для многокритериального ранжирования марок материалов для слоев пакета. По совокупности эксплуатационных свойств: в качестве текстильного слоя обоснован выбор ткани «Саржа»; среди сорбентов приоритетными являются угли «ФАС», для технологичности формирования пакета также выделен «Каусорб»; среди мембран лидируют «Порелле П600» и «МТ-1».

3. Экспериментально установлены составы пакетов целевого назначения: «Саржа - Каусорб - Порелле П600» для защиты от газовой смеси нефтепродуктов и «Саржа - ФАС - МТ-1» для защиты от аммиака. Первый пакет обеспечивает время защитного действия по газовой смеси нефти 10 ч, второй – время защитного действия по аммиаку 47,17 мин.

4. Установлен механизм защитного действия пакетов материалов от воздействия аммиака и нефтепродуктов, зависящий от природы воздействующего вещества, состава и структуры мембранно-сорбционного слоя. Для неполярных углеводородов нефтепродуктов определяющими являются барьерная функция плотной беспоровой мембраны и физическая адсорбция в углеродном сорбенте; для аммиака ведущую роль играют донорно-акцепторные и водородно-связанные взаимодействия с полярными группами ПУ мембраны и сорбционное удержание на углеродной поверхности.

5. Разработана технологическая схема получения пакетов материалов в опытно-промышленных условиях. Технологический процесс включает участки: каландрирования для формирования сорбционного слоя на текстильной основе с

применением термокля; точечной УЗ-сварки для последующего соединения пакета с мембраной. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения разработанной технологии 14759078 руб., рентабельность производства 15 %.

6. Получены опытные образцы пакетов материалов с улучшенными эксплуатационными, в том числе защитными, свойствами. Установлены преимущества разработанных пакетов над промышленными аналогами:

- Пакет «Саржа – Каусорб – Порелле» имеет поверхностную плотность 520 г/м², удельную поверхность 397,98 м²/г, объем пор 0,2277 см³/г, размер пор 3,74 нм и паропроницаемость 26,15 г/(м²·ч). По сравнению с ММС-Т он демонстрирует преимущества по ВЗД от газовой смеси нефти в 9,21 раза, по разрывной нагрузке по основе на 66,0%, по разрывной нагрузке по утку на 53,4%, по относительному удлинению по утку на 33,1%, по раздирающей нагрузке по утку на 12,7%, по удельной поверхности в 5,95 раза, по объему пор в 3,67 раза и по паропроницаемости на 20,7%.

- Пакет «Саржа – ФАС – МТ-1» имеет поверхностную плотность 504 г/м², удельную поверхность 525,75 м²/г, объем пор 0,4464 см³/г, размер пор 3,71 нм и паропроницаемость 12,39 г/(м²·ч). Он превосходит промышленный аналог ММС-Т по времени защитного действия от газовой смеси аммиака в 12,30 раза, разрывной нагрузке по основе на 68,0%, разрывной нагрузке по утку на 61,8 %, относительному удлинению по утку на 41,9%, раздирающей нагрузке по утку на 10,1 %, удельной поверхности в 7,85 раза и объему пор в 7,19 раза.

Результаты исследований, полученные в ходе выполнения данной работы, могут быть применены в дальнейшем при создании новых мембранно-сорбционных текстильных материалов и технологий их получения для производства защитной одежды фильтрующего типа, устойчивой к воздействию вредных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарафиев, А. Р. Материалы для защитной одежды при возгораниях на предприятиях химического комплекса / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова // Современные пожаробезопасные материалы и технологии : Сборник материалов VII международной научно-практической конференции, Иваново, 17 октября 2024 года. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы МЧС РФ, 2024. – С. 63-67. – EDN BRDQMD.
2. Утекло, утонуло, взорвалось: самые крупные техногенные катастрофы в истории России и СССР [Электронный ресурс]. – URL: <https://kubinform.ru/news/uteklo-utonulo-vzorvalos-samye-krupnye-tekhnogennye-katastrofy-v-istorii-rossii-i-sssr/> (дата обращения: 18.06.2025).
3. Три человека погибли из-за выброса хлора на титановом заводе «Ависма» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.forbes.ru/news/207881-tri-cheloveka-pogibli-iz-za-vybrosa-hlora-na-titanovom-zavode-avisma> (дата обращения: 18.06.2025).
4. Загрязнение нефти в трубопроводе «Дружба» [Электронный ресурс]. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Загрязнение_нефти_в_трубопроводе_«Дружба»_\(2019\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Загрязнение_нефти_в_трубопроводе_«Дружба»_(2019)) (дата обращения: 18.06.2025).
5. Разлив дизельного топлива в Норильске [Электронный ресурс]. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Разлив_дизельного_топлива_в_Норильске (дата обращения: 18.06.2025).
6. Авария с выбросом аммиака произошла на череповецком предприятии [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.vologda.kp.ru/daily/28349/4496287/> (дата обращения: 18.06.2025).
7. На Новошахтинском заводе нефтепродуктов произошел пожар после атаки БПЛА [Электронный ресурс]. – URL: <https://neftegaz.ru/news/incidental/837336-na-novoshakhtinskom-zavode-nefteproduktov-proizoshel-pozhar-posle-ataki-bpla/> (дата обращения: 18.06.2025).

8. В Керченском проливе после крушения танкеров с пляжей убрали более 20 тыс. тонн загрязненного грунта [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.interfax.ru/russia/1000617> (дата обращения: 18.06.2025).

9. Открытое горение ликвидировано на Афипском НПЗ [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.interfax.ru/russia/1060570> (дата обращения: 18.06.2025).

10. Что известно об атаке беспилотников на Туапсе [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rbc.ru/politics/25/01/2024/65b1f3979a7947c4871bceba> (дата обращения: 18.06.2025).

11. Беспилотники атаковали предприятия в Елабуге и Нижнекамске [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rbc.ru/politics/02/04/2024/660ba4e29a7947430f5b76cf> (дата обращения: 18.06.2025).

12. Аварии на НПЗ и других объектах ТЭК РФ в 2025-2026гг // The Moscow Times : интернет-газета. – 2026. – 29 июня [Электронный ресурс]. – URL: <https://ru.themoscowtimes.com/2026/06/29/factbox-avarii-na-npz-i-drugikh-obektakh-tek-rf-v-2025-2026gg-a199454> (дата обращения: 31.08.2026).

13. Крупнейшие НПЗ "Лукойла" приостановили работу из-за атак дронов // DW : новостной портал. – 2026. – 27 августа [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.dw.com/ru/vse-krupnejsie-npz-lukoijla-priostanovili-rabotu-izza-udarov-vsu/a-78518029> (дата обращения: 31.08.2026).

14. Ионова, М. Р. Специальная одежда для монтажников слаботочных систем связи: обзор современного ассортимента / М. Р. Ионова, А. А. Азанова, Р. А. Нуртдинова // Фундаментальные и прикладные проблемы создания материалов и аспекты технологий текстильной и легкой промышленности : Сборник статей Всероссийская научно-техническая конференция, Казань, 14–15 ноября 2019 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2019. – С. 485-490. – EDN EQGVEY.

15. Ищенко, А. Д. Особенности организации оперативно-тактических действий при локализации чрезвычайных ситуаций на химически опасных объектах с использованием специальной защитной одежды изолирующего типа /

А. Д. Ищенко, Е. С. Михайлов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2018. – № 1(36). – С. 43-48. – EDN YVTUPH.

16. Каюмова, Р. Ф. Исследование эргономических и эксплуатационных свойств специальной одежды для нефтяников / Р. Ф. Каюмова, О. Н. Будеева // Дизайн и технологии. – 2018. – № 68(110). – С. 23-28. – EDN YRBDMH.

17. Лебедева, И. В. Проблемы и тенденции производства специальной одежды в России / И. В. Лебедева, О. В. Ревякина // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2015. – № 2-1. – С. 92-95. – EDN TKNZRP.

18. Лебедева, Е. О. Анализ ассортимента специальной теплозащитной одежды для работников нефтегазового производства / Е. О. Лебедева, С. Ю. Матузова, Е. В. Юдина // В мире научных открытий. – 2014. – № 6(54). – С. 122-133. – EDN SETSWN.

19. Солодушенкова, Т. С. Новые технологии в ООО «ИГНИС» / Т. С. Солодушенкова, О. И. Берг, С. Н. Вахитова // Традиции и инновационные процессы в креативных индустриях : Сборник научных статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции, Уфа, 22 мая 2025 года. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2025. – С. 106-107. – EDN XZZDER.

20. Анализ ассортимента специальной одежды и основных материалов, применяемых при ее изготовлении / С. Ш. Ташпулатов, Х. А. Махмудов, Г. Т. Максытова [и др.] // Universum: технические науки. – 2023. – № 3-3(108). – С. 5-12. – EDN EUYZXT.

21. Фомченкова, Л. Современная рабочая специальная одежда на отечественном рынке СИЗ / Л. Фомченкова // Охрана и экономика труда. – 2018. – № 1(30). – С. 110-118. – EDN YATWUX.

22. Фролов, С. В. Материалы для производства СИЗ для защиты от термического воздействия электрической дуги / С. В. Фролов, А. В. Курденкова, Я. И. Буланов // Сборник научных трудов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 110-летию со дня рождения проф. Ф.Х. Садыковой : Сборник научных трудов конференции, Москва, 12 октября 2023

года. – Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2023. – С. 360-362. – EDN LPUOZW.

23. Хамматова, Э. А. Повышение эксплуатационных свойств готовых изделий одежды специального назначения на основе применения модифицированных текстильных материалов / Э. А. Хамматова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 5(389). – С. 74-79. – EDN NFBBJB.

24. Чориева, М. М. Нефть - газ казиб чиқариш ходимлари учун махсус кийимларга талабларни шакллантириш / М. М. Чориева // , 17 ноября 2023 года. Часть 2, 2024. – Р. 86-88. – EDN GQIEGC.

25. Ивашко, Е. И. К вопросу о выборе материалов в пакет водозащитной специальной одежды / Е. И. Ивашко, А. Н. Буркин // Союз науки и практики: актуальные проблемы и перспективы развития товароведения : Сборник научных статей международной научно-практической конференции, Гомель, 09–10 ноября 2021 года / Редколлегия: С.Н. Лебедева [и др.]. Под научной редакцией В.Е. Сыцко, Е.В. Рощиной. – Гомель: Белорусский торгово-экономический университет потребительской кооперации, 2021. – С. 68-71. – EDN BQUHWY.

26. Новые возможности программного обеспечения по выбору пакета материалов для формирования комфортных условий военнослужащим Арктики / А. А. Благородов, А. В. Копылова, Д. О. Бордух [и др.] // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2019. – № 4-1(48). – С. 56-82. – EDN JCRMDW.

27. Ковалева, А. А. Разработка структуры и тестирование динамического эффекта формы пакетов материалов для теплозащитной одежды / А. А. Ковалева, И. В. Черунова, Ф. Д. Тагиев // Костюмология. – 2024. – Т. 9, № 2. – EDN GAMJH.

28. Сорокин, Д. В. Исследование влияния эксплуатационных факторов на показатели теплозащиты пакета материалов боевой одежды пожарного / Д. В. Сорокин, А. Л. Никифоров // Технологии и качество. – 2021. – № 4(54). – С. 16-21. – DOI 10.34216/2587-6147-2021-4-54-16-21. – EDN IIXTGQ.

29. Михайлов, Е. С. Влияние температурно-влажностного режима внутреннего пространства термоагрессивостойких костюмов на их теплозащитные свойства / Е. С. Михайлов, В. И. Логинов // Пожарная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 56-62. – EDN RZFIUT.

30. Ивашко, Е. И. Комплексная оценка свойств влагозащитных материалов для специальной одежды / Е. И. Ивашко // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2024. – № 2(48). – С. 28-37. – DOI 10.24412/2079-7958-2024-2-28-37. – EDN JIMUIS.

31. Панкевич, Д. К. Рекомендации по области применения и исследованию свойств водозащитных многофункциональных текстильных материалов для одежды / Д. К. Панкевич // Костюмология. – 2024. – Т. 9, № 4. – EDN PUSMNT.

32. Полимерные материалы в производстве костюма для военнослужащих Арктики (сообщение 4) / Р. Ф. Афанасьева, Н. В. Тихонова, А. Б. Михайлов [и др.] // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 11. – С. 114-118. – EDN VZSCPD.

33. Морозова, И. И. Проектирование теплозащитного костюма для специалистов нефтегазовой отрасли с применением современных материалов / И. И. Морозова, Н. В. Тихонова, Л. Ю. Махоткина // Фундаментальные и прикладные проблемы создания материалов и аспекты технологий текстильной и легкой промышленности : Сборник статей Всероссийская научно-техническая конференция, Казань, 14–15 ноября 2019 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2019. – С. 390-398. – EDN EWTDVO.

34. Разработка новых пакетов материалов для боевой одежды пожарного / Е. А. Рубаненко, Р. О. Жилисбаева, А. Д. Құрманғали, Л. К. Шильдебаева // Механика и технологии. – 2025. – № 1(87). – С. 436-445. – DOI 10.55956/PVGD3113. – EDN SQEXHS.

35. Хисамиева, Л. Г. Проектирование специальной одежды для бетонщиков с использованием полимерных материалов / Л. Г. Хисамиева, С. О.

Косолапова, Р. С. Барсукова // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 20. – С. 87-89. – EDN SYAGZB.

36. Специальная защитная одежда пожарных / В. М. Медгаус, О. В. Папазова, Н. Н. Попов, А. А. Клычков // Научный вестник НИИГД Респиратор. – 2017. – № 3(54). – С. 74-82. – EDN YZIPAR.

37. Отунчиева, А. К. Исследование получения многослойных композиционных материалов для специального назначения / А. К. Отунчиева // Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова. – 2016. – № 3-2(39). – С. 175-179. – EDN XCBYZT.

38. Герасимук, И. Н. Исследование показателей качества клеевого соединения слоев материалов в пакет / И. Н. Герасимук, Е. Л. Лукьянова, Н. В. Ульянова // Материалы и технологии. – 2022. – № 1(9). – С. 19-23. – DOI 10.24412/2617-149X-2022-1-19-23. – EDN FAZFHC.

39. Защитные и конструктивные требования к комплекту индивидуальной защиты КИЗ-Т / Я. А. Романенко, О. Д. Навроцкий, Ю. А. Куделевич, Е. В. Мацкевич // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2016. – № 2(40). – С. 87-95. – EDN YUIZNJ.

40. Зуфарова, З. У. Особенности формирования компонентов пакета для изделий специального назначения / З. У. Зуфарова, С. Ш. Ташпулатов, И. В. Черунова // Проблемы текстильной отрасли и пути их решения : Сборник научных трудов Всероссийского круглого стола с международным участием, Москва, 22 декабря 2020 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2021. – С. 86-89. – EDN IHGZSD.

41. Патент на полезную модель № 179336 U1 Российская Федерация, МПК А62В 17/00. Пакет материалов специальной защитной одежды : № 2017116328 : заявл. 10.05.2017 : опубл. 08.05.2018 / Е. Л. Смирнова, А. В. Лукашевский, А. В. Шемаков. – EDN KFJWDQ.

42. Разработка «умной» куртки для работников нефтегазовой отрасли / З. Р. Григорьева, О. Н. Будеева, А. К. Гайсина [и др.] // Костюмология. – 2025. – Т. 10, № 2. – EDN NORHOP.
43. Тарасова, О. В. Современные текстильные материалы и технологии в экипировке военнослужащих / О. В. Тарасова // Научный вестник Вольского военного института материального обеспечения: военно-научный журнал. – 2023. – № 4(68). – С. 37-42. – EDN DRLQFK.
44. Шумай, С. М. Подбор и оценка свойств пакета материалов для боевой одежды пожарного / С. М. Шумай, А. С. Лукьянов, С. П. Асташов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2020. – № 1(47). – С. 150-171. – EDN RNPHDR.
45. Шестов, А. В. Технология получения кож для специальных защитных изделий, устойчивых к воздействию агрессивных сред / А. В. Шестов // Национальная Ассоциация Ученых. – 2022. – № 77. – С. 54-58. – DOI 10.31618/nas.2413-5291.2022.1.77.577. – EDN FUFUU.
46. Морозова, И. И. Разработка пакета материалов с сорбционно-фильтрующим слоем для защитной одежды фильтрующего типа / И. И. Морозова, Н. В. Тихонова // Костюмология. – 2022. – Т. 7, № 1. – EDN LYPJIE.
47. Исследование пожарной опасности тканей специального назначения / Н. А. Курылев, А. Х. Салихова, О. Г. Циркина, С. А. Сырбу // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2022. – № 1. – С. 227-230. – DOI 10.47367/2413-6514_2022_1_227. – EDN BKNOIF.
48. Петухов, А. Н. Влияние интенсивности теплового потока на изменение структуры и свойств тканей для специальной защитной одежды от воздействия повышенных температур / А. Н. Петухов, А. Ф. Давыдов // Дизайн и технологии. – 2021. – № 81(123). – С. 30-36. – EDN DLRQUO.
49. Шустов, Ю. С. Исследование свойств текстильных материалов для защиты от термического воздействия электрической дуги / Ю. С. Шустов, Ж. С.

Пушкина // Промышленные процессы и технологии. – 2023. – Т. 3, № 2. – С. 43-50. – DOI 10.37816/2713-0789-2023-3-2(9)-43-50. – EDN QOWTLS.

50. Гайнутдинов, Р. Ф. Наноструктурирование полульняной парусиновой ткани для повышения качества спецодежды / Р. Ф. Гайнутдинов, В. В. Хамматова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 5(401). – С. 71-77. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_5_71. – EDN BYRHDT.

51. Хамматова, Э. А. Повышение стойкости к морской воде наноструктурированных тканей для защитной спецодежды / Э. А. Хамматова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 4(400). – С. 76-82. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_4_76. – EDN UBTEMK.

52. Махоткина, Л. Ю. Влияние обработки поверхности текстильного материала водным раствором на основе силана на гигроскопичность материала / Л. Ю. Махоткина, Г. Г. Лутфуллина, А. А. Халилова // Юность и знания - гарантия успеха -2019 : сборник научных трудов 6-й Международной молодежной научной конференции, Курск, 18–19 сентября 2019 года. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 273-276. – EDN XTACQV.

53. Хамматова, В. В. Повышение стойкости материалов к агрессивным средам, применяемых для спецодежды / В. В. Хамматова, К. Э. Разумеев // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 7. – С. 88-90. – EDN YKJXUX.

54. Хамматова, Э. А. Определение уровня качества образцов наноструктурированных тканей для специальной одежды по показателям надежности после экспериментальных носок и стирок / Э. А. Хамматова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2024. – № 2(410). – С. 100-107. – DOI 10.47367/0021-3497_2024_2_100. – EDN PYOEJP.

55. Гаврикова, Е. И. Разработка мероприятий, улучшающих условия и охрану труда работников агропромышленного комплекса / Е. И. Гаврикова //

Безопасность в техносфере. – 2014. – Т. 3, № 2. – С. 48-51. – DOI 10.12737/3671. – EDN SCLJGD.

56. Давыдов, А. Ф. Определение производственного риска с целью повышения и изменения показателей безопасности тканей для средств индивидуальной защиты / А. Ф. Давыдов, Г. А. Ходанов // Дизайн и технологии. – 2022. – № 88(130). – С. 72-79. – EDN SBFGHS.

57. Гарафиев, А. Р. Текстильные материалы с защитными свойствами от воздействия токсичных веществ / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова // Легкая промышленность: проблемы и перспективы : Материалы Всероссийской научно-практической конференции, Омск, 27–28 ноября 2024 года. – Омск: Омский государственный технический университет, 2024. – С. 81-87. – EDN KXDNOI.

58. Гарафиев, А. Р. Перспективы применения угольных сорбентов в составе материалов защитной одежды / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова // Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий (Материаловедение-2025) : Материалы III Всероссийской конференции с международным участием, Казань, 27–28 марта 2025 года. – Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2025. – С. 125-128. – EDN ZMWZIS.

59. Современные направления создания новых защитных материалов и тканей для средств индивидуальной и коллективной защиты от токсичных химикатов и клеток патогенов / В. В. Завьялов, С. В. Кужелко, Н. В. Завьялова [и др.] // Вестник войск РХБзащиты. – 2019. – Т. 3, № 3. – С. 217-254. – DOI 10.35825/2587-5728-2019-3-3-217-254. – EDN DEOJVF.

60. Фасхутдинова, А. Ф. Разработка защитной одежды фильтрующего типа / А. Ф. Фасхутдинова, И. И. Морозова, Н. В. Тихонова // 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 / Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство). Том Часть 1. – Москва: Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2022. – С. 310-314. – EDN UNTNLV.

61. Тарасов, Л. А. Технические характеристики современных средств индивидуальной защиты кожи от негативных воздействий поражающих факторов различной природы / Л. А. Тарасов, А. А. Сухова, Е. А. Штукина // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. – 2020. – № 3. – С. 76-86. – DOI 10.25016/2541-7487-2020-0-3-76-86. – EDN TOFBZI.

62. Mondloch, J. E. Destruction of chemical warfare agents using metal–organic frameworks / J. E. Mondloch, M. J. Katz, W. C. Isley III [et al.] // Nature Materials. – 2015. – V. 14. – P. 512-516.

63. Liang, H. Fast and sustained degradation of chemical warfare agent simulants using flexible self-supported metal-organic framework filters / H. Liang, A. Yao, X. Jiao [et al.] // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2018. – V. 10, № 24. – P. 20396-20403.

64. Liu, Y. Selective photooxidation of a mustard-gas simulant catalysed by a porphyrinic metal–organic framework / Y. Liu, A. J. Howarth, J. T. Hupp, O. K. Farha // Angew. Chem. Int. Ed. – 2015. – V. 54, № 31. – P. 9001-9005. – DOI 10.1002/anie.201503741.

65. Øien-Ødegaard, S. Preparation, structure and reactivity of functionalized zirconium metal-organic frameworks : Dissert. Ph.D. / S. Øien-Ødegaard. – Oslo, Norway, 2016. – DOI 10.1055/s-0034-1381039.

66. Gil-San-Millan, R. Chemical warfare agents detoxification properties of zirconium metal–organic frameworks by synergistic incorporation of nucleophilic and basic sites / R. Gil-San-Millan, E. López-Maya, M. Hall [et al.] // ACS Appl. Mater. Interfaces. – 2017. – V. 9, № 28. – P. 23967-23973.

67. Stassen, I. Towards metal–organic framework based field effect chemical sensors: UiO-66-NH₂ for nerve agent detection / I. Stassen, B. Bueken, H. Reinsch [et al.] // Chem. Sci. – 2016. – V. 7, № 9. – P. 5827-5832. – DOI 10.1039/C6SC00987E.

68. Silva, P. A multifunctional metal–organic frameworks: from academia to industrial applications / P. Silva, S. M. F. Vilela, J. P. C. Tome, F. A. Paz // *Chem. Soc. Rev.* – 2015. – V. 44. – P. 6774-6803.
69. Tomar, S. Nanotechnology: the emerging field for future military applications / S. Tomar // *IDSA Monograph Series.* – 2015. – № 48.
70. Bhuiyan, M. A. R. Advances and applications of chemical protective clothing system / M. A. R. Bhuiyan, L. Wang, A. Shaid [et al.] // *J. Industrial Textiles.* – 2019. – V. 49, № 1. – P. 97-138. – DOI 10.1177/1528083718779426.
71. Vemuri, R. S. An overview of detection and neutralization of chemical warfare agents using metal organic frameworks / R. S. Vemuri, P. D. Armatis, J. R. Bontha [et al.] // *J. Bioterror Biodef.* – 2015. – V. 6, № 3. – DOI 10.4172/2157-2526.1000137.
72. Разработка технологии получения сорбционно-фильтрующего материала с высокими защитными свойствами / И. И. Морозова, Н. В. Тихонова, Ю. А. Тимошина, Э. Ф. Вознесенский // *Костюмология.* – 2021. – Т. 6, № 4. – EDN PCLILZ.
73. Новые перспективы в создании материалов для защитной одежды на базе достижений инновационных технологий / Р. Х. Фатхутдинов, В. В. Гайдай, О. Ю. Миронова, А. Н. Ковальчук // *Бутлеровские сообщения.* – 2007. – Т. 11, № 3. – С. 10-38. – EDN KXSVLB.
74. Панкевич, Д. К. Ассортимент и свойства мембранных материалов, используемых в производстве одежды для активного отдыха и спорта / Д. К. Панкевич // *Качество товаров: теория и практика : Материалы докладов Международной научно-практической конференции, Витебск, 15–16 ноября 2012 года.* – Витебск: Витебский государственный технологический университет, 2012. – С. 204-206. – EDN YJGRVM.
75. Панкевич, Д. К. Влияние структуры и свойств мембран на водопаропроницаемость содержащих их материалов / Д. К. Панкевич, Е. И. Ивашко // *Вестник Витебского государственного технологического университета.*

– 2022. – № 1(42). – С. 68-79. – DOI 10.24412/2079-7958-2022-1-68-79. – EDN XHVNCL.

76. Чиклеев, И. А. Исследование изменения краевого угла смачивания полиуретановой мембраны, обработанной потоком низкоэнергетических ионов / И. А. Чиклеев, И. Ф. Сайфутдинова, А. А. Азанова // Всероссийская научная конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Б.А. Бузова : Сборник научных трудов, Москва, 11 декабря 2024 года. – Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2025. – С. 105-108. – EDN MQFNFM.

77. Панкевич, Д. К. Водонепроницаемость материалов с полиуретановой мембраной в различных температурно-влажностных условиях многоциклового нагружения / Д. К. Панкевич, М. Л. Кукушкин // Дизайн, технологии и инновации в текстильной и легкой промышленности (ИННОВАЦИИ-2018) : Сборник материалов Международной научно-технической конференции, Москва, 14–15 ноября 2018 года. Том Часть 1. – Москва: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2018. – С. 54-57. – EDN GCNVIEW.

78. Панкевич, Д. К. Анализ структуры и эксплуатационных свойств мембранных материалов для водонепроницаемой одежды / Д. К. Панкевич, Ю. В. Харापудько, В. Г. Кудрицкий // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2022. – № 3(399). – С. 101-109. – DOI 10.47367/0021-3497_2022_3_101. – EDN JLQFEB.

79. Исследование свойств инновационных материалов для проектирования теплозащитной одежды / Л. Ю. Махоткина, Е. В. Леонова, А. В. Макаров, А. Н. Марьина // Вестник Технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 4. – С. 66-68. – EDN XYEENV.

80. Самарская, Н. Н. Ассортимент и технологические свойства современных мембранных материалов / Н. Н. Самарская, М. В. Самойлова //

Инженерно-педагогический вестник: легкая промышленность. – 2018. – № 4(7). – С. 65-71. – EDN VVUBUG.

81. Самохина, М. А. Как выбрать мембранную куртку и защитить страну от конкурентов / М. А. Самохина, А. В. Корнилович // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2025. – № 1. – С. 281-286. – EDN LNQMPP.

82. Патент № 2693832 С1 Российская Федерация, МПК А61L 15/18, В82В 1/00, А61F 13/02. Текстильный нетканый многослойный электропрядный материал с повышенными износостойкостью и стойкостью к воздействию моющих средств и способ его получения : № 2018134980 : заявл. 04.10.2018 : опубл. 05.07.2019 / М. В. Антипов, М. Г. Болотин, К. В. Запис [и др.] ; заявитель Закрытое акционерное общество "МОСТ". – EDN WHFHBO.

83. Бешапошникова, В. И. Исследование влияния низких температур на структуру и свойства мембранных тканей для одежды / В. И. Бешапошникова, Н. А. Климова, Н. Е. Ковалева // Theoretical & Applied Science. – 2018. – № 11(67). – С. 54-61. – DOI 10.15863/TAS.2018.11.67.10. – EDN VOLNBX.

84. Федорова, Н. Е. Лабораторные испытания мембранных тканей и их ассортимент на отечественном рынке / Н. Е. Федорова, Ю. Н. Шиловская // V Международный Косыгинский Форум : Сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Современные инженерные проблемы ключевых отраслей экономики», Москва, 15–16 октября 2025 года. Том 2. – Москва: Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2025. – С. 84-88. – EDN FAOJGR.

85. Сайфутдинова, И. Ф. Получение химзащитного мембранного материала способом формования из раствора / И. Ф. Сайфутдинова // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2026. – № 2(422). – С. 215-221. – DOI 10.47367/0021-3497_2026_2_215. – EDN RSFRCN.

86. Федотов, И. О. Анализ ассортимента мембранных тканей специального назначения / И. О. Федотов, С. В. Плеханова // Инновационное развитие легкой и текстильной промышленности (ИНТЕКС-2016) : сборник

материалов Всероссийской научной студенческой конференции. Том Часть 1 : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный университет дизайна и технологии", 2016. – С. 90-93. – EDN YFKFIR.

87. Шиловская, Ю. Н. ассортимент мембранных изделий / Ю. Н. Шиловская, Н. Е. Федорова // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности : Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, Москва, 17 апреля 2025 года. Часть 2. – Москва: Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2025. – С. 189-192. – EDN TMZSTD.

88. Исследование характеристик структуры и свойств мембранных материалов для химзащитной спецодежды / Е. А. Логинова, И. В. Степанова, А. В. Смирнова [и др.] // 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: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)", 2022. – С. 76-81. – EDN BVPWBZ.

89. Дементьева, К. А. Проектирование систем «костюм-окружающая среда» с учетом тектоники мембранных материалов гк «Меркурий» / К. А. Дементьева, А. В. Корнилович, А. Н. Малинская // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX). – 2024. – № 1. – С. 95-98. – EDN RQFTQT.

90. Ковицына, Ю. В. Характеристика современных мембранных материалов, используемых в производстве одежды для эксплуатации в условиях пониженных температур / Ю. В. Ковицына, Е. В. Бызова // Дизайн. Материалы. Технология. – 2017. – № 1(45). – С. 68-70. – EDN YHSXTD.

91. Бондаренко, Л. И. Обеспечение комплекса защитных свойств соединений спецодежды / Л. И. Бондаренко, О. В. Метелева // Известия высших

учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2020. – № 1(385). – С. 184-188. – EDN ZVEFWM.

92. Функциональные материалы со свойством управления потоками влаги для одежды спортивного и специального назначения / А. В. Абрамов, В. В. Кургузов, Н. Н. Уткин, М. В. Родичева // Технологии и качество. – 2024. – № 2(64). – С. 5-12. – DOI 10.34216/2587-6147-2024-2-64-5-12. – EDN BTQBCE.

93. Емельяненко, А. М. Супергидрофобные материалы и покрытия: от фундаментальных исследований до практических приложений / А. М. Емельяненко // Коллоидный журнал. – 2022. – Т. 84, № 4. – С. 375-379. – DOI 10.31857/S0023291222040036. – EDN OFLEGW.

94. Механизм ВЧЕ - плазменной модификации полиуретановых мембранных покрытий в среде воздуха / О. В. Вишневская, Э. Ф. Вознесенский, Р. Г. Ибрагимов [и др.] // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. – 2019. – Т. 1, № 10. – С. 87-90. – EDN WFBVYI.

95. Самикова, З. Д. Роль и значение нетканых материалов в современной швейной промышленности / З. Д. Самикова // Проблемы современной науки и образования. – 2025. – № 5(204). – С. 117-122. – DOI 10.24411/2304-2338-2025-10505. – EDN SQIERG.

96. Современные технологии производства нетканых материалов / И. Ш. Абдуллин [и др.] // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 19. – С. 114-119.

97. Федорова, Н. Е. Использование нетканых материалов для производства одежды / Н. Е. Федорова, Ю. Е. Копытова // Сборник научных трудов Международной научной конференции, посвященной 110-летию со дня рождения профессора А.Г. Севостьянова. – 2020. – С. 71-73.

98. Патент № 2399349 С1 Российская Федерация. Барьерно-защитная одежда из нетканых материалов / Р. И. Сизова, О. В. Сизова. – Оpubл. 20.09.2010.

99. Кулаженко, Е. Л. Нанесение клея валичным способом на поверхность рулонных материалов / Е. Л. Кулаженко, В. И. Ольшанский // Технико-технологические проблемы сервиса. – 2011. – № 4(18). – С. 41-44.

100. Зими́на, Е. Л. Технологические и теоретические основы получения материалов с использованием текстильных отходов : монография / Е. Л. Зими́на, А. Г. Коган, В. И. Олышанский ; УО «ВГТУ». – Витебск, 2019. – 230 с.

101. Зими́на, Е. Л. Разработка технологии шумоизоляционных материалов с использованием отходов / Е. Л. Зими́на, Н. В. Ульянова, О. Д. Ващенко // Химические волокна. – 2020. – № 5. – С. 43-45.

102. Патент № 2573817 С2 Российская Федерация, МПК D04H 1/42. Нетканый материал, ламинированный материал, изделие из нетканого материала, многокомпонентное волокно, холст и способ изготовления нетканого материала : № 2013122883/12 : заявл. 19.10.2011 : опубл. 27.01.2016 / Д. Д. Ньюкирк, Ю. Ф. Рудольф, Х. Хартль ; заявитель Фитеза Джермани ГмбХ. – EDN IUCWRK.

103. Аниськов, В. И. Разработка метода получения функциональных текстильных материалов для защитной одежды, обладающих стойкостью к термическим воздействиям и агрессивным средам / В. И. Аниськов, Ю. С. Шатилов // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2024. – № 2(56). – С. 149-158. – DOI 10.54422/1994-439X.2024.2-56.149-158. – EDN OFNAWK.

104. Сухова, А. А. Анализ современных изолирующих материалов и средств индивидуальной защиты кожи на их основе / А. А. Сухова // Вестник Технологического университета. – 2016. – Т. 19. – № 15. – С. 128-130.

105. Способ получения многослойного изолирующего материала с широким спектром защитных свойств : пат. 2521053, Российская Федерация, МПК B32B 25/10, A62B 17/00 / Л. А. Тарасов, Р. Х. Фатхутдинов, В. В. Уваев [и др.] ; заявитель ОАО «Казанский химический научно-исследовательский институт». – № 2012128292/05 ; заявл. 04.07.2012 ; опубл. 27.06.2014.

106. Федорова, П. К. Анализ применения технологии ультразвуковой сварки в легкой промышленности / П. К. Федорова, А. Н. Максименко // Инновации и технологии к развитию теории современной моды "Мода (материалы. Одежда. дизайн. аксессуары)", посвященная Федору Максимовичу Пармону : Сборник материалов IV Международной научно-практической

конференции, Москва, 08–10 апреля 2024 года. – Москва: Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство), 2024. – С. 69-71. – EDN NRBFRL.

107. Волков, С. С. Технологические особенности ультразвуковой сварки композиционных материалов на полимерной основе / С. С. Волков, М. А. Прилуцкий // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2016. – № 3(672). – С. 39-48. – EDN TKIAR.

108. Волков, С. С. Технология и оборудование для ультразвуковой сварки полимерных композиционных материалов / С. С. Волков, Г. А. Бигус, А. Л. Ремизов // Пластические массы. – 2018. – № 5-6. – С. 50-55. – EDN XSCVHF.

109. Патент № 2840565 С1 Российская Федерация, МПК В29С 65/08. Способ ультразвуковой термоконтальной обработки тканевого полотна : заявл. 13.05.2024 : опубл. 26.05.2025 / С. В. Слепухов. – EDN GYKQNP.

110. Ткань Саржа-240 [Электронный ресурс]. URL: https://balttex.ru/catalog/tkan_sarzha_240/ (дата обращения: 12.12.2025).

111. Брезент ОП арт. 11135 [Электронный ресурс]. URL: <https://ivtkani.ru/magazin/product/brezent-op-art-11135> (дата обращения: 12.12.2025).

112. Хлопчатобумажные ткани для спецодежды. ООО «Ивановский меланжевый комбинат» [Электронный ресурс]. URL: <https://ivmelang.ru/product/tkani-dlya-spetsodezhdy/khlopchatobumazhnye/> (дата обращения: 13.12.2025).

113. АО «КазХимНИИ». Патентование, стандартизация и разработка средств индивидуальной защиты [Электронный ресурс]. URL: <https://xn--80aodaahri3e.xn--p1ai/patent> (дата обращения: 13.12.2025).

114. Сорбционно-активные угленаполненные материалы. ООО НПФ «Фабитекс» [Электронный ресурс]. URL: <https://fabitex.ru/sorbcionno-aktivnye-uglenapolnennye-materialy> (дата обращения: 14.12.2025).

115. Химзащитный материал «Митрон». ООО НПФ «Фабитекс» [Электронный ресурс]. URL: <https://fabitex.ru/himzashchitnyy-material-mitron> (дата обращения: 14.12.2025).

116. Активированные угли. АО «Сорбент» [Электронный ресурс]. URL: <https://carbonrus.com/coals/aktivirovannye-ugli/> (дата обращения: 15.12.2025).
117. АО «ЭНПО «Неорганика» [Электронный ресурс]. URL: <https://neorganika.ru/> (дата обращения: 15.12.2025).
118. ООО «Полимер Корп». Контакты [Электронный ресурс]. URL: <https://polietileny.ru/kontakty/> (дата обращения: 16.12.2025).
119. Пленка с клеевым слоем. Данафлекс Group [Электронный ресурс]. URL: <https://Данафлекс-group.com/ru/products/industrial%20films> (дата обращения: 16.12.2025).
120. Мембраны Mercurytex для производства тканей [Электронный ресурс]. URL: <https://mercury-tex.ru/membrany> (дата обращения: 17.12.2025).
121. МТ1. Мембрана для одежды повседневной и дождевиков. ООО «Мембранные технологии» [Электронный ресурс]. URL: <https://mt37.nt-rt.ru/price/product/2417219> (дата обращения: 17.12.2025).
122. Измеритель прочности гранул ИПГ-1М [Электронный ресурс]. URL: <https://www.unichim.ru/him-pribory/izmeritel-prochnosti-granul-ipg-1m/> (дата обращения: 27.12.2025).
123. ГОСТ 21153.5–88. Породы горные. Метод определения предела прочности при срезе со сжатием. Введ. 01.07.1989. М. Издательство стандартов, 1988.
124. ГОСТ Р 12.4.287–2013. Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от химических веществ. Метод определения паропроницаемости мембранных материалов и швов. Введ. 01.12.2014. М. Стандартиформ, 2014.
125. ГОСТ 3813–72. Материалы текстильные. Ткани и штучные изделия. Методы определения разрывных характеристик при растяжении. Введ. 01.01.1973. М.: Издательство стандартов.
126. Universal testing machines. Shimadzu [Электронный ресурс]. URL: <https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm/index.html> (дата обращения: 18.12.2025).

127. ГОСТ Р 50111–92. Мембраны полимерные. Метод определения прочностных свойств плоских мембран. Введ. 01.07.1993. М. Госстандарт России, 1992.
128. РЭМ. Электромеханические разрывные машины [Электронный ресурс]. URL: <https://metrotest.nt-rt.ru/images/manuals/rem.pdf> (дата обращения: 18.12.2025).
129. ISO 9277:2022. Determination of the specific surface area of solids by gas adsorption. BET method. International Organization for Standardization, 2022.
130. Исследование пористости и удельной поверхности порошковых материалов на анализаторе Nova 1200e: Метод. указания / Казан. нац. иссл. техн. ун-т; Сост.: А.В. Скворцов, К.А. Мишагин. Казань, 2020. – 33 с.
131. ГОСТ Р 12.4.286–2017. Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от газообразных и жидких химических веществ. Метод определения защитных свойств материалов при воздействии хлора и аммиака: дата введения 2018-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2018.
132. ГОСТ Р 51712-2001. Трубки индикаторные. Общие технические условия Введ. 09.01.2001. М.: Госстандарт России, 2001.
133. KRÜSS Scientific. DSA25S. Semi-automatic wettability analysis with high dosing precision [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.kruss-scientific.com/en/products-services/products/dsa25s> (дата обращения: 29.04.2026).
134. Цифровой микроскоп Levenhuk D85L LCD [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.levenhuk.ru/products/levenhuk-mikroskop-cifrovoj-d85l-lcd-monokulyarnyj/> (дата обращения 10.01.2026).
135. Spectrum Two FT-IR Spectrometer. PerkinElmer [Электронный ресурс]. URL: <https://shop.perkinelmer.com/product/L160000A> (дата обращения: 18.12.2025).
136. Contact and Orientation Effects in FT-IR ATR Spectra [Электронный ресурс]. URL: <https://www.spectroscopyonline.com/view/contact-and-orientation-effects-ft-ir-atr-spectra> (дата обращения: 18.12.2025).

137. PerkinElmer. Simultaneous Thermal Analyzer (STA) 6000 [Электронный ресурс]. – URL: <https://shop.perkinelmer.com/product/N5370025> (дата обращения: 30.03.2026).

138. ГОСТ Р 8.736-2011 Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ. – 2011. – 23 с.

139. Sadri M., Arabkhani P., Chernysheva Y. S., et al. Activated carbon and textile materials for sorption and protective applications. Scientific and technical publications on sorption-filtering materials [Электронный ресурс]. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/activated-carbon-fiber> (дата обращения: 18.12.2025).

140. Ультразвуковая сварка пластмасс, материалов и нетканых полотен. ООО «Мэлфиз-ультразвук» [Электронный ресурс]. URL: <https://melfiz.ru/> (дата обращения: 18.12.2025).

141. Горностаева Ж. В., Чернышева Ю. С., Жидков В. Е. Применение метода таксономического анализа для оценки конкурентоспособности швейных изделий специального назначения // КАНТ. 2017. № 3(24). С. 109–112.

142. Исследование производственных загрязнений спецодежды на объектах нефтяной отрасли / И. В. Черунова, Е. В. Яковлева, Е. Б. Стефанова, И. В. Куренова // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2018. – Т. 80, № 3(77). – С. 346-351. – DOI 10.20914/2310-1202-2018-3-346-351. – EDN VNXEFE.

143. Долженков, А. Ф. Комплексный подход при создании высокоэффективных средств индивидуальной защиты спасателей / А. Ф. Долженков, Т. О. Мороз // Научный вестник НИИГД Респиратор. – 2024. – № 2(61). – С. 93-102. – EDN QSVEDC.

144. Гарафиев, А. Р. Сравнительный анализ разрывных характеристик текстильных основ для пакетов материалов фильтрующего типа и промышленных аналогов / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова, В. Ю. Матвеева // Костюмология. –

2026. – Т 11. – №1. – URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/13TLKL126.pdf> (дата обращения: 17.04.2026).

145. Гарафиев, А. Р. Устойчивость к раздиру текстильных основ для спецодежды и промышленных аналогов / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова, К. Д. Даловский // Костюмология. – 2026. – Т 11. – №2. – URL: <https://kostumologiya.ru/PDF/21TLKL226.pdf> (дата обращения: 23.06.2026).

146. Гарафиев, А. Р. Характеристики пористости и удельной поверхности текстильных основ для защитной одежды фильтрующего типа / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова // Технологии и качество. – 2026. – №3(73). - С. 31-36.

147. Наноструктурированные углеродные сорбенты российского производства как основа для создания фильтрующе-сорбирующих текстильных материалов / Ю. А. Тимошина, Э. Ф. Вознесенский, Э. А. Каралин [и др.] // Российские нанотехнологии. – 2023. – Т. 18, № 2. – С. 207-212. – DOI 10.56304/S1992722322040276. – EDN SXDQQW.

148. Гарафиев, А. Р. Результаты оценки прочности частиц сорбирующего слоя в пакете материалов для спецодежды / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова // Новации в процессах проектирования и производства изделий легкой промышленности : материалы IV Всероссийской конференции ученых, аспирантов и студентов с международным участием (Казань, 21–24 апреля 2026 г.); Минобрнауки России; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ , 2026. - С. 171-177.

149. Гарафиев, А. Р. Результаты оценки пористой структуры угольных сорбентов для создания пакета материалов защитной одежды / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова // Исследования ВКР – в практику профессиональной жизни: Сборник материалов VI Международной научно-практической межвузовской конференции. Часть 1. – М.: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2026. – С. 42 – 45.

150. Гарафиев, А. Р. Виды и свойства мембранного слоя в пакетах материалов фильтрующего типа для спецодежды / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова // Научные исследования и разработки в области дизайна и технологии:

Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Кострома: Костромской государственный университет С. 390 – 392.

151. Гарафиев А. Р. Прочностные свойства мембранного слоя пакета материалов защитной одежды / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова // IV Всероссийской конференции с международным участием «Современные методы получения материалов, обработки поверхности и нанесения покрытий» 26 - 27 марта 2026. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2026. - С. 125-128.

152. Гарафиев А. Р. Поровые характеристики мембран для пакета материалов с защитными свойствами А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова // Новые технологии и материалы легкой промышленности : материалы XXII Всероссийской научно-практической конференции для студентов и молодых ученых с международным участием (Казань, 14–15 мая 2026 г.); Минобрнауки России; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2026. – С. 150-156.

153. Морозова, И. И. Разработка сорбционно-фильтрующих текстильных материалов для защитной одежды с улучшенными свойствами: дис...канд. техн. наук. Казань, 2022 - 163 с.

154. Гарафиев, А. Р. Защитные свойства материалов специальной одежды от воздействия токсичных веществ и нефтепродуктов / А. Р. Гарафиев, Н. В. Тихонова, В. Ю. Матвеева // Вестник технологического университета. – 2026. – Т. 29. - № 8. – С. 106-113.

155. Semsarzadeh M. A., Sadeghi M., Barikani M., Moadel H. The effect of hard segments on the gas separation properties of polyurethane membranes // Iranian Polymer Journal. – 2007. – Vol. 16. No № 12. – P. 819–827.

156. Coelho, I.; Pires, R.F.; Gonçalves, S.B.; Bonifácio, V.D.B.; Faria, M. Gas Permeability and Mechanical Properties of Polyurethane-Based Membranes for Blood Oxygenators. Membranes. – 2022. – Vol. 12. – P. 826. <https://doi.org/10.3390/membranes12090826>.

157. Matsunaga, K., Sato, K., Tajima, M., Yoshida, Y. Gas Permeability of Thermoplastic Polyurethane Elastomers // *Polymer Journal*. – 2005. – Vol. – No 37. – Pp. 413-417. <https://doi.org/10.1295/polymj.37.413>.

158. Ristić I., Cakić S., Vukić N., Teofilović V., Tanasić J., Pilić B. The Influence of Soft Segment Structure on the Properties of Polyurethanes // *Polymers*. – 2023. – Vol. 15, № 18. – Art. 3755. – DOI: 10.3390/polym15183755. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/15/18/3755> (дата обращения: 25.08.2026).

159. Платонова Е. О., Пономарева П. Ф., Третьяков И. В., Афанасьев Е. С., Фролов С. М., Межуев Я. О. Самовосстанавливающиеся полиуретаны на основе природного сырья // *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. – 2024. – Т. 66, № 2. – С. 101–111. – DOI: 10.31857/S2308113924020024. – URL: <https://journals.rcsi.science/2308-1139/article/view/266167> (дата обращения: 25.08.2026).

160. Esmizadeh E., Tzoganakis C., Mekonnen T. H. Degradation Behavior of Polypropylene during Reprocessing and Its Biocomposites: Thermal and Oxidative Degradation Kinetics // *Polymers*. – 2020. – Vol. 12, № 8. – Art. 1627. – DOI: 10.3390/polym12081627. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/12/8/1627> (дата обращения: 25.08.2026).

161. Zhuang D., Chen Z., Sun B. Thermal Decomposition of Calcium Carbonate at Multiple Heating Rates in Different Atmospheres Using the Techniques of TG, DTG, and DSC // *Crystals*. – 2025. – Vol. 15, № 2. – Art. 108. – DOI: 10.3390/cryst15020108. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4352/15/2/108> (дата обращения: 25.08.2026).

162. Харапудько Ю. В. Мембранный технический текстильный материал с теплоотражающими свойствами: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.16. Казань, 2024. 153 с. EDN FXWQVL.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Крупные аварии и происшествия в России, связанные с выбросом
токсичных веществ и разливом нефтепродуктов**

Событие	Место	Год	Последствия	Источ- ник
Массовое кораблекрушение с разливом нефтепродуктов	Керченский пролив	2007	Повреждение и затопление судов во время шторма, попадание нефтепродуктов в акваторию, загрязнение побережья	[2]
Выброс хлора на химическом предприятии	Пермский край, Березники, ООО «Сода-хлорат»	2012	Пострадали работники предприятия, авария связана с выбросом хлора на производстве	[3]
Загрязнение нефти хлорорганическими соединениями в системе «Дружба»	Россия, Белоруссия, Польша и др. участки магистрали	2019	Остановка транспортировки нефти, накопление некондиционного сырья, экономический ущерб и необходимость компенсаций	[4]
Разлив дизельного топлива на ТЭЦ-3	Красноярский край, Норильск	2020	Утечка около 21 тыс. тонн дизельного топлива, загрязнение рек Амбарная и Далдыкан, угроза озеру Пясино	[5]
Выброс аммиака на химическом предприятии	Вологодская область, Череповец, предприятие «ФосАгро»	2021	Локальный выброс газообразного аммиака, пострадали работники предприятия	[6]
Пожар после атаки БПЛА на нефтеперерабатывающ ий объект	Ростовская область, Новошахтинский завод нефтепродуктов	2024	Возгорание на промышленной установке, временное нарушение технологического процесса	[7]
Крушение танкеров «Волгонефть» и разлив мазута	Керченский пролив, побережье Анапы и Темрюкского района	2024	В море попали нефтепродукты, загрязнены пляжи, введен режим ЧС, к очистке привлекались спасатели и волонтеры	[8]
Пожар после атаки БПЛА	Краснодарский край, Афи́пский нефтеперерабатыва ющий завод (НПЗ)	2025	Возгорание на территории НПЗ, локализация пожара, привлечение сил МЧС	[9]
Атака БПЛА на нефтеперерабатывающ ую инфраструктуру	Краснодарский край, Туапсе, Туапсинский НПЗ (Роснефь)	2025	Пожар на нефтяной инфраструктуре, риск загрязнения территории нефтепродуктами и продуктами горения	[10]
Атака БПЛА на нефтеперерабатывающ ий комплекс	Республика Татарстан, Нижнекамск, НПЗ «ТАНЕКО»	2026	Повреждение объекта нефтепереработки, возгорание технологической установки, привлечение аварийных служб	[11]
Атака БПЛА на нефтеперерабатывающ ий объект	Московский НПЗ, Москва	2026	Повреждена комбинированная установка «Евро+», установка АВТ-6, обеспечивавшая более 50% мощностей завода. Переработка сырья полностью остановлена	[12]
Атака БПЛА на предприятие нефтяного синтеза	Лукойл-Нижегороднефтеоргсинтез». Кстово	2026	Остановлена переработка сырой нефти.	[13]

Изолирующие материалы и костюмы специальной защитной одежды
русского производства

Производитель	Название костюма	Материалы	Защитные свойства	Источники
ГК «Восток-Сервис»	Комплект Л-1	Изолирующий защитный материал на полимерной основе	Защита при дезактивации, дегазации, дезинфекции, работа в условиях химического загрязнения	[14, 15]
ПВ ООО «Фирма «Техноавиа»	Костюм защитный Л-1	Изолирующий материал барьерного типа	Защита от химических факторов, применение при работах с загрязнением и опасными веществами	[14, 15]
ПВ ООО «Фирма «Техноавиа»	Комбинезон K4000	Полипропилен, покрытый полиэтиленовой пленкой высокой плотности	Защита от химических факторов, нефтепродуктов тяжелых фракций и нефтяных масел	[17, 20]
ГК «Восток-Сервис»	Костюм «Форест»	Полиэфирная ткань с ПВХ-покрытием	Водонепроницаемость, барьерная защита от влаги и загрязнений	[17, 20]
ГК «Энергоконтракт»	Комплекты для нефтегазовой отрасли серии «Нефть»	Термостойкие ткани с защитными отделками	Защита от нефти и нефтепродуктов, кратковременного пламени, кислот и щелочей	[18, 22]
ООО «ИГНИС»	Огнестойкие и антистатические комплекты спецодежды	Огнестойкие ткани, материалы с антистатическими свойствами	Защита от огня, статического электричества, производственных загрязнений	[19, 24]

Некоторые текстильные материалы для формирования основы пакета материалов
для защитной одежды

Состав материалов	Свойства	Назначение	Источник
Ткани специального назначения с огнезащитной обработкой, поверхностная плотность 250–700 г/м ²	Снижение воспламеняемости, сохранение прочности, долговечности и функциональности после обработки	Боевая одежда пожарных и защитная одежда от пламени	[47]
Хлопчатобумажные ткани с огнестойкими пропитками и арамидные ткани	Защита от повышенных температур, стойкость к пламени, контроль разрывной нагрузки после теплового воздействия	Специальная одежда от теплового излучения и конвективного тепла	[48]
Ткань «БиО-Терм», 90% хлопок, 10% полиамид, антистатическая нить	Несколько более высокий уровень защиты от электрической дуги у натуральной основы, физико-механические показатели ниже синтетических аналогов	Одежда для защиты от термических рисков электрической дуги	[49]
Полульняная парусиновая ткань из льняных и хлопковых волокон	После плазменного наноструктурирования стойкость к истиранию выше в 3,7 и 4,2 раза, повышены разрывная нагрузка и удлинение	Основа для спецодежды с повышенной эксплуатационной стойкостью	[50]
«Премьер Cotton 300», «Премьер Комфорт-250», «Cotton Rich 180», хлопковые и полиэфирные волокна	После плазмы и защитных пропиток стойкость к морской воде сохраняется до 12 месяцев, у контрольных образцов 3–6 месяцев	Защитная спецодежда для влажной и агрессивной среды	[51]
Текстильные материалы, обработанные водным раствором силана А-1100	Формирование гидрофобности, снижение гигроскопичности, сохранение требований к спецодежде	Основа для водо- и влагозащитной спецодежды	[52]
Текстильные материалы с плазменной обработкой, полимерными покрытиями и водоотталкивающей пропиткой	Повышение стойкости к нефти, щелочи и кислоте	Спецодежда для химической, нефтехимической и нефтедобывающей отраслей	[53]
Натуральные текстильные материалы, модифицированные холодной плазмой	Повышение прочности и стойкости к истиранию, улучшение эксплуатационных свойств	Основа для изделий специального назначения	[23]

Сорбенты и сорбционно-фильтрующие материалы для защитной одежды

Состав материалов	Свойства	Назначение	Источник
Активированный уголь, углесодержащие нетканые ткани, фланели, импрегнированная углем пена, сферические гранулы АУ	Высокая адсорбционная способность, задерживание токсичных веществ, снижение резорбтивного проникновения	Защитная одежда фильтрующего типа	[46]
Металлоорганические, металлсодержащие, наноразмерные и углесодержащие сорбенты	Высокая избирательность у металлсодержащих сорбентов, но высокая стоимость и сложность закрепления; перспективность угля после плазменной активации	Текстильные материалы от токсичных веществ	[57]
Силикагели, оксиды и гидраты алюминия, сложные металлоорганические вещества, активированный уголь	Развитая пористость, сорбционная емкость, у активированного угля гидрофобная поверхность и система микро-, мезо-, макропор	Сорбирующий слой защитной одежды	[58]
Материалы Saratoga с частицами активированного угля диаметром менее 0,5–0,56 мм, углесодержащие слоистые материалы	Улавливание токсичных веществ, воздухопроницаемость, защита от ОВ, ограничение по емкости и возможность десорбции	Проницаемые комплекты защитной одежды	[59, 63]
МОК UiO-66, NU-1000, MOF-808, циркониевые металлоорганические каркасы	Каталитическая дегазация, самодегазация, индикация нервно-паралитических веществ и их имитаторов	Перспективные СИЗК и фильтры	[64–70]
ФЦМ, ФЦМ-П, ТЛ-3, неуглеродные сорбенты, ферроцианид меди	Сорбция аммиака, хлора, гидразина, фенолов, оксидов азота, сероводорода, нефтепродуктов и масел	Фильтрующая защитная одежда ФЗО-МП, ФЗО-МП-2, ФЗО-МП-А	[60, 62]
Активированный уголь ФАС-Э	Защита от токсичных веществ кожно-резорбтивного действия в паровой, аэрозольной и газовой фазе	Отечественный сорбционно-фильтрующий материал	[61]
Наночастицы металлов, нановолокна, фотокаталитические и ультрагидрофобные текстильные материалы	Дегазация, антимикробные свойства, самоочищение, повышение барьерных свойств	Перспективные защитные ткани и материалы	[71–73]

Некоторые мембранные материалы и их свойства для пакетов материалов
для защитной одежды

Мембраны	Свойства	Назначение	Источник
Монолитные, пористые, асимметричные, ионообменные, газоразделительные мембраны	Селективное пропускание веществ по размеру, структуре и физико-химическим свойствам	Защитные материалы мембранного типа	[73]
Мембранные материалы для водозащитной спецодежды	Снижение водонепроницаемости при старении, стирке и многоцикловых нагрузках	Водозащитная специальная одежда	[25]
Полимерные мембраны разных структур в составе текстильных материалов	Водонепроницаемость, паропроницаемость, комфортность, надежность; анализ 93 артикулов	Подбор материалов в пакет одежды	[31]
Гидрофильные и гидрофобные мембраны	Различный механизм влагопереноса: диффузия через полимер или перенос через поры	Одежда для активного отдыха и спорта	[74]
Микропористые губчатые мембраны в двухслойных материалах	Водопаропроницаемость зависит от толщины, массопроводности и структуры мембраны	Водонепроницаемая одежда	[75]
ПУ мембрана после ионной обработки	Изменение краевого угла смачивания и поверхностных свойств	Регулирование гидрофильности и гидрофобности мембраны	[76]
Мембранные материалы с «бутылочной» формой пор	Сбалансированное сочетание водонепроницаемости и паропроницаемости	Водонепроницаемая одежда	[78]
Многослойный электропрядный нетканый материал	Градиент волокон 1,3–3 раза, каналы с расширением 1,5–4 раза, износостойкость	Мембранные нетканые материалы	[82]
Химзащитный мембранный материал, сформованный из раствора	Паропроницаемость 4000 г/м ² , защита от хлора и аммиака не менее 8 часов	Химзащитная спецодежда	[85]
Беспоровые ПУ мембранные покрытия	Цельный барьерный слой, возможность модификации плазмой, регулирование поверхностных свойств	Пакеты материалов от токсичных веществ и нефтепродуктов	[94]

Примеры разрывных кривых текстильных материалов

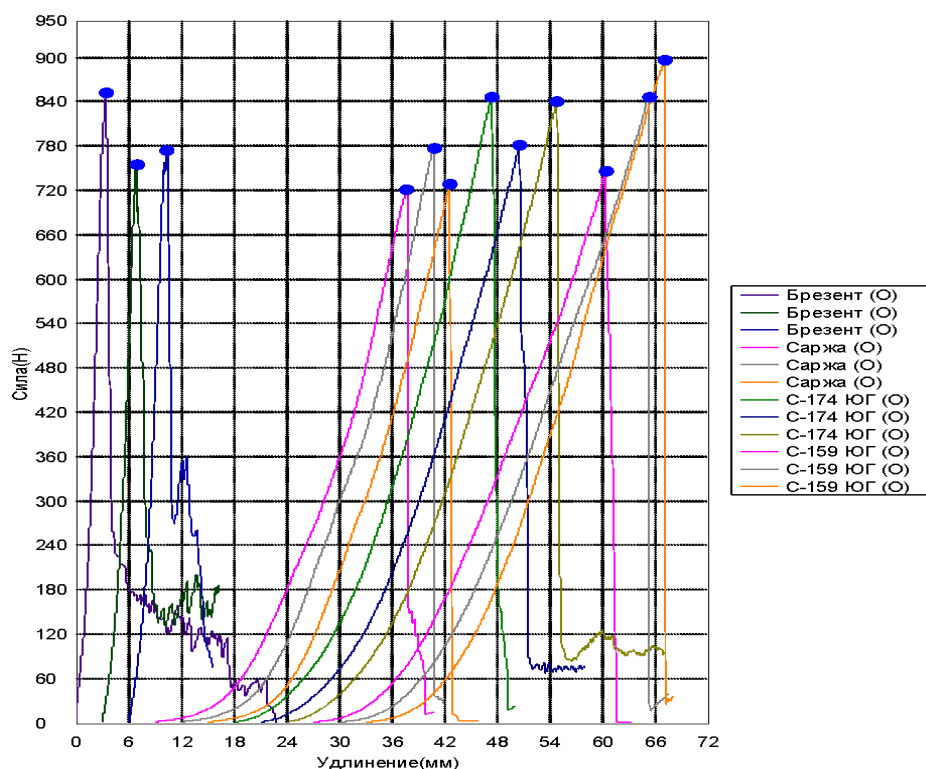


Рисунок Д.1 – Кривые «сила-удлинение» для текстиля, разрыв по основе

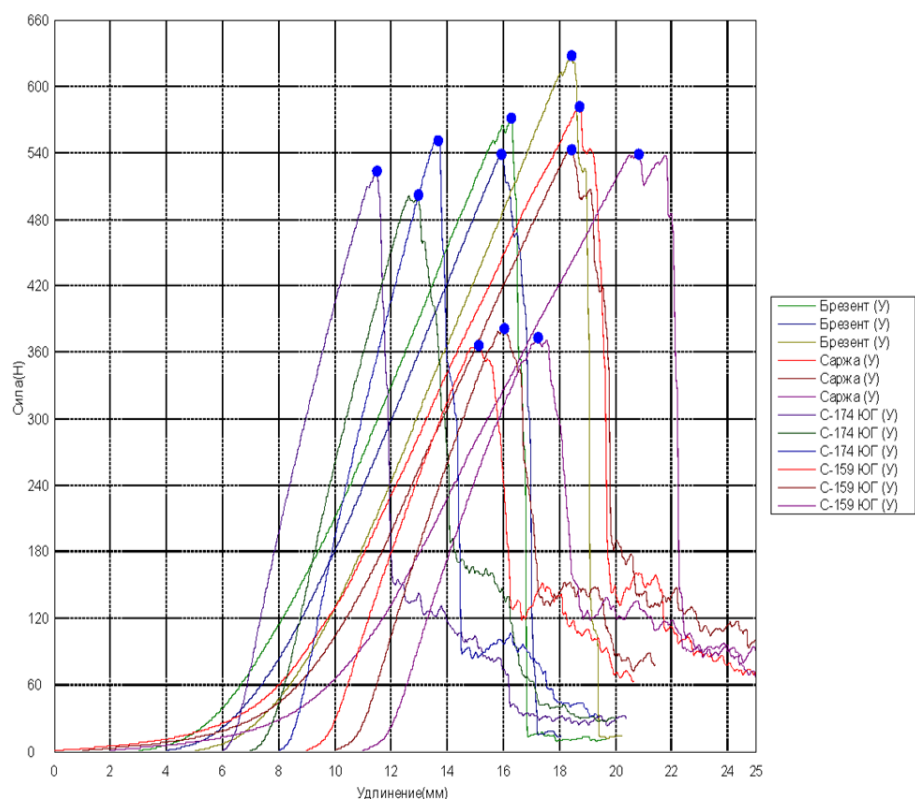


Рисунок Д.2 – Кривые «сила-удлинение» для текстиля, разрыв по утку

Примеры кривых раздира текстильных материалов

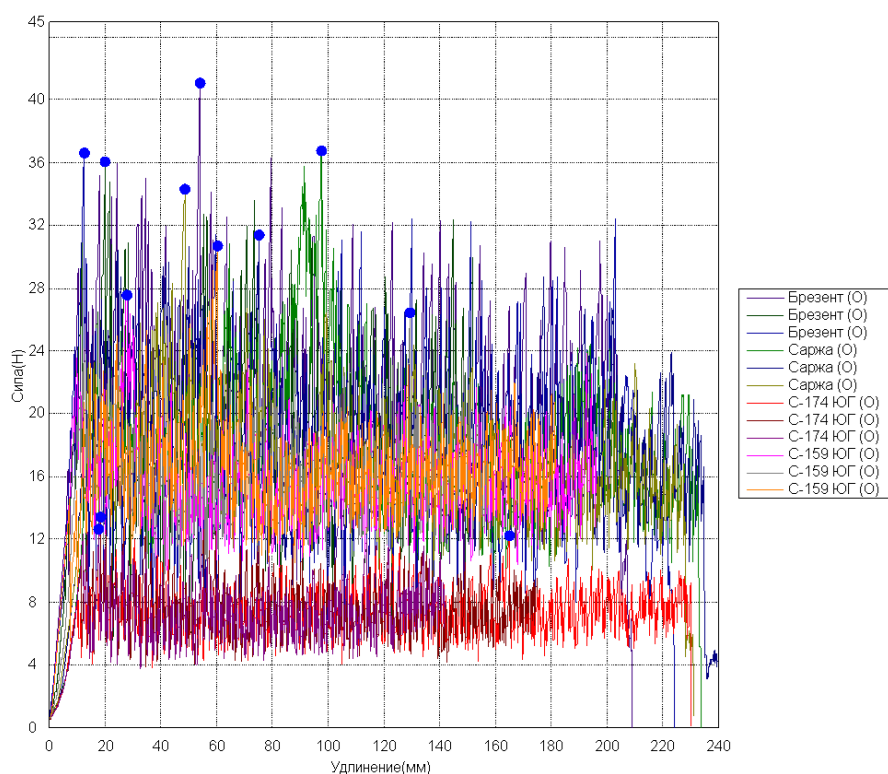


Рисунок Е.1 – Кривые «сила-удлинение» для текстиля, раздир по основе

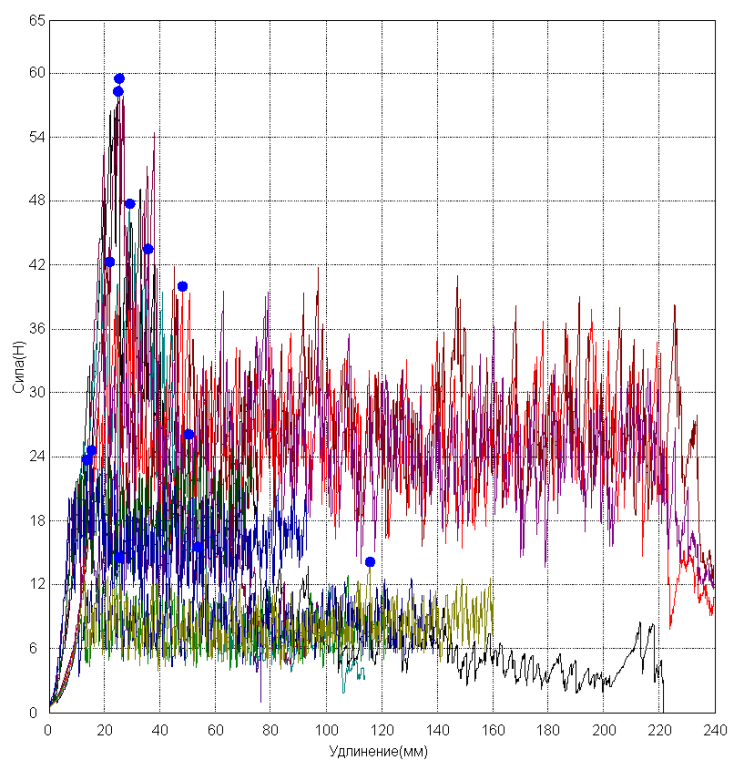
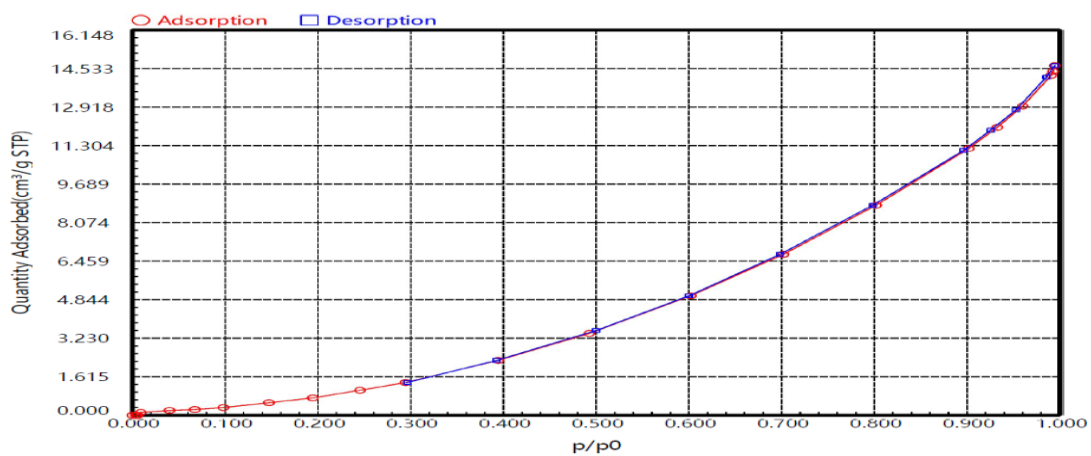
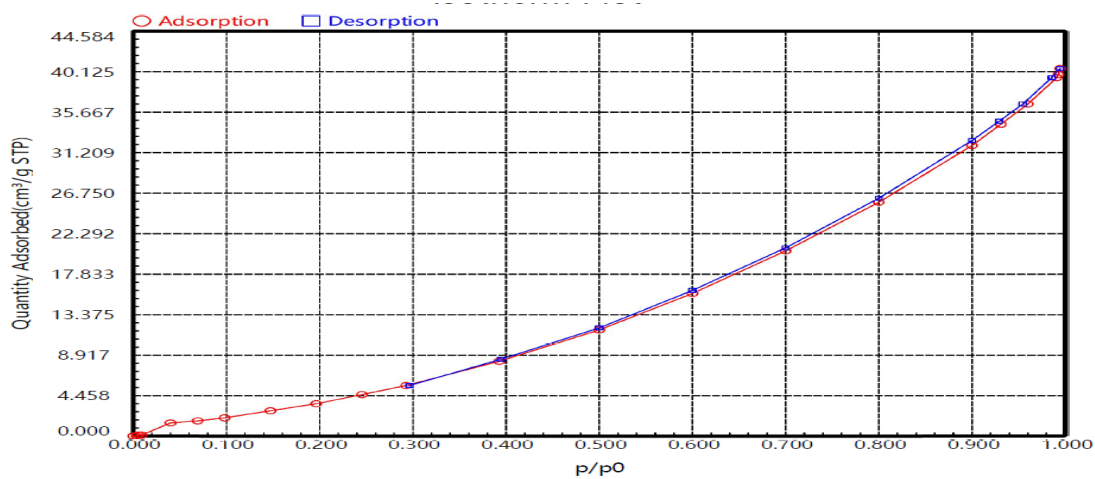


Рисунок Е.2 – Кривые «сила-удлинение» для текстиля, раздир по утку

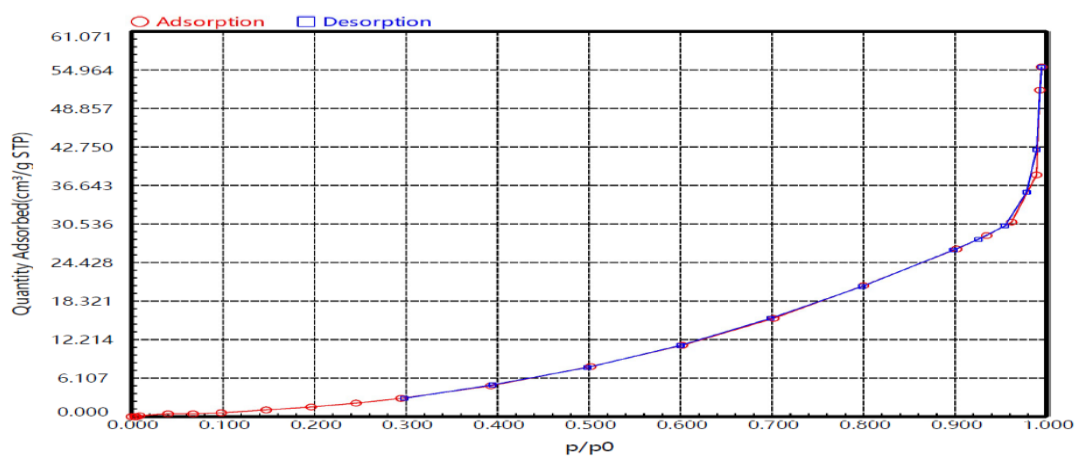
Изотермы адсорбции текстильных материалов



Брезент

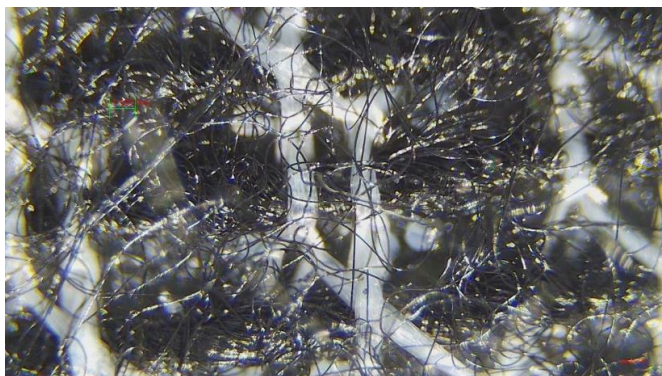


Молескин С-159 ЮГ

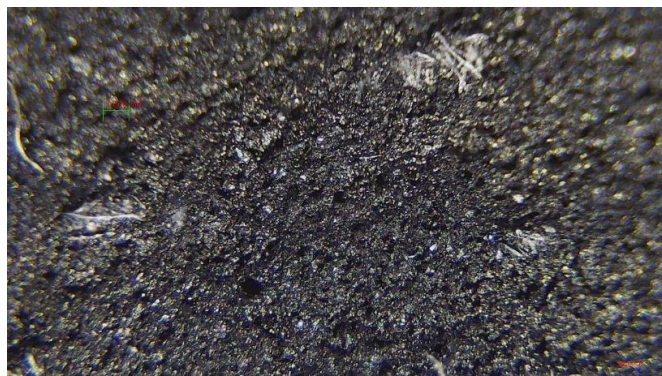


Молескин С-174 ЮГ

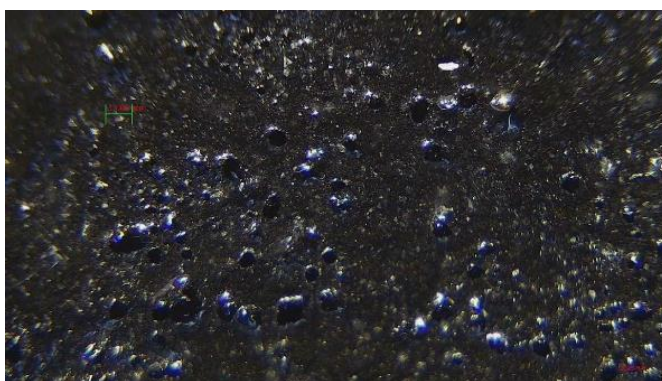
Микрофотографии поверхности химзащитных материалов-промышленных аналогов, $\times 60$



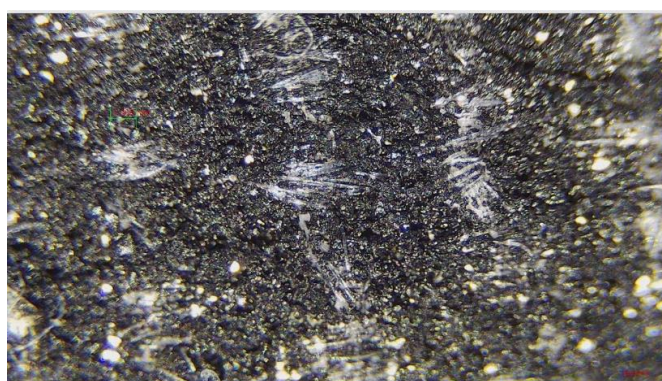
MMC-T



Биоформ



Митрон



Форм

Примеры разрывных кривых промышленно-производимых ХЗМ

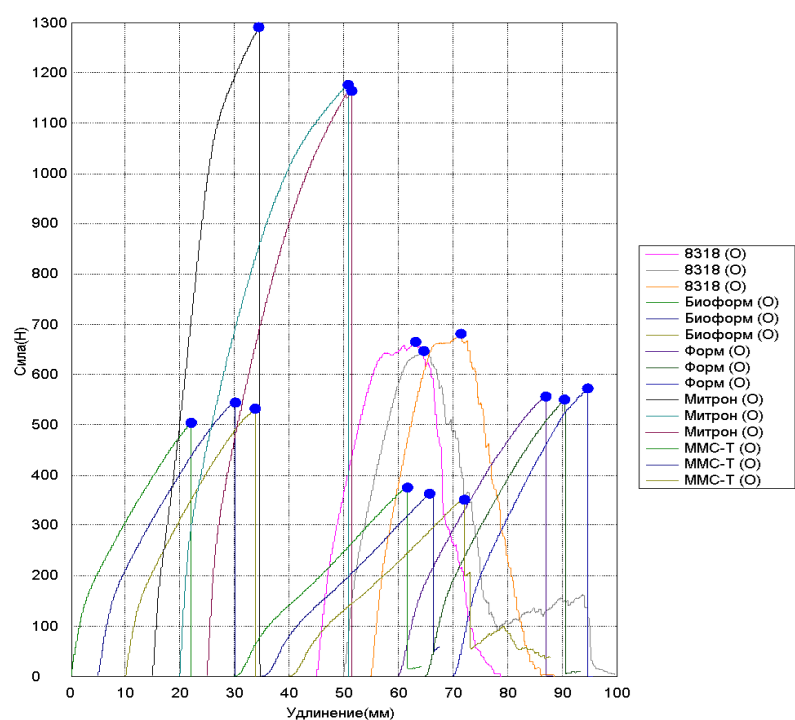


Рисунок К.1 – Кривые «сила-удлинение» для ХЗМ, разрыв по основе

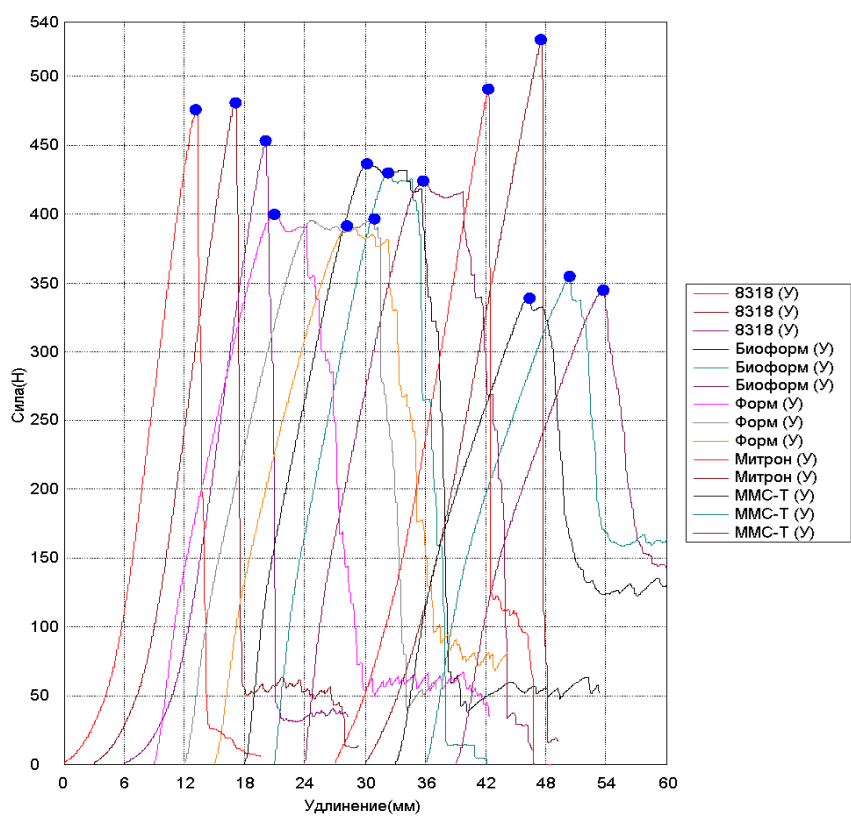


Рисунок К.2 – Кривые «сила-удлинение» для ХЗМ, разрыв по утку

Примеры кривых раздира ХЗМ

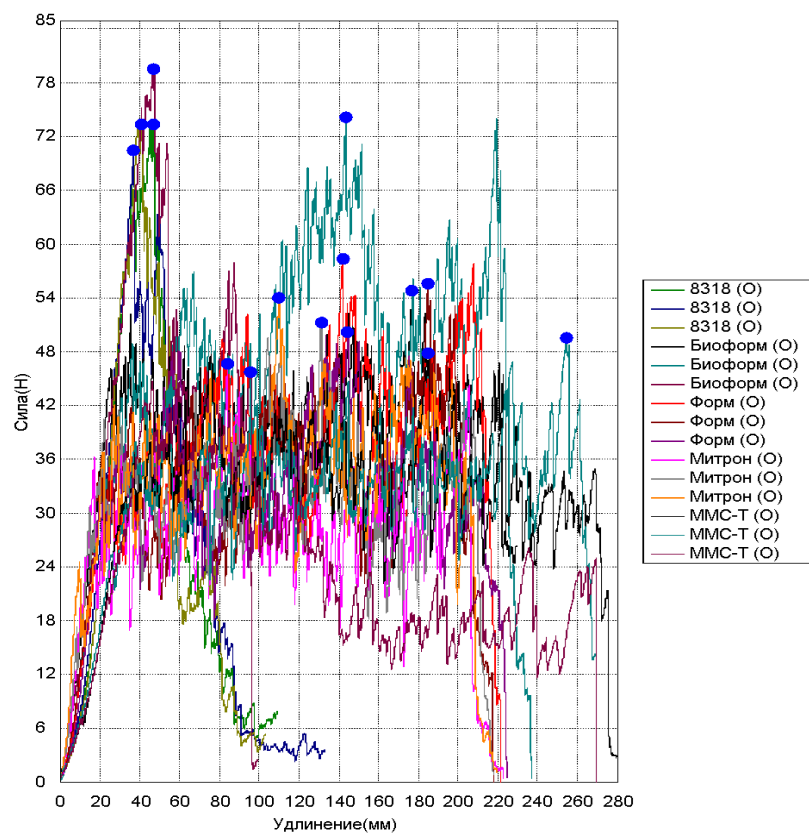


Рисунок Л.1 – Кривые «сила-удлинение» для ХЗМ, раздир по основе

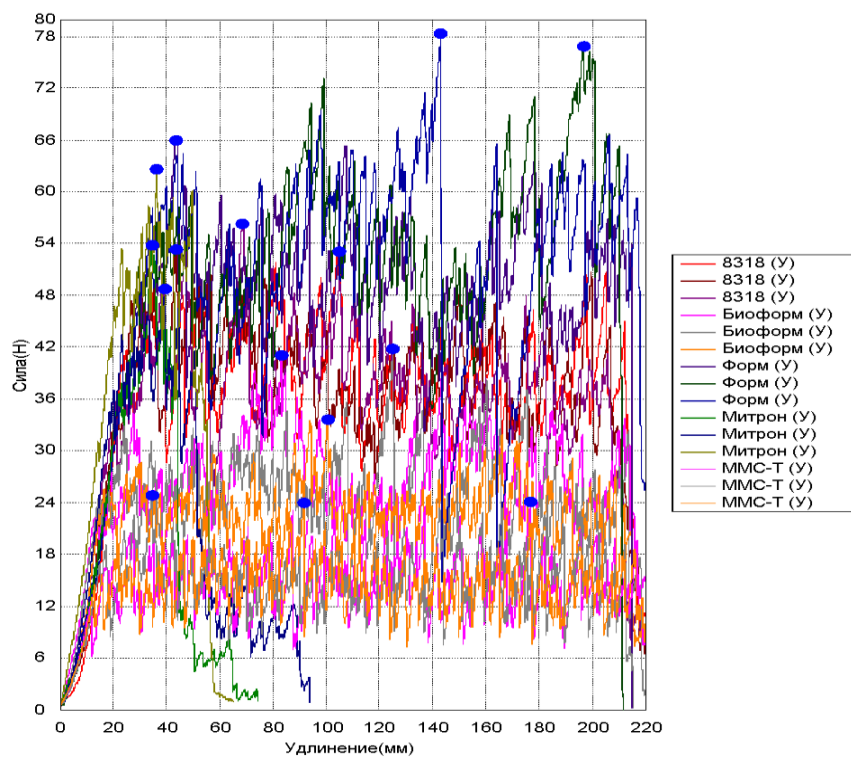
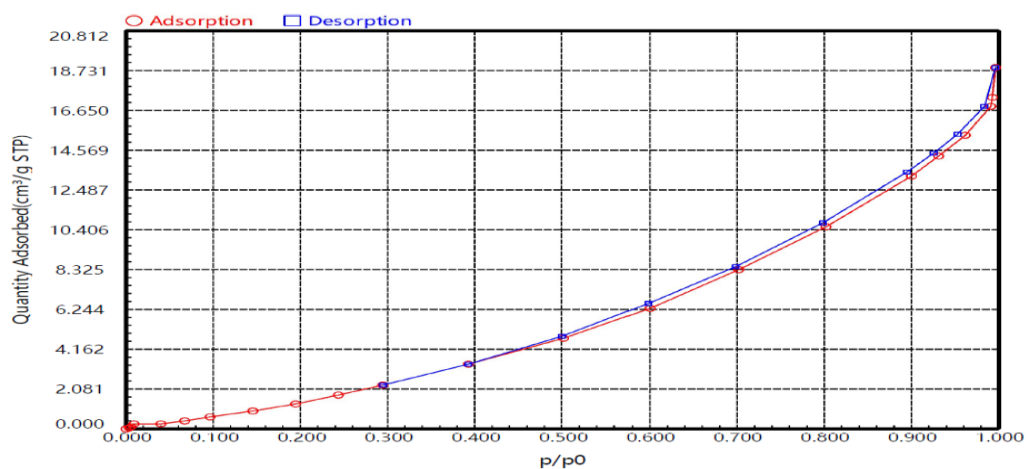
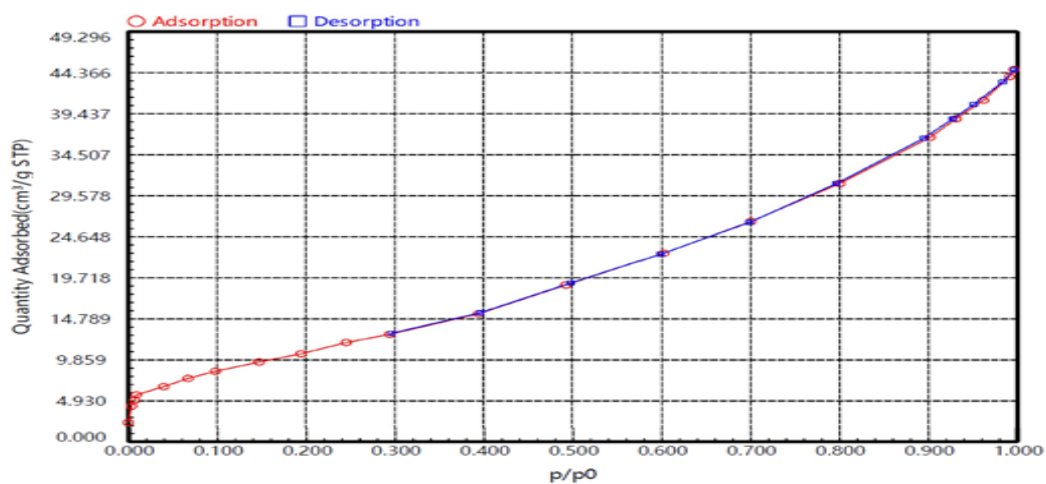


Рисунок Л.1 – Кривые «сила-удлинение» для аналогов, раздир по утку

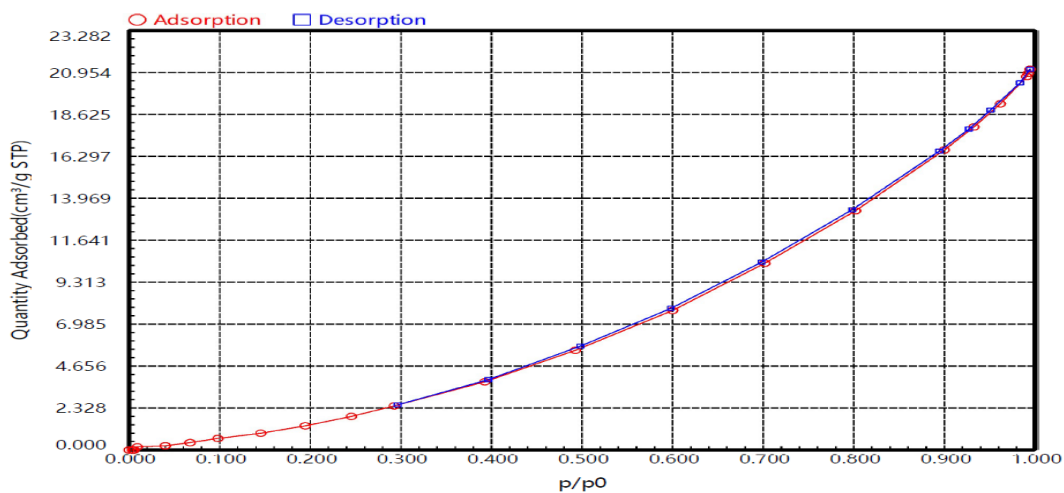
Изотермы адсорбции промышленно-производимых ХЗМ



Митрон

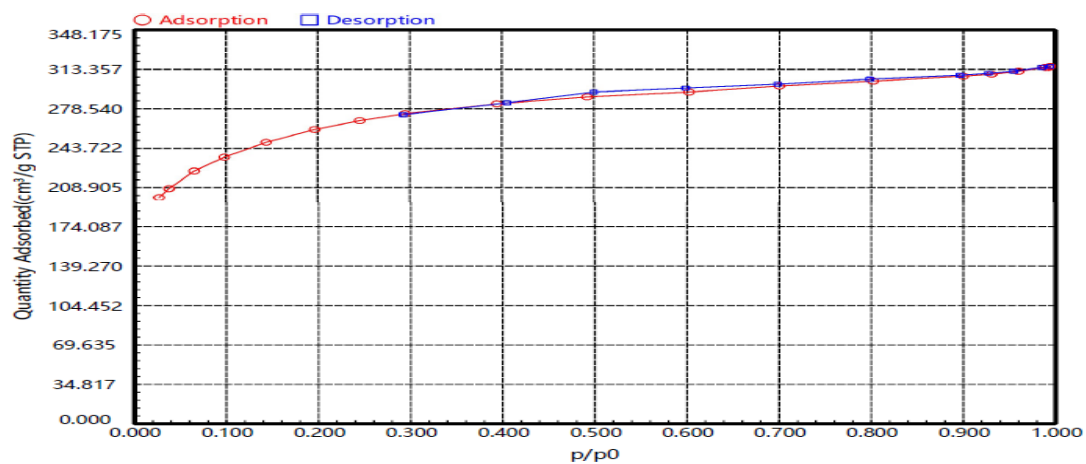


Форм

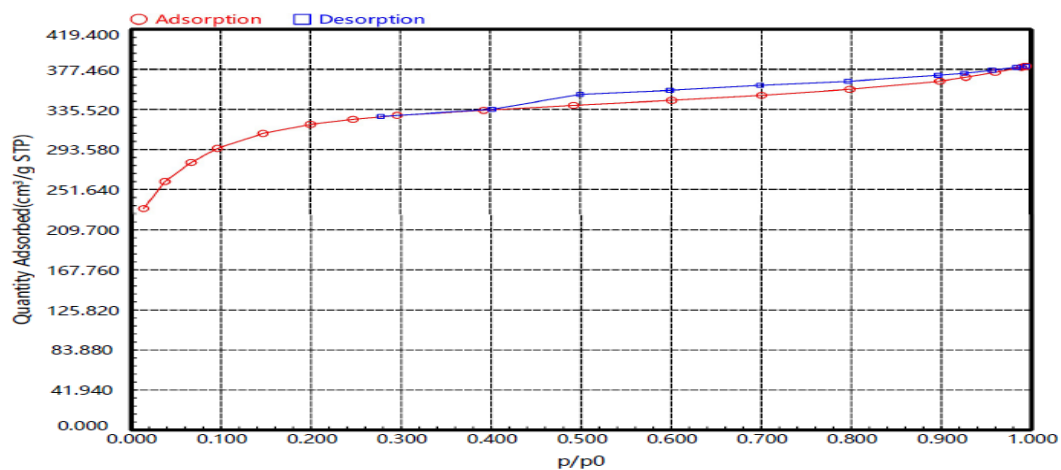


ХЗМ 8318

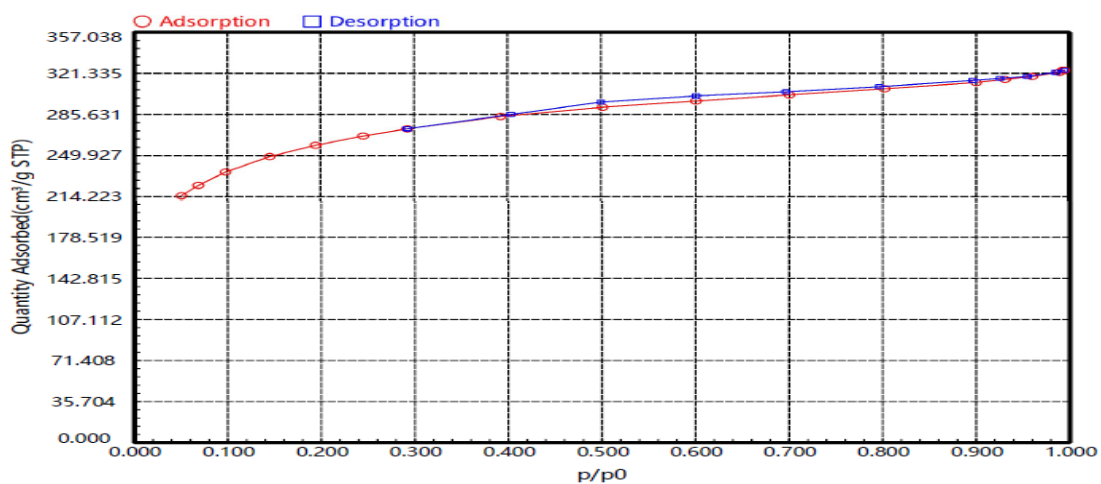
Изотермы адсорбции сорбентов



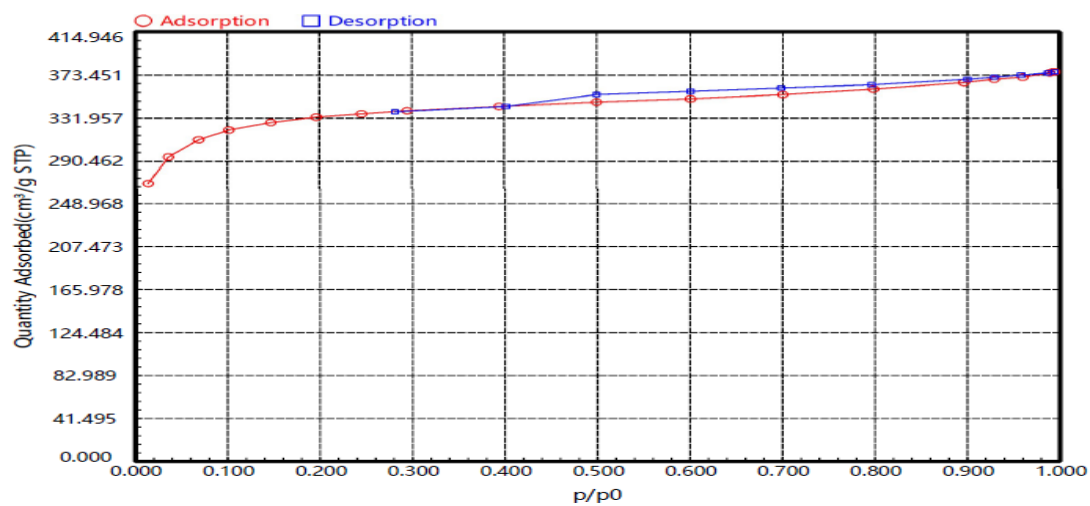
Дасорб



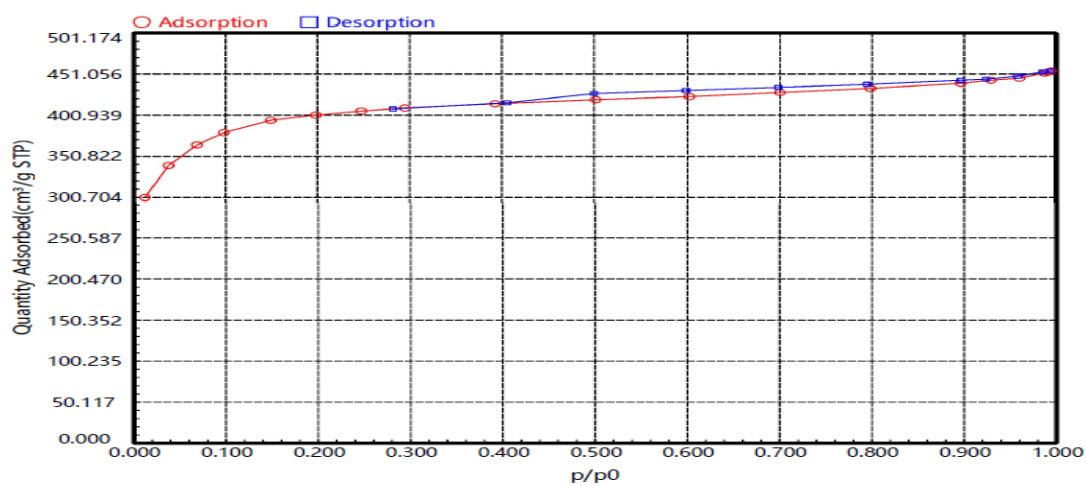
МеКС



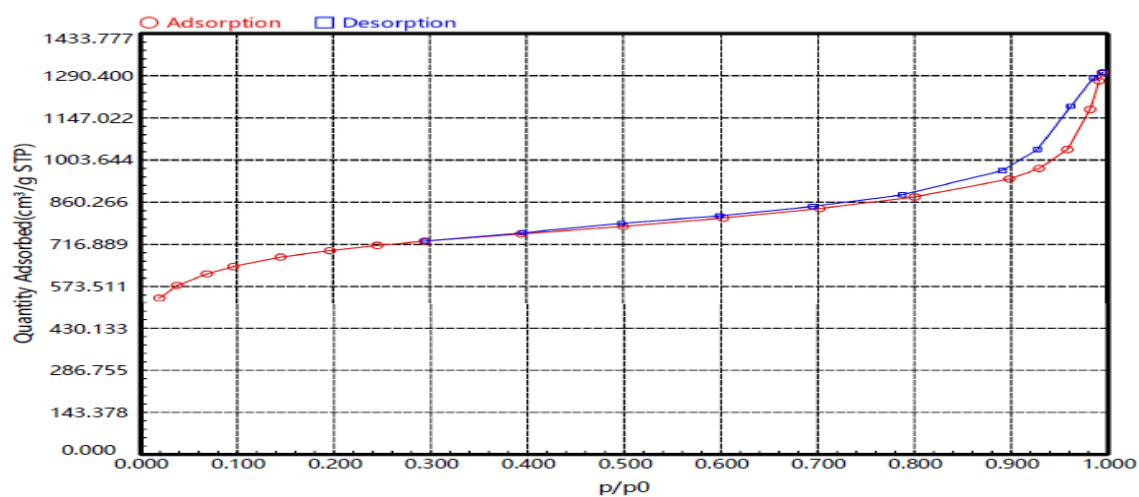
Сорбер-10



ВСК А-2



ВСК 8-30



ФАС мелкий

Расчеты таксонометрического анализа показателей текстильных основ

Таблица Р.1 – Исходная матрица показателей текстильных основ для таксонометрического анализа

Показатель	Тип признака	Саржа	Брезент	Молескин С-159 ЮГ	Молескин С-174 ЮГ
Поверхностная плотность, г/м ²	Дестимулятор	240	400	280	250
Прочность по основе, МПа	Стимулятор	26,51	18,45	25,92	26,12
Прочность по утку, МПа	Стимулятор	19,81	13,48	11,68	16,67
Удлинение по основе, %	Стимулятор	28,39	3,90	34,28	29,92
Удлинение по утку, %	Стимулятор	18,32	12,89	6,14	5,71
Раздирающая нагрузка по основе, Н	Стимулятор	34,14	37,89	14,72	12,76
Раздирающая нагрузка по утку, Н	Стимулятор	41,94	55,18	28,23	24,77
Размер пор, нм	Дестимулятор	5,43	7,26	10,04	14,05
Объем пор, см ³ /г	Стимулятор	0,0277	0,0225	0,0626	0,0855
Удельная поверхность, м ² /г	Стимулятор	20,46	12,41	24,96	24,35
Паропроницаемость, г/(м ² ·ч)	Стимулятор	36,67	39,00	38,00	42,67

Таблица Р.2 – Средние значения и среднеквадратические отклонения показателей

Показатель	Среднее значение	Среднеквадратическое отклонение
Поверхностная плотность, г/м ²	292,5000	63,7868
Прочность по основе, МПа	24,2525	3,3510
Прочность по утку, МПа	15,4100	3,1059
Удлинение по основе, %	24,1225	11,8738
Удлинение по утку, %	10,7650	5,2091
Раздирающая нагрузка по основе, Н	24,8775	11,2375
Раздирающая нагрузка по утку, Н	37,5300	12,0445
Размер пор, нм	9,1950	3,2482
Объем пор, см ³ /г	0,0496	0,0258
Удельная поверхность, м ² /г	20,5450	5,0039
Паропроницаемость, г/(м ² ·ч)	39,0850	2,2287

Таблица Р.3 – Стандартизированная матрица показателей текстильных основ

Показатель	Саржа	Брезент	Молескин С-159 ЮГ	Молескин С-174 ЮГ
Поверхностная плотность, г/м ²	-0,8231	1,6853	-0,1960	-0,6663
Прочность по основе, МПа	0,6737	-1,7286	0,4976	0,5573
Прочность по утку, МПа	1,4167	-0,6214	-1,2010	0,4057
Удлинение по основе, %	0,3594	-1,7031	0,8555	0,4883
Удлинение по утку, %	1,4504	0,4079	-0,8879	-0,9704
Раздирающая нагрузка по основе, Н	0,8242	1,1580	-0,9039	-1,0783
Раздирающая нагрузка по утку, Н	0,3661	1,4654	-0,7721	-1,0594
Размер пор, нм	-1,1591	-0,5957	0,2601	1,4947
Объем пор, см ³ /г	-0,8464	-1,0476	0,5040	1,3900
Удельная поверхность, м ² /г	-0,0170	-1,6257	0,8823	0,7604
Паропроницаемость, г/(м ² ·ч)	-1,0836	-0,0381	-0,4868	1,6085

Таблица Р.4 – Эталонные значения признаков для таксонометрического анализа текстиля

Показатель	Тип признака	Эталонное значение
Поверхностная плотность, г/м ²	Дестимулятор	-0,8231
Прочность по основе, МПа	Стимулятор	0,6737
Прочность по утку, МПа	Стимулятор	1,4167
Удлинение по основе, %	Стимулятор	0,8555
Удлинение по утку, %	Стимулятор	1,4504
Раздирающая нагрузка по основе, Н	Стимулятор	1,1580
Раздирающая нагрузка по утку, Н	Стимулятор	1,4654
Размер пор, нм	Дестимулятор	-1,1591
Объем пор, см ³ /г	Стимулятор	1,3900
Удельная поверхность, м ² /г	Стимулятор	0,8823
Паропроницаемость, г/(м ² ·ч)	Стимулятор	1,6085

Расчеты таксонометрического анализа показателей сорбентов

Таблица С.1 – Стимуляторы/дестимуляторы для анализа показателей сорбентов

Показатель	Тип признака	Логика включения
Прочность частиц	Стимулятор	Чем выше прочность, тем лучше сохраняется целостность сорбента при изгибах, трении и деформациях защитного костюма
Удельная поверхность	Стимулятор	Более развитая поверхность повышает потенциальную сорбционную активность угля
Объем пор	Стимулятор	Большой объем пор повышает емкость сорбента
Размер пор	Стимулятор	Для паров нефтепродуктов и токсичных веществ более развитая поровая система облегчает доступ молекул к внутренней поверхности

Таблица С.2 – Стандартизированная матрица показателей сорбентов

Сорбент	Прочность	Удельная поверхность	Объем пор	Размер пор
Даусорб	-0,6338	-0,6411	-1,3568	-0,5283
Каусорб	-0,5244	-0,7517	-1,1820	-0,7051
МеКС	-0,5965	-0,2702	-0,1074	-0,4962
ВСК 8-30	-0,6091	0,2703	0,4521	-0,6247
ВСК А-2	-0,7429	-0,2375	-0,1376	-0,5926
ФАС	1,0149	-0,2765	1,6923	1,8983
ФАС мелкий	2,2347	2,5230	1,1737	1,5448
Сорбер-10	-0,1429	-0,6163	-0,5344	-0,4962

Таблица С.3 – Эталонные значения признаков для таксонометрического анализа сорбентов

Показатель	Эталонное стандартизованное значение
Прочность частиц	2,2347
Удельная поверхность	2,5230
Объем пор	1,6923
Размер пор	1,8983

Расчеты таксонометрического анализа показателей мембран

Таблица Т.1 – Стимуляторы и дестимуляторы по мембранам

Показатель	Тип признака	Логика включения
Угол смачивания водой	Дестимулятор	Более низкий угол отражает большую гидрофильность, что связано с переносом водяного пара и комфортом пододежного пространства
Угол смачивания нефтью	Стимулятор	Более высокий угол означает меньшее растекание нефтепродукта по поверхности
Прочность	Стимулятор	Более прочная мембрана устойчивее к механическим нагрузкам в пакете
Удельная поверхность	Дестимулятор	Избыточно развитая поверхность мембранного слоя может повышать удержание загрязнений и усложнять барьерно-гигиенический баланс
Размер пор	Стимулятор	В данной расчетной постановке показатель учтен как фактор массопереноса через мембранный слой
Паропроницаемость	Стимулятор	Более высокая паропроницаемость улучшает физиолого-гигиенические свойства защитного костюма

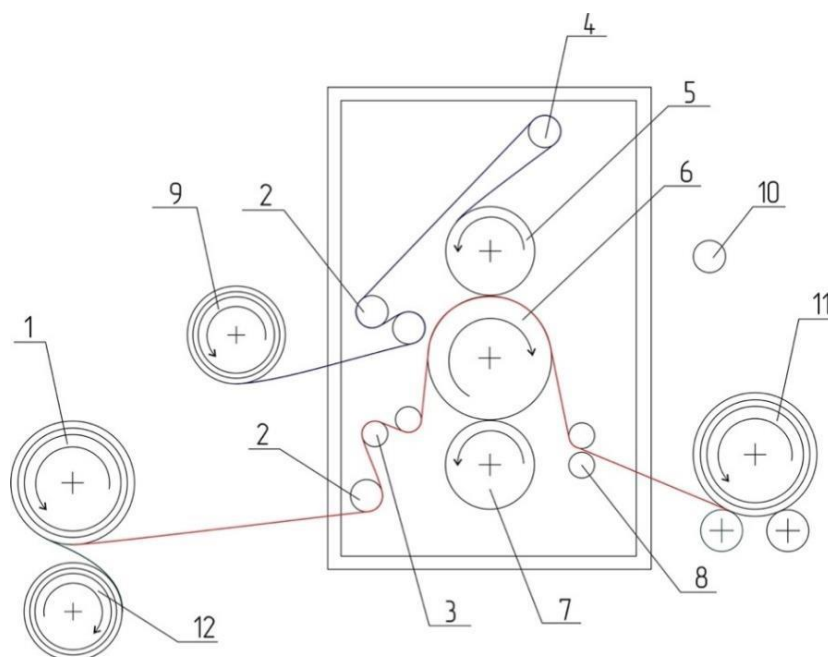
Таблица Т.2 – Стандартизированная матрица показателей мембран

Показатель	Данафлекс	Порелле	П600 МТ-1	Меркуритекс Турбо
Угол смачивания водой	1,1443	-1,5338	0,5568	-0,1674
Угол смачивания нефтью	-0,5714	0,6387	-1,3110	1,2437
Прочность	-15618	-0,0562	1,1617	0,4562
Удельная поверхность	-0,6750	-0,9507	0,0007	1,6250
Размер пор	0,2237	0,6138	0,8506	-1,6881
Паропроницаемость	0,8943	1,0694	-1,2354	-0,7283

Таблица Т.3 – Эталонные значения признаков для таксонометрического анализа мембран

Показатель	Эталонное стандартизованное значение
Угол смачивания водой	-1,5338
Угол смачивания нефтью	1,2437
Прочность	1,1617
Удельная поверхность	-0,9507
Размер пор	0,8506
Паропроницаемость	1,0694

Устройство и элементы каландра S4 560×1530 [153]



- 1 – устройство раскатное
- 2 – ролики направляющие
- 3 – бремза
- 4 – ширитель
- 5 – вал металлический обогревательный
- 6 – вал средний обрезиненный
- 7 – вал металлический охлаждающий
- 8 – ролики охлаждающие
- 9 – устройство раскатное
- 10 – натяжитель
- 11 – устройство накатное для готового материала
- 12 – вал для сбора бумаги

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «КазХимНИИ»

В.Ю. Матвеева



2026 г.

АКТ

производственных испытаний

результатов диссертационной работы Гарафиева Айдара Рустемовича
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.6.16. «Технология производства изделий текстильной и легкой
промышленности»

Мы, нижеподписавшиеся, представитель АО «Казанский химический научно-исследовательский институт» (АО «КазХимНИИ») руководитель испытательного центра О.А. Антонович с одной стороны и представитель ФГБОУ ВО «Казанский национальный технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ») аспирант кафедры конструирования одежды и обуви Гарафиев А.Р. с другой стороны составили настоящий акт о том, что в производственных условиях АО «КазХимНИИ» испытаны опытные образцы пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоем для защитной одежды от воздействия токсичных веществ и нефтепродуктов, полученные по результатам, представленным в диссертационной работе Гарафиева А.Р.

Произведена оценка защитных свойств опытных образцов пакета материалов по показателю времени защитного действия (ВЗД) при воздействии газовоздушных смесей нефти и аммиака. В качестве образцов испытаны пакеты, сформированные на основе ткани «Саржа» с термоклеем Rototerm, активированным углём и закреплённой точечной ультразвуковой сваркой гидрофильной полиуретановой мембраной Porelle P600; образцы различались маркой активированного угля. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Оценка защитных свойств опытных образцов пакета материалов

Пакет материалов	ВЗД при воздействии газовой смеси аммиака	ВЗД при воздействии газовой смеси нефти
Ткань «Саржа» – термоклей Rototerm – уголь Каусорб 12×40 – мембрана Porelle P600	17 мин 40 с	более 10 ч
Ткань «Саржа» – термоклей Rototerm – уголь ВСК (А-2) – мембрана Porelle P600	19 мин 50 с	8 ч
Ткань «Саржа» – термоклей Rototerm – уголь ФАС – мембрана Porelle P600	38 мин	8 ч

По результатам испытаний установлено, что наибольшей устойчивостью к газовой смеси нефти (более 10 ч) обладает пакет материалов с активированным углём Каусорб 12×40, превосходящий по данному показателю варианты с углями ВСК (А-2) и ФАС не менее чем на 25 %.

Значения ВЗД опытных образцов при воздействии газовой смеси аммиака составили от 17 мин 40 с до 38 мин. С учётом приоритетной защиты от нефтепродуктов в качестве базовой композиции пакета материалов рекомендован вариант с углём Каусорб 12×40, сочетающий наивысшую устойчивость к парам нефти с приемлемым уровнем защиты от аммиака.

Руководитель испытательного центра

АО «КазХимНИИ»

Аспирант кафедры Конструирования одежды и обуви

ФГБОУ ВО «КНИТУ»



О.А. Антонович



А.Р. Гарафиев

Приложение X

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор

АО «КазХимНИИ»

В.Ю. Матвеева

2026 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ

результатов диссертационной работы Гарафиева Айдары Рустемовича
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности
2.6.16. «Технология производства изделий текстильной и легкой
промышленности»

Научно-техническая комиссия в составе начальника лаборатории СИЗ Саляховой М.А., начальника производства Закировой Р.М., ведущего технолога цеха химических защитных материалов (ЦХЗМ) Карасевой И.П. составила настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Гарафиева А.Р. приняты к внедрению АО «КазХимНИИ».

Разработанные технологические рекомендации по производству пакета материалов с сорбирующим и мембранным слоем на основе ткани «Саржа», гранулированного активированного угля Каусорб 12×40 и гидрофильной полиуретановой мембраны Porelle P600, закрепляемой точечной ультразвуковой сваркой, обладающего повышенными защитными и эксплуатационными свойствами по отношению к токсичным веществам и парам нефтепродуктов, планируются к использованию в АО «КазХимНИИ» при разработке комплектов средств индивидуальной защиты кожи.

Результаты, полученные в диссертационной работе Гарафиева А.Р., представлены в АО «КазХимНИИ» в виде технической документации.

Начальник лаборатории СИЗ

Начальник производства

Ведущий технолог ЦХЗМ

М.А. Саляхова
Р.М. Закирова
И.П. Карасева

М.А. Саляхова

Р.М. Закирова

И.П. Карасева