

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ
имени В.А. БЕЛОГО НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
БЕЛАРУСИ»**

Объект авторского права
УДК 691.175.5/.8:66.067.123.22:66.074.9

**ШУМСКАЯ
Виктория Юрьевна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЛОКНИСТО-ПОРИСТЫХ
МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ФИЛЬТРОМАТЕРИАЛОВ
ДЛЯ ГАЗОТРАНСПОРТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

по специальности 05.16.09 «Материаловедение (машиностроение)»

Гомель, 2023

Научная работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси».

Научный руководитель:

Григорьев Андрей Яковлевич,
член-корреспондент НАН Беларуси,
доктор технических наук, профессор,
директор Государственного научного
учреждения «Институт механики
металлополимерных систем
имени В.А. Белого НАН Беларуси»

Официальные оппоненты:

Гольдаде Виктор Антонович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры радиофизики и
электроники Гомельского
государственного университета
имени Франциска Скорины
Приходько Иван Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
заведующий лабораторией «Электрические
и электронные системы» Белорусского
государственного университета транспорта

**Оппонирующая
организация:**

Учреждение образования «Гомельский
государственный технический
университет имени П.О. Сухого»

Защита состоится «21» ноября 2023 г. в 14-00 часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 01.14.01 при Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси» по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова 32а; e-mail: mpri@mpri.org.by; тел.: +375(0232)34-17-12; факс: +375(0232)34-17-11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси».

Автореферат разослан « 18 » октября 2023 г.

Учёный секретарь

Совета по защите диссертаций Д 01.14.01



Н.С. Винидиктова

ВВЕДЕНИЕ

Во многих производственных процессах требуется эффективная очистка технологических газовых сред от капельных аэрозолей. Для решения этой задачи постоянно разрабатываются новые фильтрационные материалы и конструкции газожидкостных сепараторов. Фильтры очистки газов от жидких аэрозолей широко применяются в газоперекачивающих агрегатах и компрессорных установках при добыче и транспортировке природного газа.

Наиболее эффективно капельные аэрозоли удаляют с помощью фильтров-сепараторов с фильтрующими элементами (ФЭ) из волокнисто-пористых материалов (ВПМ). Фильтрационные ВПМ должны одновременно обеспечивать высокую задерживающую способность, низкий перепад давления, способность к самоочистке и длительный срок службы, обусловленный механической прочностью и стабильностью при работе в агрессивных средах. ВПМ нашли широкое применение для решения задач охраны здоровья, в частности, в системах защиты органов дыхания человека от дисперсных загрязнений и в медицинских профилактических целях.

В настоящее время наиболее перспективным представляется использование многослойных композиционных полимерных волокнисто-пористых систем (ВПС), позволяющих за счет особенностей пористой структуры и взаимодействия с жидкой фазой осуществлять эффективное разделение газожидкостных потоков. Многослойность фильтроэлементов добавляет ряд факторов влияния на процессы очистки, многие из которых недостаточно изучены. В связи с этим исследования, направленные на установление этих факторов для повышения эффективности фильтрации многослойных волокнисто-пористых полимерных фильтроматериалов являются актуальной материаловедческой задачей в машиностроении и газотранспортной отрасли.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами), темами. Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республики Беларусь, утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы» (раздел 4 – композиционные и многофункциональные материалы).

Работа выполнена на основе теоретических исследований и экспериментальных данных, полученных при выполнении ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Полимерные материалы и технологии», задание 6.67

(2019–2020 г., гос. рег. № 20191310), ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма 8.4 «Многофункциональные композиционные материалы», НИР-3 (2021–2025 г., гос. рег. № 20210292); НИОК(Т)Р «Применение фильтроэлементов для выделения смазочного масла при компримировании двуокиси углерода в цехе карбамида 2-й очереди» ОАО «Гродно Азот» (2021–2022 г., гос. рег. № 20211273); гранта НАН Беларуси на выполнение научно-исследовательской работы аспирантов «Волокнисто-пористые многослойные полимерные фильтроматериалы для высокоэффективной сепарации газожидкостных потоков» (2021 г., гос. рег. № 20212526); проекта БРФФИ T21КОВИД-023 «Закономерности формирования и функционирования многослойной фильтрующей системы из полимерных волокнистых материалов в средствах антибактериальной и противовирусной защиты органов дыхания» (2021–2023 г., гос. рег. № 20210798); хозяйственных договоров с Белорусским газоперерабатывающим заводом РУП «ПО Белоруснефть», ОАО «Газпром Трансгаз Беларусь», Мозырским подземным хранилищем газа ОАО «Белтрансгаз», ОДО «НТЦ ЛАРТА» за период 2014–2023 гг.

Цель и задачи исследования. Целью работы являлось установление закономерностей влияния пористой структуры ВПМ и межфазного взаимодействия с жидкостью аэрозоля на фильтрующие свойства многослойных композиционных волокнисто-пористых систем из разнородных полимеров и разработка на этой основе высокоэффективных фильтроэлементов с низким перепадом давления.

Для достижения цели определены следующие задачи:

- исследовать морфологические характеристики ВПМ и характер их межфазного взаимодействия с различными жидкими средами;
- разработать методику и устройство для определения эффективности фильтрации и дренажной способности ВПМ, позволяющие дифференцированно оценивать отделение жидкой фазы на поверхностях входа и выхода потока и насыщение пористого пространства;
- установить закономерности фильтрации двухфазных сред (воздух/аэрозоль жидкости) и дренажной способности композиционных многослойных ВПМ в зависимости от их структуры, межфазного взаимодействия с фильтруемой средой и порядка расположения слоев относительно потока;
- определить технологические параметры формирования ВПМ по технологии газодинамической вытяжки фторполимера и аэродинамического распыления расплава полипропилена для достижения оптимальной пористой структуры при сочетании в высокоэффективной многослойной фильтрующей системе;

– разработать и оптимизировать композиционные многослойные фильтроэлементы из разнородных ВПМ с эффективностью фильтрации не менее 99% при перепаде давления в 2 раза меньшем в сравнении с применяемыми в настоящее время аналогами;

– провести опытно-промышленные испытания разработанных многослойных ВПМ и систем в реальных производственных процессах.

Объект исследования: полимерные волокнисто-пористые фильтроматериалы и композиционные многослойные фильтроэлементы.

Предмет исследования: влияние пористой структуры ВПМ и его межфазного взаимодействия с капельным аэрозолем на фильтрующие свойства, а также закономерности отделения жидкости от газа в поровой системе композиционных многослойных фильтроэлементов.

Научная новизна.

1. Экспериментально установлена взаимосвязь пористой структуры многослойного ВПМ и его межфазного взаимодействия с жидкостью на границе слоев, позволяющая путем выбора материалов фильтроэлемента и технологических параметров их получения регулировать процессы захвата и слияния капель аэрозоля на входной поверхности фильтроэлемента.

2. Результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие, что при расположении фильтроматериалов в многослойных волокнисто-пористых системах по ходу газожидкостного потока в соответствии с уменьшением их межфазного взаимодействия с жидкостью аэрозоля, обеспечивается сохранение показателей эффективности фильтрации при в 2 раза меньшем перепаде давления по сравнению с их обратным расположением.

3. Теоретическая модель дренажа, рассматривающая стекание по внешней поверхности и фильтрацию в объеме волокнисто-пористого материала, связывающая уменьшение массы жидкости в образце во времени с коэффициентом фильтрации, что позволяет оценивать возможность его применения в качестве дренажного слоя для конкретной жидкости.

Положения, выносимые на защиту:

1. Концепция создания многослойной фильтрующей среды из разнородных полимерных волокнисто-пористых материалов, предполагающая формирование градиентов пористости и межфазного взаимодействия с жидкой фазой по толщине фильтра, обеспечивающая оптимальную последовательность процессов коалесценции, насыщения и дренажа, что позволяет снизить перепад давления на фильтре в 2–4 раза при сопоставимой эффективности фильтрации в сравнении с аналогами.

2. Методика исследования процессов фильтрации газожидкостных потоков волокнисто-пористыми полимерными системами, позволяющая

оценить эффективность фильтрации, измерять перепад давления на них, дифференцировано определять объемы жидкости, отделённой на поверхностях входа и выхода потока, а также насыщение пористого пространства фильтроэлемента.

3. Экспериментальные данные, подтверждающие возможность оптимизации пористой структуры композиционных многослойных ВПМ, полученных методами газодинамической вытяжки фторполимера и аэродинамического распыления расплава полипропилена, обеспечивающие повышение эффективности фильтрации до значений выше 99%.

4. Многослойный полимерный волокнисто-пористый материал на основе политетрафторэтилена и полипропилена для очистки газов и способ его получения с обработкой каландрированием при давлении 0,6–1,0 МПа, обеспечивающий показатель эффективности фильтрации аэрозолей 99,90–99,97%, при перепаде давления в 2,0–2,4 раза ниже и коэффициенте качества фильтрации в 1,7–2,3 раза выше известных аналогов.

5. Результаты опытно-промышленной апробации на АО «Ачимгаз» разработанной конструкции газового сепаратора с композиционным многослойным фильтром, обеспечившим уменьшение в 2,2–2,5 раз содержания жидкости в очищенном газе при увеличении производительности на 40%; внедрения на Белорусском газоперерабатывающем заводе РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» разработанных фильтроэлементов, показавших увеличенный в 3 раза ресурс; применения на ОАО «Гродно Азот» многослойных фильтров в сепараторах очистки двуокиси углерода при производстве карбамидо-аммиачной смеси, обеспечивших снижение содержания масла в растворе карбамида в 1,5–2,0 раза.

Личный вклад соискателя. Личный вклад соискателя состоит в участии в постановке и решении задач исследования, анализе научно-технических и патентно-информационных источников, выборе ВПМ и их комбинаций, разработке методов исследования, изготовлении опытных образцов, изучении их структуры, дренажных и фильтрационных характеристик, обработке экспериментальных данных, интерпретации и обобщении результатов исследований, разработке и изготовлении высокоэффективных фильтрующих элементов и фильтрационных систем, подготовке научных публикаций и заявок на изобретения, внедрении разработанных технических решений. Обсуждение направлений исследований, полученных результатов и выводов осуществлялось при участии научного руководителя член-корреспондента НАН Беларуси А.Я. Григорьева и к.т.н. В.В. Снежкова. Вклад соавторов (Л.Ф. Иванов, П.Н. Гракович, С.Ф. Жандаров, Л.А. Калинин, С.В. Зотов и др.) состоял в участии в постановке экспериментов, обсуждении результатов и формулировании научных выводов.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты исследований представлены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях: четырех Республиканских научно-технических конференциях молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (г. Гомель, Беларусь, 2016, 2018, 2020, 2022); двух Международных научных конференциях «Молодежь в науке» (г. Минск, Беларусь, 2020, 2021); четырех Международных научно-технических конференциях «Полимерные композиты и трибология» (г. Гомель, Беларусь, 2015, 2017, 2019, 2022); Международной научно-технической конференции для молодых учёных «Транспорт и хранение углеводородов» (г. Омск, Россия, 2020); Международной Узбекско-Белорусской научно-технической конференции «Композиционные и металлополимерные материалы для различных отраслей промышленности и сельского хозяйства» (г. Ташкент, Узбекистан, 2020); Международной конференции «Взаимодействие излучения с твёрдым телом» (г. Минск, Беларусь, 2021); Республиканской научной конференции студентов, магистрантов, аспирантов «Актуальные вопросы физики и техники» (г. Гомель, Беларусь, 2021); V Международной конференции с элементами научной школы «Новые материалы и технологии в условиях Арктики» (г. Якутск, Россия, 2022).

За установление закономерностей процесса фильтрации различных технологических сред полимерными волокнисто-пористыми материалами, позволившими создать конкурентоспособные импортозамещающие отечественные фильтрующие элементы для газовой и нефтехимической промышленности, соискателю в 2020 г. присуждалась стипендия Президента Республики Беларусь талантливым молодым ученым (распоряжение Президента РБ №233рп от 9 декабря 2019 г.). Проект «Инновационные фильтроэлементы очистки углекислого газа для повышения качества и экспортного потенциала азотных удобрений ОАО «Гродно Азот»» стал победителем в конкурсах «100 идей для Беларуси» (г. Минск, Беларусь, 2022), «100 инноваций молодых ученых» (г. Минск, Беларусь, 2022), форуме инноваторов и изобретателей «IN'HUB» (г. Новосибирск, Россия, 2022).

Опубликованность результатов диссертации. По результатам исследований опубликовано 26 научных работ, из них: 5 статей в научных рецензируемых изданиях, соответствующих п.19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь; 4 статьи в сборниках материалов конференций; 13 тезисов докладов на конференциях; 1 патент на изобретение РФ, 2 заявки на изобретение РБ; 1 нормативно-технический документ (ТУ).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 166 страниц, в том числе: 71 рисунок на 34 страницах и 33 таблицы на 9 страницах, список использованных источников из 129 наименований на 10 страницах, список опубликованных работ автора из 26 наименований на 4 страницах, 12 приложений на 14 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, связанная с возрастающими требованиями к производительности газотранспортных систем, действующими техническими и экологическими нормативами к газовым средам. Подчеркнута перспективность подходов к совершенствованию методов и средств сепарации газожидкостных потоков с использованием фильтрующих материалов на основе полимерных волокнисто-пористых композитов, сочетающих высокую эффективность и технологичность при относительно низкой стоимости.

В **первой главе** представлены результаты анализа научно-технической литературы и патентно-информационных источников в области сепарации газожидкостных потоков. Отмечено, что устройства и технические решения фильтрации жидких аэрозолей являются неотъемлемой частью газотранспортного оборудования – блоков сепарации и очистки газовых потоков компрессорного оборудования, турбин, линий газоснабжения технологическими средами различных промышленных систем и устройств.

Охарактеризованы основные свойства аэрозолей. Рассмотрены существующие методы их фильтрации и сепарации. Отмечено, что основной подход к разделению газожидкостных потоков основан на использовании различий в фазовом состоянии их компонентов – дисперсной составляющей (жидкость) и дисперсионной среды (газ).

Анализ основных средств разделения газожидкостных потоков позволил сделать вывод о перспективности использования для этих целей полимерных ВПМ, основными преимуществами которых является обеспечиваемый низкий перепад давления и технологичность. Однако параметр эффективности фильтрации этих материалов, определяемый как отношение массовой концентрации частиц в газе до фильтра и после него, существенно ниже, чем у наиболее распространенных сегодня в газотранспортных системах фильтроматериалов на основе стеклобумаги.

Интенсификация процесса сепарации с помощью полимерных ВПМ возможна путем применения многослойных фильтров, однако это добавляет ряд факторов влияния, многие из которых недостаточно изучены. В частности,

недостаточно исследовано влияние межфазного взаимодействия жидкости с материалами многослойных волокнисто-пористых систем из разнородных полимеров на разделение газожидкостных потоков.

На основании проведенного анализа научно-технической информации по теме диссертации сформулирована основная научная идея работы, заключающаяся в предположении, что использование композиционных фильтров из материалов, отличающихся характером взаимодействия с жидкой фазой (смачиванием) и порядком их расположения по отношению к потоку, может повысить эффективность фильтрации за счет интенсификации процессов коалесценции капель аэрозолей на межфазной границе пористых тел с различной смачиваемостью. Определены цель и задачи исследования.

Во **второй главе** представлена информация об объекте и методах исследований. Проведены предварительные оценки функциональных свойств различных видов полимерных волокнисто-пористых материалов, отличающихся природой, пористостью, структурой и способом изготовления, включающих: бумагоделательные технологии, иглопробивные, пневмоэкструзию из расплава и газодинамическую вытяжку в вакууме.

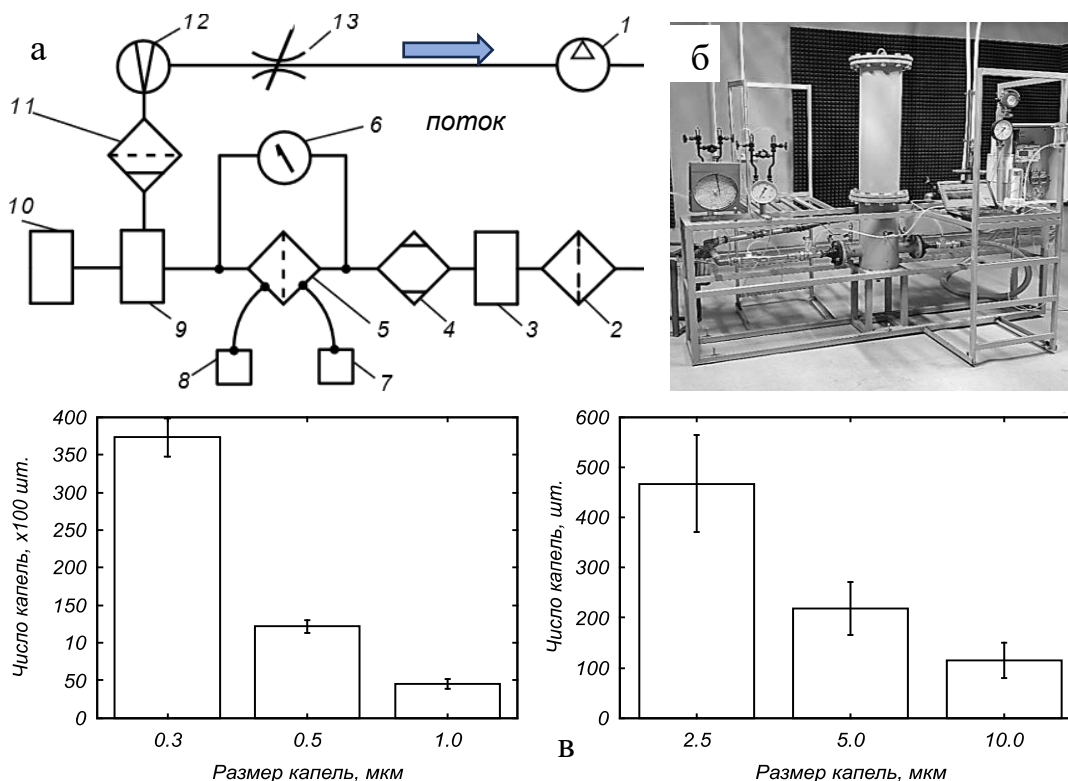
По результатам экспериментов основным объектом исследований выбраны волокнисто-пористые полимерные фильтроматериалы на основе полипропилена (ПП, Borflow HL512FB «Borealis», Австрия), изготовленного по технологии пневмоэкструзии из расплава («МБ», ОДО «НТЦ ЛАРТА») и материал «Грифтекс» («Гр», ТУ РБ 400084698.138-2004, ИММС НАН Беларуси), полученный методом газодинамической вытяжки расплава политетрафторэтилена (фторопласт-4 ГОСТ 10007) в вакууме. Выбор был обусловлен значительным отличием характеристик смачивания этих материалов аэрозолями фильтруемой среды и технологичностью методов изменения характеристик их пористой структуры.

В качестве дренажного слоя выбран ВПМ из полипропилена марки PP4445S (ФВП, ТУ 20.1651-136-05766801-2015). Для сравнительных целей выбрана фильтровальная боросиликатная стеклобумага класса фильтрации Н13 (Xiamen R&J Filtration Co. Ltd, Китай), как наиболее распространенный фильтроматериал, используемый в фильтрах-коалесцерах газотранспортного оборудования.

Определение объемной плотности и пористости материалов проводили по ГОСТ 15902.2-2003. Морфологию порового пространства материалов изучали на растровом электронном микроскопе «Vega II LSH» («Tescan», Чехия). Распределение пор по размерам оценивали с помощью газожидкостного порометра «POROLUXTM 500» («IB-FT GmbH», Германия). Краевой угол смачивания (КУС), измеряли с помощью программно-аппаратного комплекса на базе контактного углового гониометра «Капля-5»

(ГГУ им. Ф.Скорины, Республика Беларусь) с применением в качестве пробных жидкостей дистиллированной воды, глицерина (ГОСТ 6824-96) и турбинного масла ТП- 22 (ТУ 38.101821-2001).

Для оценки эффективности фильтрации разработаны лабораторный и аттестованный стенды (рисунок 1 а, б), используемые в исследованиях фильтроматериалов и испытаниях фильтроэлементов.



а – схема лабораторного стенда: 1 – насос; 2 – НЕРА фильтр; 3 – генератор аэрозоля; 4 – ресивер; 5 – кассета с образцом; 6 – дифференциальный манометр; 7, 8 – емкости для сбора жидкости; 9 – счетчик частиц аэрозоля; 10 – компьютер; 11 – осушитель; 12 – расходомер; 13 – дроссель. б – аттестованный стенд оценки характеристик фильтроэлементов; в – распределение капель жидкости по размерам на выходе генератора аэрозоля за время эксперимента (10,8 кс)

Рисунок 1 – Стенды для оценки эффективности фильтрации

Стенд обеспечивал создание полидисперсного газожидкостного потока со стабильным распределением капель по размерам во времени (рисунок 1 в), пропускание его через исследуемый фильтроэлемент, измерение перепада давления на нем, оценки эффективности фильтрации жидкой фазы по размерам частиц и объемов отфильтрованной жидкости на входе и выходе фильтроэлемента. В экспериментах исследовали процессы фильтрации аэрозолей воды, смеси аэрозолей воды и диоктилтерефталата (ГОСТ 8728-88), воды и керосина (ГОСТ 18499), моделирующие характерные загрязнения газов.

Эффективность фильтрации газожидкостных потоков оценивалась по перепаду давления на фильтре ΔP , массовой концентрации жидкости и

распределению капель по размерам на выходе, а также по коэффициенту эффективности E фильтрации частиц определенного размера:

$$E = \left(1 - \frac{m_{\text{ВЫХ}}}{m_{\text{ВХ}}}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $m_{\text{ВХ}}$, $m_{\text{ВЫХ}}$ – массовая концентрация капель аэрозоля определенного размера на входе и выходе исследуемого образца соответственно.

Комплексная оценка фильтров-коалесцеров осуществлялась по коэффициенту качества QF , определяемого по основным показателям – эффективности фильтрации и перепаду давления:

$$QF = \frac{-\ln(m_{\text{ВЫХ}}/m_{\text{ВХ}})}{\Delta P}. \quad (2)$$

Параметр QF характеризует долю задержанной на фильтре жидкости, приходящуюся на единицу перепада давлений – чем больше эта величина, тем выше производительность фильтра и качество отделения жидкости из газа. Параметр не имеет верхних и нижних границ и использовался только для сравнения свойств материалов при одинаковых условиях испытаний.

Изучение дренажных характеристик ВПМ осуществляли путем регистрации зависимости массы стекающей жидкости из пористого образца от времени и анализа полученных данных на основе разработанной модели.

Численную обработку результатов экспериментов осуществляли стандартными статистическими методами.

Третья глава содержит результаты исследований по определению режимов формирования ВПМ путем газодинамической вытяжки и пневмоэкструзии из расплава, обеспечивающих заданные фильтрационные характеристики, изучению структурно-морфологических особенностей ВПМ, методов их комбинирования, а также межфазного взаимодействия с жидкой фазой во взаимосвязи с их фильтрационными свойствами.

Исходя из поставленной задачи обеспечения требуемого перепада давления ΔP на фильтре, меньшим в два раза чем у выбранного аналога (стеклобумага Н13), была осуществлена оптимизация пористой структуры (радиуса волокон и диаметра пор) основных исследуемых материалов. Принимая во внимание закон Пуазейля, в соответствии с которым перепад давления на волокнистой среде прямо пропорционален радиусу волокон и обратно пропорционален эквивалентным диаметрам пор, с некоторыми упрощениями, в качестве оценочного параметра оптимизации при условии одинаковых скоростей фильтруемых потоков и небольшой толщины фильтроматериала, использовано следующее соотношение:

$$\frac{r^2}{d^2} \leq \frac{R^2}{2D^2}, \quad (3)$$

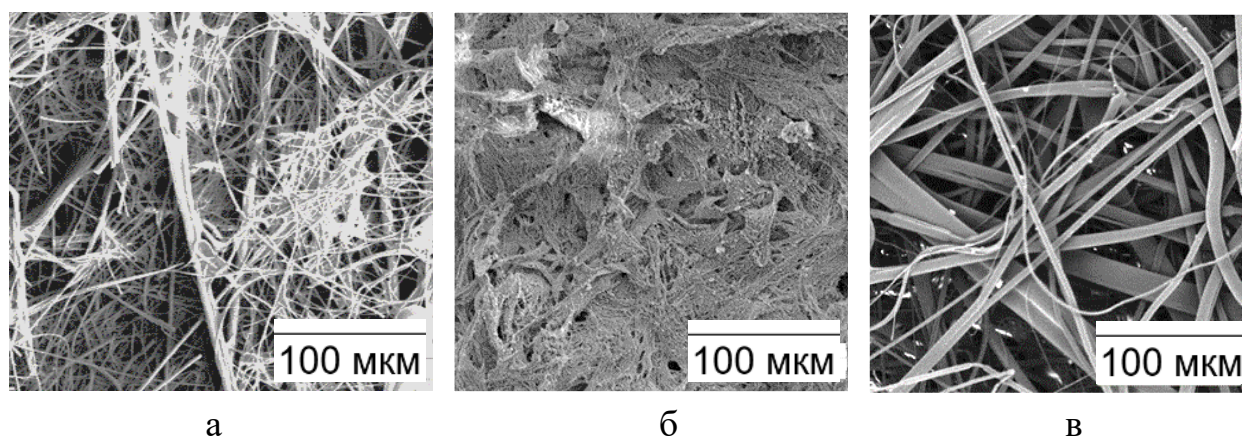
где D, R – средние диаметр пор и радиус волокон стекlobумаги, как основного объекта сравнения; $d=(d_1+d_2)/2$, $r=(r_1+r_2)/2$ – средние значения параметров разрабатываемых материалов в двуслойной комбинации.

С учетом значений R и D для стекlobумаги (1 мкм и 5,3 мкм), удовлетворяющие условию (3) величины требуемых для обеспечения необходимого перепада давления радиусов волокон и диаметров пор r и d двуслойного композиционного материала из полипропилена и политетрафторэтилена («МБ+Гр») были определены диапазонами 2,5–3,5 мкм и 20–35 мкм соответственно.

Экспериментальным путем было определено, что для получения методом газодинамической вытяжки материала «Грифтекс» с требуемыми по условию оптимизации параметрами пористой структуры необходима обработка блочного образца политетрафторэтилена лазерным излучением с длиной волны 10,6 мкм и интенсивностью 600 Вт/см². При этом удастся получить однородный материал средним диаметром пор 21 мкм и диаметром волокон 5,3 мкм.

Структуру ВПМ из полипропилена, изготавливаемого методом аэродинамического распыления расплава, оптимизировали путем варьирования скорости потока воздуха аэродинамической вытяжки волокон, температуры расплава и расстояния до поверхности осаждения. По результатам технологических экспериментов установлено, что получение волокнисто-пористого материала со средним диаметром пор 35 мкм и диаметром волокон около 7,5 мкм обеспечивается при скорости потока 100±10 м/с, температуре расплава 295°C, и расстоянии до поверхности осаждения 0,25 м.

Морфология полученных материалов в сравнении со структурой стекlobумаги представлена на рисунке 2.

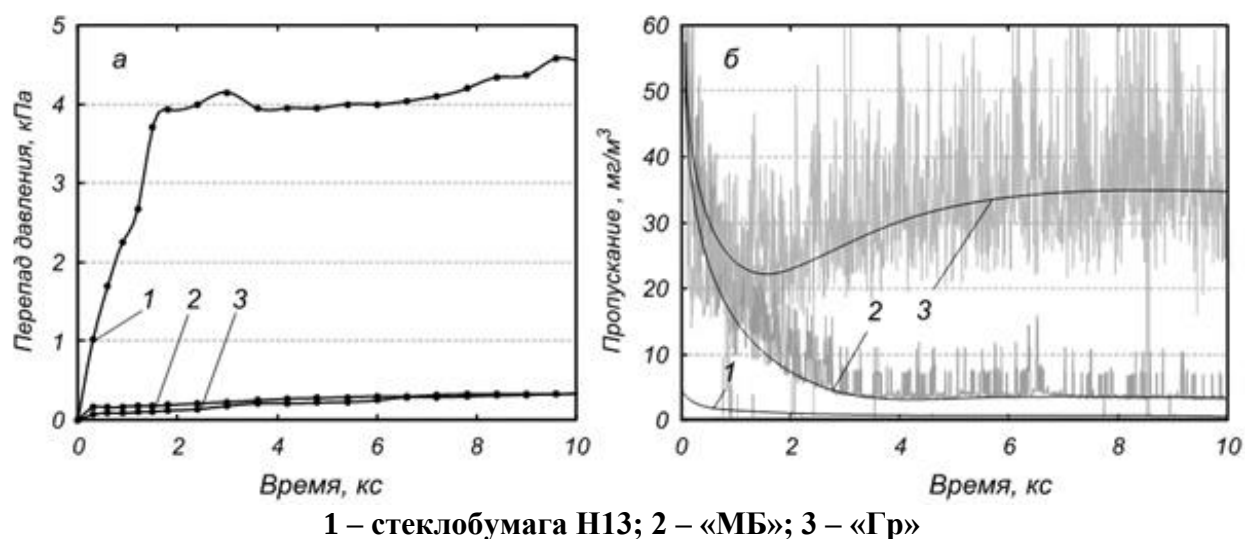


а – стекlobумага Н13; б – «Грифтекс», в – «МБ»

Рисунок 2 – Морфология оптимизированных полимерных ВПМ в сравнении со стекlobумагой

Окончательное определение оптимальных параметров пористой структуры осуществлялось экспериментально, по характеристикам

фильтрации водяного аэрозоля материалами различной поверхностной плотности. Установлено, что принятому критерию по обеспечению перепада давления в 2 раза меньше, чем у аналога из стекlobумаги удовлетворяют материалы с поверхностной плотностью 100–250 г/м² (рисунок 3).

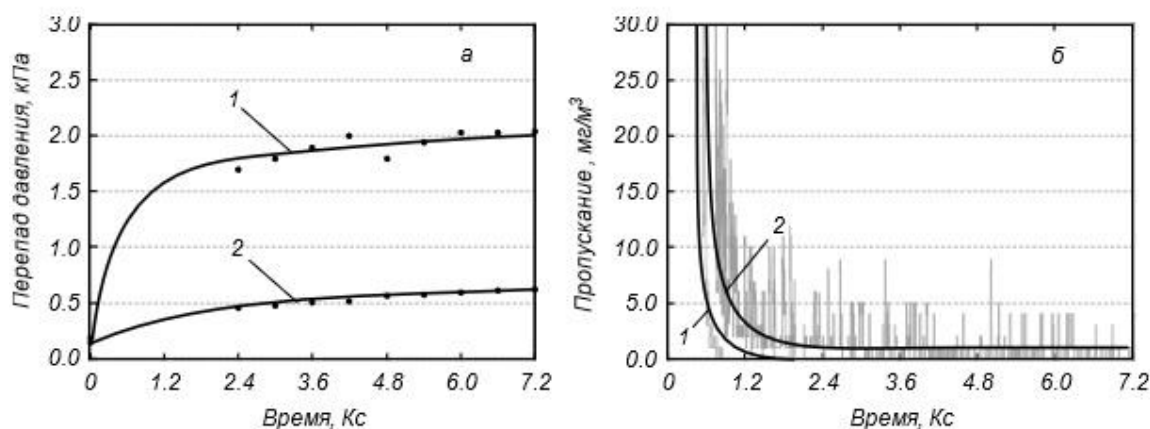


1 – стекlobумага Н13; 2 – «МБ»; 3 – «Гр»
Рисунок 3 – Изменение во времени перепада давления (а) и концентрации жидкости в потоке после фильтра (б) для оптимизированных ВПМ на основе политерафторэтилена («Гр») и полипропилена («МБ») в сравнении со стекlobумагой

Полученные результаты свидетельствуют о достижении требуемого показателя перепада давления (более чем в два раза в сравнении со стекlobумагой) при использовании материалов отдельно и, учитывая линейную зависимость перепада давления от толщины фильтроматериала, этот параметр должен достигаться и при их совмещенном двуслойном варианте использования.

Идея работы связана с предположением, что использование композиционных фильтров из материалов, отличающихся характером межфазного взаимодействия с жидкой фазой, может повысить эффективность фильтрации за счет интенсификации процессов коалесценции на границах контакта фильтроматериалов. Для оценки межфазного взаимодействия использовалась характеристика смачиваемости, количественно определяемой краевым углом смачивания (КУС). Средние значения КУС, измеренные на комплексе «Капля» для воды составили для материала «Грифтекс» 141,5°, а для волокнисто-пористого материала на основе пропилен «МБ» – 113,6°.

С целью определения влияния последовательности расположения ВПМ на эффективность фильтрации на разработанном стенде испытывались комбинации материалов «Гр+МБ»; 2 – «МБ+Гр» (рисунок 4).



**а – перепад давления; б – концентрации жидкости на выходе во времени
1 – «Гр+МБ»; 2 – «МБ+Гр»**

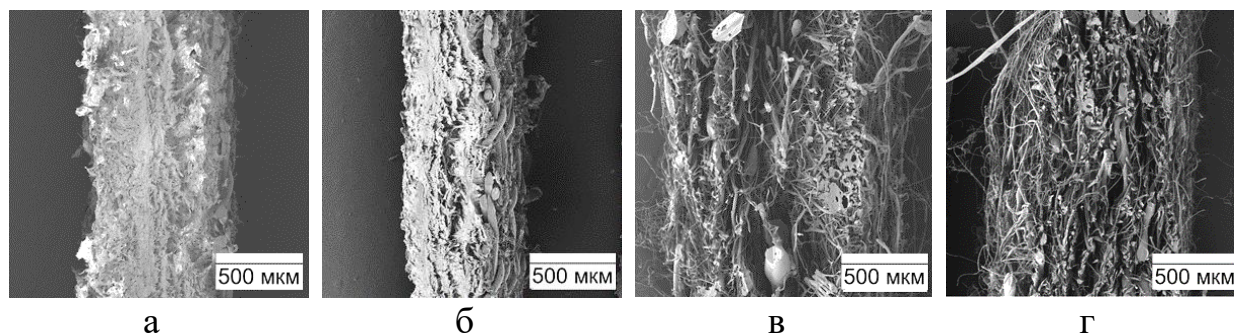
Рисунок 4 – Изменение фильтрационных свойств композитных волокнисто-пористых систем на основе политетрафторэтилена («Гр») и полипропилена («МБ»)

Установлено, что при расположении материалов в порядке «Гр+МБ» до 75% воды задерживается и стекает со стороны входной поверхности материала из фторопласта. Это объясняется низким уровнем поверхностного взаимодействия политетрафторэтилена (Гр) с жидкой фазой, что способствует более эффективной коалесценции капель и увеличению их подвижности на входной поверхности. Пористая структура фильтроэлемента «Гр» фактически «закрывается», что приводит к росту перепада давления в сравнении с комбинацией «МБ+Гр».

Обнаружено, что для снижения перепада давления слои фильтроматериалов должны располагаться в порядке снижения энергии межфазного взаимодействия с жидкостью аэрозоля и находиться в контакте. Сделан вывод, что наблюдаемые отличия обусловлены межфазным взаимодействием ВПМ с жидкой фазой, как при контакте с поверхностью фильтра, так и при течении в объеме пористой структуры двухслойного ВПМ.

Оптимальной признана последовательность ВПМ «МБ+Гр» (полипропилен+политетрафторэтилен), соответствующая уменьшению межфазного взаимодействия материалов фильтроэлемента с фильтруемой средой по ходу потока и обеспечивающая перепад давления 0,5–0,6 кПа, что в 3,5–4 раза превосходит показатели поставленной цели по обеспечению 2-хкратно меньшего перепада давления в сравнении с аналогом из стеклобумаги. Это открыло возможность дальнейшей оптимизации структуры разработанного материала для повышения эффективности фильтрации путем уменьшения размера его пор методом холодного каландрирования.

Исследовали волокнисто-пористый материал на основе полипропилена («МБ») с поверхностной плотностью 120 г/м² и политетрафторэтилена («Гр»), с поверхностной плотностью 230 г/м² при использовании дренажного слоя «ФВП» пористостью 85%. Морфология данных ВПМ приведена на рисунке 5.



**а, б – ВПМ на основе политетрафторэтилена («Гр»),
в, г – ВПМ на основе полипропилена («МБ»)**

Рисунок 5 – Морфология полимерных фильтроматериалов в исходном состоянии (а, в) и после обработки с давлением прессования 1,5 МПа (б, г)

Показано, что, обработкой многослойного ВПМ давлением до 1,0 МПа, возможно уменьшить размер пор в 1,5–2 раза. При этом с увеличением давления прессования эффективность фильтрации и перепад давления возрастает (таблица 1). Установлено, что образцы, полученные при давлении прессования 0,6–1,0 МПа, обеспечивают эффективность отделения жидкости из воздушного потока 99,90–99,97 %.

Таблица 1 – Фильтрационные характеристики «МБ+Гр» в зависимости от давления прессования

Р, МПа	Эффективность фильтрации, %	Перепад давления, кПа	Коэффициент качества	Насыщенность, отн.ед.
0,0	91,46	3,30	0,63	13,8
0,2	98,72	3,03	1,24	20,6
0,6	99,90	5,10	0,99	23,6
1,0	99,97	7,65	0,92	29,0
1,5	99,99	16,89	0,57	32,7

Важное значение в фильтрующем элементе имеет дренажный слой, обеспечивающий эффективный отвод отфильтрованной жидкости и не допускающий образование вторичного аэрозоля. Для оценки его свойств проведены эксперименты по дренажу жидкости из пористого образца по результатам которой разработана теоретическая модель стекания жидкости по внешней поверхности фильтроэлемента, позволяющая связать уменьшение массы жидкости в образце во времени с коэффициентом фильтрации:

$$M(t) = m_0 \sqrt{\frac{1}{1 + \alpha t}} + (m_{10} - m_{\infty}) \exp\left(-\frac{C}{l} t\right) + m_{\infty}, \quad (4)$$

где m_0 , г – начальная масса жидкости на поверхности образца; m_{10} , г – начальная масса жидкости внутри образца; m_{∞} , г – масса, удерживаемая в образце при установившемся режиме; $1/\alpha$, с – время стекания по внешней поверхности; l/C , с – время стекания по внутренней поверхности; C , мм/с – эффективный коэффициент фильтрации; l , мм – длина образца; t , с – время.

Данное уравнение позволяет оценить массу жидкости, остающуюся в дренажном слое и препятствующую эффективному отводу фильтрата. В таблице 2 приведены экспериментальные данные, характеризующие стекание масла ТП-22 для различных волокнисто-пористых материалов дренажного слоя. Максимальный коэффициент фильтрации, характеризующий течение жидкости в объеме материала у «ФВП1», что позволил обосновать использовать его в качестве дренажного слоя.

Таблица 2 – Средние значения параметров стекания масла из дренажных ВПМ

Марка ВПМ	C , мм/с	$1/\alpha$, с	l/C , с	Отн. масса масла, оставшегося в дренажном слое, г/см ²
«ФВП1» (П=77%)	1,86	19,5	101	6,12
«ФВП2» (П=65%)	0,11	14,0	1782	7,85
«ПФС» (П=85%)	0,13	67,4	1413	5,79
«Филарс»	0,20	18,8	997	13,65
«Грифтекс»	0,12	40,9	1358	21,09

Примечание. П – показатель пористости

Полученные результаты позволили реализовать высокоэффективный фильтроэлемент в виде цилиндра с фильтрующим слоем из каландрированного при давлении 0,6 МПа композиционного волокнисто-пористого полимерного материала «МБ+Гр» и дренажного слоя из «ФВП1». Данные комплексных испытаний этого фильтроэлемента на аттестованном стенде испытаний газовых фильтроэлементов, представленные в таблице 3, свидетельствуют о меньшем в 2,0–2,4 раза падении давления на фильтре и большем в 1,9–2,3 раза коэффициенте качества разработанного фильтра в сравнении с аналогом с фильтрующим слоем из стеклобумаги Н13.

Таблица 3 – Сравнение характеристик фильтрующих элементов из «МБ+Гр» и стеклобумаги Н13

Аэрозоль	Е, %		ΔP , кПа		QF	
	«МБ+Гр»	стекл. Н13	«МБ+Гр»	стекл. Н13	«МБ+Гр»	стекл. Н13
Вода	99,87	99,89	3,4±0,1	8,3±0,3	0,49	0,21
Вода+ДОТФ	99,98	99,99	5,0±0,2	10,1±0,2	0,77	0,45
Масляный туман	99,81	99,85	5,5±0,1	12,9±0,3	0,44	0,23

По результатам исследований подана заявка на изобретение «Многослойный полимерный фильтрующий материал для очистки газов и способ его получения» (заявка ВУ 20220136 от 22.05.2022).

На основании проведенных исследований выдвинута концепция многослойной фильтрующей среды (таблица 4), в которой каждый слой ВПМ реализует индивидуальную функцию, и эти функции в системе взаимно дополняются.

Таблица 4 – Концепция создания многослойной фильтрующей среды

Требование	Ожидаемый результат
Наличие более чем одного слоя ВПМ	Создание межфазных границ, на которых происходит перепад давления потока, что инициирует коалесценцию загрязнений
Наличие градиента пористости в фильтрующих слоях со снижением в направлении движения воздушного потока	Снижение перепада давления и насыщенности фильтрующей среды, последовательная реализация очистки
Наличие разницы в межфазных взаимодействиях каждого ВПМ с жидкой фазой	Обеспечение различного характера межфазного взаимодействия ВПМ с жидкой фазой по толщине ВПС
Наличие высокопористых слоев	Защита коалесцентных слоев от механических примесей и повреждений, эффективный дренаж

На основании предложенной концепции создан ряд многослойных полимерных фильтроматериалов для решения практических задач на ряде промышленных предприятий.

В четвертой главе приведены результаты решения практических задач по высокоэффективной сепарации газожидкостных потоков с использованием разработанных волокнисто-пористых материалов и технических решений.

В рамках импортозамещения для Белорусского газоперерабатывающего завода РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» (г. Речица) разработан и успешно внедрен фильтроэлемент «Гриф-Р» (ЭФВП-Г-0,3-(152-100-1016)-КО-21) входных сепараторов компрессорных линии М-201/1, М-201/2, М-201/3. По результатам опытно-промышленных испытаний фильтроэлемент на основе каландрированной многослойной волокнисто-пористой системы политетрафторэтилен/полипропилен в качестве коалесцентного слоя и «ФВП1» – дренажного, обеспечивал до трех раз больший технический ресурс при высокой эффективности фильтрации и в 2 раза меньшем перепаде давления. Для целей промышленного внедрения разработаны технические условия (ТУ 490321557.001-2017), в соответствии с которыми выпущено 368 фильтроэлементов данного типа.

Для ОАО «Газпром трансгаз Беларусь» на базе разработанной многослойной полимерной волокнисто-пористой системы политетрафторэтилен/полипропилен реализовано техническое решение по замене фильтрующего элемента влагомаслоотделителя, эксплуатируемого на автомобильной газонаполнительной компрессорной станции «Минск-3». По результатам испытаний внедрение разработки обеспечило 100% эффективность очистки загрязнений более 5 мкм при перепаде давления в 2 раза меньше ранее использованного порошкового фильтра.

Осуществлено внедрение результатов работы при модернизации двух вертикальных газовых сепараторов скважинного природного газа с большим

содержанием жидкости и высоким значением скорости потока на газодобывающем предприятии АО «Ачимгаз» (Россия), обеспечившее снижение содержания жидкости в отфильтрованном потоке с 12,2 и 16,4 до 4,8 и 7,4 мг/м³, соответственно, при увеличении производительности сепаратора на 40%.

Решена проблема очистки двуокиси углерода в процессе производства карбамидно-аммиачной смеси на ОАО «Гродно Азот» от аэрозоля масла, попадающего в поток в процессе компримирования газа поршневым компрессором 4ГМ16-100/200. Применена комбинация волокнисто-пористых материалов коалесцентных слоев «Грифтекс» и стекlobумаги Н13 и дренажного «ФВП1». Внедрение разработки обеспечило снижение содержания масла в растворе в 2 раза, что позволило повысить качество и экспортный потенциал производимого карбамидного удобрения.

Проведена апробация применимости концепции многослойной фильтрующей среды из комбинаций ВПМ для решения задачи по преодолению распространения бактериально-вирусных инфекций в составе средств индивидуальной защиты органов дыхания. Исследовали экспериментальные образцы, сформированные из многослойного волокнисто-пористого материала на основе: «МБ», «Грифтекс», «Фибан-V» (ИФОХ НАН Беларуси), «СпанБел» (ООО «СветлогорскХимволокно»). Испытания, проведенные в РУП «Научно-практический центр гигиены», показали, что данный композиционный материал обеспечивает эффективность бактериальной фильтрации 99,9 %, что находится на уровне наиболее высоких показателей фильтроматериалов класса FFP3. Полученные результаты подтверждают перспективность концепции многоуровневой фильтрующей среды.

Всего с использованием результатов работы выполнено хозяйственных договоров и привлечено в бюджет Республики Беларусь 1 229 800 бел. руб. и 10 млн. 424 тыс. рос. руб., из которых долевое участие соискателя составило 614 900 бел. руб. и 5 млн. 212 тыс. рос. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана экспериментальная установка и методика исследования фильтрации аэрозолей воздух/жидкость пористыми полимерными системами, позволяющая дифференцированно определять эффективность фильтрации жидкой фазы по размерам капель от 0,3 до 10,0 мкм, оценивать объемы жидкости, отделенной на поверхности входа и выхода потока и перепад давления на фильтроматериале [2, 3, 16].

2. Обнаружено, что в двуслойных волокнисто-пористых материалах, расположенных в соответствии с уменьшением межфазного взаимодействия с жидкой фазой аэрозоля по ходу потока, уменьшается насыщенность фильтрующего материала жидкостью, что обеспечивает при соизмеримых показателях эффективности фильтрации в 1,5–2 раза меньший перепад давления в сравнении с их обратным расположением [2, 7].

3. Экспериментально определены оптимальные технологические параметры формирования волокнисто-пористых материалов методом газодинамической вытяжки фторопласта лазером в вакууме, соответствующие обработке излучением с длиной волны 10,6 мкм и интенсивностью 600 Вт/см², и методом аэродинамического распыления полипропилена, производимого при температуре расплава 295 °С и скорости воздушного потока 100±10 м/с, позволяющих получать материалы со средним диаметром волокон 5,3 и 7,5 мкм, пористостью 85 % и 90 %, средним размером пор 21 и 35 мкм и углами смачивания 141–143° и 112–115° соответственно, обеспечивающие в комбинации фильтрацию аэрозолей воды с эффективностью до 99,9% [5, 8, 19, 21].

4. Разработан многослойный волокнисто-пористый фильтрующий материал из волокон фторполимера и полипропилена, для которого определены параметры оптимизации пористой структуры методом холодного каландрирования при давлении 0,6–1,0 МПа, обеспечивающие уменьшение размера пор в 1,5–2,0 раза и увеличение эффективности отделения жидкости до 99,90–99,97% при перепаде давления в насыщенном состоянии в 2,0–2,4 раза меньше, чем у известных аналогов [5, 24].

5. Разработана теоретическая модель дренажа, рассматривающая процессы стекания жидкости по внешней поверхности и в объеме волокнисто-пористого материала, позволяющая связать уменьшение массы жидкости в образце во времени с коэффициентом фильтрации, что позволило оценивать эффективность применения материала в качестве дренажного слоя для данной жидкости [1, 10, 11, 12, 15].

6. Получены результаты опытно-промышленной апробации разработанной конструкции газового сепаратора с композиционным многослойным фильтром, обеспечившего уменьшение в 2,2–2,5 раза содержания жидкости в очищенном газе после модернизации на газодобывающем предприятии АО «Ачимгаз», предложенных конструкций многослойных фильтроэлементов, показавших при эксплуатации на Белорусском газоперерабатывающем заводе РУП «Производственное объединение «Белоруснефть» в сепараторах установок компримирования попутного газа технологический ресурс в 3 раза выше замененного импортного аналога, а также в сепараторах очистки двуокиси углерода при производстве карбамида-аммиачной смеси на ОАО «Гродно Азот», обеспечивших снижение

содержания масла в растворе карбамида с 18 до 9 мг/м³ [6, 17, 20, 23, 26].

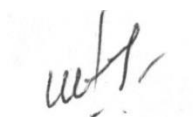
7. Применимость предложенной концепции создания многослойной фильтрующей среды продемонстрирована при экспериментальной разработке многослойного фильтрующего материала, содержащего волокнисто-пористые фторопласт, полипропилен, и ионообменный «Фибан-V», на котором достигнута эффективность бактериальной фильтрации 99,9%, что создает перспективы решения с помощью подобных слоистых структур важной социальной проблемы профилактики бактериально-вирусных инфекций [4, 9, 18, 22, 25].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Рекомендовано использование разработанных высокоэффективных многослойных полимерных волокнисто-пористых материалов на основе полипропилена и политетрафторэтилена для решения задач по импортозамещению фильтроэлементов на базе стеклобумаги. Созданные фильтроматериалы можно использовать в составе газотранспортного оборудования, установок компримирования технологических газов и сжатых рабочих сред на предприятиях ОАО «Газпром трансгаз Беларусь», концерна «Белнефтехим» и Министерства промышленности Республики Беларусь.

Материалы могут эксплуатироваться при температурах от – 30 до + 85 и скоростях потоков до 0,2 м/с, обеспечивая эффективность фильтрации капельных аэрозолей воды и жидких углеводородов в 99,90–99,97%, при перепаде давления на фильтроэлементе в 2 раза меньшем и технологическом ресурсе до 3 раз большем в сравнении с аналогами из стеклобумаги.

Соискатель:



В.Ю. Шумская

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах

1. Влияние структуры пористых материалов на их самоочистку от жидкой фазы / В. Ю. Шумская, С. Ф. Жандаров, Л. А. Калинин, Л. Ф. Иванов, В. В. Снежков, А. Н. Егоров, П. Н. Гракович // Полимерные материалы и технологии. – 2018. – Т. 4, № 4. – С. 52–62.
2. Шумская, В. Ю. Фильтрация водных аэрозолей композитными волокнисто-пористыми системами на основе полипропилена и политетрафторэтилена / В. Ю. Шумская, А. Я. Григорьев // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 2. – С. 39–47.
3. Шумская, В. Ю. Оценка влияния последовательности расположения функциональных слоев волокнисто-пористых материалов в композиционных фильтроэлементах на характер и эффективность отделения жидкости из газовых потоков / В. Ю. Шумская, А. Я. Григорьев // Композиционные материалы. – 2021. – № 2. – С. 146–150.
4. Тенденции и перспективы использования полимерных волокнисто-пористых фильтров в составе средств индивидуальной защиты органов дыхания для предупреждения вирусной инфекции Covid-19 / В. Ю. Шумская, П. Н. Гракович, С. В. Зотов, В. М. Шаповалов, А. Я. Григорьев // Полимерные материалы и технологии. – 2022. – Т. 8, № 3. – С. 6–23.
5. Шумская, В. Ю. Влияние холодного каландрирования на структуру и фильтрационные характеристики волокнисто-пористых систем «политетрафторэтилен-полипропилен» / В. Ю. Шумская, В. В. Снежков, А. Я. Григорьев // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2023. – № 2. – С. 22–38.

Статьи в сборниках трудов и материалов конференций

6. Шумская, В. Ю. Повышение эффективности газового сепаратора с многослойными волокнисто-пористыми фильтрующими элементами / В. Ю. Шумская // Транспорт и хранение углеводородов : материалы I международной науч.-техн. конф. для молодых учёных, Омск, 7 сентября 2020 г. / Минобрнауки России, ОмГТУ ; редкол.: Ю.А. Краус [и др.]. – Омск, 2020. – С. 6–8.
7. Шумская, В. Ю. Эффективность разделения газожидкостных потоков двуслойными волокнисто-пористыми полимерными фильтрами / В. Ю. Шумская, А. Я. Григорьев // Композиционные и металлополимерные материалы для различных отраслей промышленности и сельского хозяйства : сборник докладов и тезисов международной Узбекско-Белорусской науч.-техн. конф., Ташкент, 21–22 мая 2020 г. / ТГТУ им. И. Каримова ; редкол.: С. С. Негматов [и др.]. – Ташкент, 2020. – С. 14–19

8. Формирование пористых слоёв политетрафторэтилена путём лазерной абляции / П. Н. Гракович, Л. Ф. Иванов, Л. А. Калинин, Я. А. Ковалёва, В. М. Макаренко, В. Ю. Шумская, Е. М. Толстопятов // Взаимодействие излучений с твердым телом : материалы 14-й междунар. конф., Минск, 21–24 сентября 2021 г. / БГУ ; редкол.: В. В. Углов [и др.]. – Минск, 2021. – С. 47–51.

9. Возможности физического модифицирования полимерных волокнистых материалов для комбинированных фильтров в средствах индивидуальной защиты органов дыхания / В. Ю. Шумская, С. В. Зотов, П. Н. Гракович, В. М. Шаповалов // Новые материалы и технологии в условиях Арктики : материалы V междунар. конф. с элементами научной школы, Якутск, 14–18 июня 2022 г. / Северо-Восточный федеральный университет ; редкол.: А. А. Охлопкова [и др.]. – Якутск, 2022. – С. 249–251.

Тезисы докладов конференций

10. Шумская, В. Ю. Изучение процесса вытекания масла из волокнисто-пористых материалов / В. Ю. Шумская, Л. А. Калинин, В. В. Снежков // Полимерные композиты и трибология: междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 23–26 июня 2015 г. : тез. докл. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 152.

11. Шумская, В. Ю. Рациональный подход к выбору фильтрующих волокнисто-пористых материалов / В. Ю. Шумская, Л. А. Калинин // Новые функциональные материалы : IV республ. науч.-техн. конф. молодых ученых, Гомель, 10–11 ноября 2016 г. : тез. докл. / ИММС НАН Беларуси; сост.: В. В. Шевченко. – Гомель, 2016. – С. 51.

12. Шумская, В. Ю. Изучение влияния структуры и свойств волокнисто-пористых материалов на эксплуатационные характеристики фильтро-элементов / В. Ю. Шумская, Л. А. Калинин // Полимерные композиты и трибология : междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 27–30 июня 2017 г. : тез. докл. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2015. – С. 108.

13. Шумская, В. Ю. Изучение фильтрационных характеристик пористых слоев многослойных пористых систем / В. Ю. Шумская // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : V республ. науч.-техн. конф. молодых ученых, Гомель, 12–14 ноября 2018 г. : тез. докл. / ИММС НАН Беларуси ; сост.: А. А. Тимофеев. – Гомель, 2018. – С. 57.

14. Функциональные волокнисто-пористые материалы для систем фильтрации / В. Ю. Шумская, Л. А. Калинин, Л. Ф. Иванов, В. В. Снежков // Полимерные композиты и трибология : междунар. науч.-техн. конф., Гомель,

25–28 июня 2019 г.: тез. докл. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2019. – С. 133.

15. Шумская, В. Ю. Влияние методов модифицирования полимерных волокнисто-пористых материалов на сорбционные свойства / В. Ю. Шумская, В. И. Жукалов // Полимерные композиты и трибология : междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 25–28 июня 2019 г.: тез. докл. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2019. – С. 132.

16. Шумская, В. Ю. Установка и методика оценки селективных характеристик волокнисто-пористых материалов медицинских масок при фильтровании воздушно-капельных потоков / В. Ю. Шумская // Молодежь в науке – 2020 : XVII междунар. научн. конф., Минск, 22–25 сентября 2020 г.: тез. докл. / Нац. акад. наук Беларуси ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2020. – С. 469–472.

17. Шумская, В. Ю. Отделение воды и углеводородной жидкости многослойными волокнисто-пористыми системами / В. Ю. Шумская // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : VI республ. науч.-техн. конф. молодых ученых посвящённая памяти члена-корреспондента НАН Беларуси С. С. Песе́цкого, Гомель, 9–11 ноября 2020 г.: тез. докл. / ИММС НАН Беларуси ; сост.: А. С. Тулейко. – Гомель, 2020. – С. 131.

18. Шумская, В. Ю. Многослойные фильтрующие системы для средств антибактериальной и противовирусной защиты органов дыхания / В. Ю. Шумская // Актуальные вопросы физики и техники : X республ. науч. конф. студентов, магистрантов, аспирантов, Гомель, 22 апреля 2021 г.: тез. докл. : Ч. 1 / М-во образования Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: Д. Л. Коваленко (гл. ред.) [и др.]. – Гомель, 2021. – С. 219–223.

19. Шумская, В. Ю. Оценка пористой структуры волокнисто-пористых фильтроматериалов / В. Ю. Шумская // Молодежь в науке – 2021 : XVIII междунар. конф. молодых ученых, Минск, 27–30 сентября 2021 г.: тез. докл. : Ч. 2 / Нац. акад. наук Беларуси ; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2021. – С. 329–332.

20. Шумская, В. Ю. Очистка от загрязнений смазочным маслом компримированного CO_2 при производстве карбамида / В. Ю. Шумская, П. Н. Гракович, С. Ф. Жандаров // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ – 2022) : междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 28–30 июня 2022 г.: тез. докл. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2022. – С. 43.

21. Лазерная абляция допированного политетрафторэтилена / Е. М. Толсто́пят, Л. А. Калинин, Л. Ф. Иванов, В. Ю. Шумская //

Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ – 2022) : междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 28–30 июня 2022 г. : тез. докл. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2022. – С. 29.

22. Шумская, В. Ю. Модифицирование полимерных волокнисто-пористых материалов и многоуровневая фильтрующая среда / В. Ю. Шумская // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : VII республ. науч.-техн. конф. молодых ученых, Гомель, 18–20 октября 2022 г. : тез. докл. / ИММС НАН Беларуси ; сост.: В. Ю. Шумская [и др.]. – Гомель, 2022. – С. 57–59.

Патенты на изобретение

23. Сепаратор для очистки газа : пат. RU 2729572C1 / О. А. Приймак, Н. В. Мневeц, Л. Б. Галдина, Д. О. Приймак, В. В. Снежков, С. И. Гузенков, А. В. Шибанов, М. В. Иванова, В. Ю. Шумская. – Оpubл. 07.08.2020.

Заявки на изобретение

24. Многослойный полимерный фильтрующий материал для очистки газов и способ его получения : заявка ВУ 20220136 / В. Ю. Шумская, В. В. Снежков, Л. Ф. Иванов, А. Я. Григорьев. – Оpubл. 26.05.2022.

25. Многослойный полимерный волокнисто-пористый материал с многоуровневой фильтрующей средой для защиты от бактериальных загрязнений : заявка ВУ 20230012 / В. Ю. Шумская, С. В. Зотов, П. Н. Гракович, В. М. Шаповалов, А. Я. Григорьев, А. В. Бильдюкевич, А. П. Поликарпов. – Оpubл. 06.01.2023.

Технические условия

26. Элементы фильтрующие волокнисто-пористые ЭФВП. Технические условия : ТУ 490321557.001-2017. – Введ. 08.04.2022. – Минск : БелГИСС, 2022. – 22 с.

РЕЗЮМЕ

Шумская Виктория Юрьевна

Повышение эффективности волокнисто-пористых многослойных полимерных фильтроматериалов для газотранспортного оборудования

Ключевые слова: фильтрация, аэрозоли жидкостей, полимерные волокнисто-пористые материалы, полипропилен, политетрафторэтилен, грифтекс, межфазное взаимодействие, эффективность фильтрации, каландрирование, фильтрующие элементы, сепараторы.

Цель работы: установление закономерностей влияния пористой структуры волокнисто-пористых материалов и их межфазного взаимодействия с жидкой фазой на фильтрующие свойства многослойных композиционных волокнисто-пористых систем из разнородных полимеров и разработка на этой основе высокоэффективных фильтроэлементов с низким перепадом давления.

Методы исследования: растровая электронная микроскопия, газожидкостная порометрия, измерение краевых углов смачивания, методики определения эффективности фильтрации и дренажной способности.

Полученные результаты и их новизна: разработаны экспериментальная установка и методика, позволяющая определять эффективность фильтрации газожидкостных потоков пористыми полимерными системами. Установлено, что в многослойных фильтрах, при расположении слоев волокнисто-пористых материалов в соответствии с уменьшением межфазного взаимодействия с жидкостью по ходу потока, обеспечивается сохранение показателей эффективности фильтрации при в 2 раза меньшем перепаде давления по сравнению с их обратным расположением. Определены оптимальные технологические параметры формирования волокнисто-пористых материалов методами газодинамической вытяжки фторопласта и аэродинамического распыления полипропилена. Предложена теоретическая модель дренажа, связывающая уменьшение массы жидкости в образце во времени с коэффициентом фильтрации, позволяющая обосновано осуществлять выбор материала дренажного слоя фильтра. Разработан многослойный фильтр и проведена оптимизация его пористой структуры. Обеспечено увеличение эффективности отделения жидкости в многослойных фильтрах до 99,90–99,97% при перепаде давления в 2,0–2,4 раза меньше, чем у известных аналогов. Проведена опытно-промышленная апробация разработанной конструкции газового сепаратора и новых многослойных газовых фильтров. Новизна результатов состоит в установлении взаимосвязи пористой структуры многослойных волокнисто-пористых материалов и их межфазного взаимодействия с жидкостью, позволяющая повысить эффективность фильтрации газожидкостных потоков.

Область применения: оборудование газотранспортного комплекса, установки компримирования газов в промышленности, защита органов дыхания.

РЭЗІЮМЭ

Шумская Вікторыя Юр'еўна

Павышэнне эфектыўнасці валакніста-порыстых шматслойных палімерных фільтраматэрыялаў для газатранспартнага абсталявання

Ключавыя словы: фільтраванне, палімерныя валакнёва-порыстыя матэрыялы, шклопаперы, поліпрапілен, політэтрафторэтылен, грыфтэкс, каландраванне, эфектыўнасць фільтрацыі, каэфіцыент якасці, насычанасць, аэразолі, фільтруючыя элементы, сепаратары.

Мэта працы: устанаўленне заканамернасцяў уплыву порыстай структуры валакніста-порыстых матэрыялаў і іх міжфазнага ўзаемадзеяння з вадкай фазай на фільтруючыя ўласцівасці шматслойных кампазіцыйных валакніста-порыстых сістэм з разнастайных палімераў і распрацоўка на гэтай аснове высокаэфектыўных фільтраэлементаў з нізкім перападам ціску.

Метады даследавання: растрвая электронная мікраскапія, газа-вадкасная параметрыя, вымярэнне краявых кутаў змочвання, метадыкі вызначэння эфектыўнасці фільтрацыі і дрэнажнай здольнасці.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны эксперыментальная ўстаноўка і метадыка, якія дазваляюць вызначаць эфектыўнасць фільтрацыі газавадкасных патокаў порыстымі палімернымі сістэмамі. Устаноўлена, што ў шматслаёвых фільтрах, пры размяшчэнні пластоў валакніста-порыстых матэрыялаў у адпаведнасці з памяншэннем міжфазнага ўзаемадзеяння з вадкасцю па ходзе патоку, забяспечваецца захаванне паказчыкаў эфектыўнасці фільтрацыі пры ў 2 разы меншым перападзе ціску ў параўнанні з іх зваротным размяшчэннем. Вызначаны аптымальныя тэхналагічныя параметры фарміравання валакніста-порыстых матэрыялаў метадамі газадынамічнай выцяжкі фтарапласту і аэрадынамічнага распылення поліпрапілена. Прапанавана тэарэтычная мадэль дрэнажу, якая злучае памяншэнне масы вадкасці ва ўзоры ў часе з каэфіцыентам фільтрацыі, якая дазваляе абгрунтавана ажыццяўляць выбар матэрыялу дрэнажнага пласту фільтра. Распрацаваны шматслаёвы фільтр і праведзена аптымізацыя яго порыстай структуры. Забяспечана павелічэнне эфектыўнасці аддзялення вадкасці ў шматслаёвых фільтрах да 99,90-99,97% пры перападзе ціску ў 2,0-2,4 разы меншым, чым у вядомых аналагаў. Праведзена доследна-прамысловая апрацацыя распрацаванай канструкцыі газавога сепаратара і новых шматслойных газавых фільтраў. Навізна вынікаў складаецца ва ўстанаўленні ўзаемасувязі порыстай структуры шматслаёвых валакніста-порыстых матэрыялаў і іх межфазнага ўзаемадзеяння з вадкасцю, якая дазваляе павысіць эфектыўнасць фільтравання газжыдкастных струменяў.

Вобласць ужывання: абсталяванне газатранспартнага комплексу, устаноўкі кампрэміравання газаў у прамысловасці, абарона органаў дыхання.

SUMMARY

Shumskaya Viktoryia

Improving the efficiency of fibrous-porous multilayer polymer filtering materials for gas transmission equipment

Keywords: filtration, polymeric fibrous-porous materials, glass paper, polypropylene, polytetrafluoroethylene, Griftex, calendering, filtration efficiency, quality factor, saturation, aerosols, filter elements, separators.

The purpose of the work: establishment of regularities of influence of the porous structure of fibrous-porous materials and their interfacial interaction with the liquid phase on the filtering properties of multilayer composite fibrous-porous systems of dissimilar polymers and development on this basis of highly efficient filter elements with low pressure drop.

Research methods: scanning electron microscopy, gas-liquid porosimetry, measurement of wetting angles, methods for determining the filtration efficiency and drainage capacity.

The results obtained and their novelty:

An experimental setup and a technique were developed to determine the efficiency of filtration of gas-liquid flows by porous polymer systems. It has been established that in multilayer filters, when layers of fibrous-porous materials are arranged in accordance with a decrease in interfacial interaction with the liquid along the flow, filtration efficiency indicators are maintained at 2 times lower pressure drop compared to their reverse arrangement. The optimal technological parameters for the formation of fibrous-porous materials were determined by the methods of gas-dynamic drawing of fluoroplast and aerodynamic spraying of polypropylene. A theoretical model of drainage is proposed, which relates the decrease in the mass of liquid in a sample over time with the filtration coefficient, which makes it possible to reasonably select the material of the filter's drainage layer. A multilayer filter has been developed and its porous structure has been optimized. An increase in the efficiency of liquid separation in multilayer filters up to 99.90–99.97% was provided at a pressure drop 2.0–2.4 times less than that of known analogues. Pilot testing of the developed design of the gas separator and new multilayer gas filters was carried out. The novelty of the results lies in establishing the relationship between the porous structure of multilayer fibrous-porous materials and their interfacial interaction with liquid, which makes it possible to increase the efficiency of filtration of gas-liquid flows.

Scope: gas transportation complex equipment, gas compression plants in industry, respiratory protection.

Научное издание

Шумская Виктория Юрьевна

**Повышение эффективности волокнисто-пористых многослойных
полимерных фильтроматериалов
для газотранспортного оборудования**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук
по специальности 05.16.09 – «Материаловедение (машиностроение)»

Подписано в печать 11.10.2023 г. Формат бумаги 60×84 1/16.
Бумага офсетная №1. Гарнитура Таймс. Напечатано на ризографе.
Усл. Печ. Л. 1,4. Тираж 60 экз. Зак. № 08-23

ИММС НАН Беларуси, 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32А
Свидетельство о государственной регистрации издателя
№1/244 от 25.03.14