# ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «Новосибирский государственный технический университет»

# Мик Иван Александрович

# ФИЛЬТРУЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ НА ОСНОВЕ НАНОВОЛОКНИСТОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

## Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

Ларичкин В.В.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Перечень основных сокращений и обозначений	5
ВВЕДЕНИЕ	8
1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ФИЛЬТІ МАТЕРИАЛОВ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АППАРАТАХ ОЧИСТКИ ВОЗД АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ	(УХА ОТ
1.1 Постановка задачи	17
1.2 Анализ существующих проблем высокоэффективной очистки возду аэрозольных частиц	
1.3 Перспективные методы формования высокоэффективных фильтрук	-
1.4 Обзор методов и проблем электроформования толстослойных волок материалов и технических средств их решения	книстых
1.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1	29
2 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОМБИНИРОВАННОГО ФИЛЬТРУІ ЭЛЕМЕНТА	,
2.1 Постановка задачи	30
2.2 Геометрические и массовые параметры фильтрующего элемента	31
2.3 Расчёт характеристик фильтрования комбинированного фильтрующ элемента	
2.4 Представление модели комбинированного фильтрующего элемента.	37
2.5 Оптимальные параметры каркасных волокон фильтрующего элемен	та39
2.6 Расчёт параметров формования оптимально-профилированного комбинированного фильтрующего элемента	44
2.7 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2	52

З ПОДБОР СЫРЬЕВОИ КОМПОЗИЦИИ И ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ЗАРЯДК ПОРИСТОГО ДИЭЛЕКТРИКА В ПРОЦЕССЕ ФОРМОВАНИЯ	
3.1 Постановка задачи	. 53
3.2 Технология формования комбинированного фильтрующего элемента	. 54
3.2.1 Процесс получения комбинированного фильтрующего элемента	. 54
3.2.2 Подбор наиболее эффективной сырьевой композиции	. 56
3.3 Измерительный стенд	. 59
3.4 Методика измерения потенциала поверхности материала фильтрующего элемента	. 61
3.5 Измерение характерных времен процесса естественного стока заряда с материала фильтрующего элемента	. 63
3.6 Методика измерения заряда материала фильтрующего элемента путем интегрирования импульса тока	. 67
3.7 Динамика разрядки материала фильтрующего элемента на больших времена	
3.8 Способ ускоренной разрядки фильтрующего элемента	. 76
3.9 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3	. 78
4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА	. 79
4.1 Постановка задачи	. 79
4.2 Способ формования и материалы	. 79
4.3 Разработка аппаратной части технологии формования комбинированных воздушных фильтрующих элементов	. 84
4.3.1 Разработка станка формования комбинированных фильтрующих элементо	
4.3.2 Разработка аппарата «Электроспиннер»	. 86
4.3.3 Разработка аппарата «Каретка»	. 87

4.3.4 Управление режимом работы опытного станка формования
комбинированных фильтрующих элементов93
4.3.5 Условия эксплуатации опытного станка формования комбинированных
фильтрующих элементов
4.4 Методика измерения эффективности фильтрования комбинированного
фильтрующего элемента
4.5 Ресурсные испытания комбинированного фильтрующего элемента 101
4.6 Сравнение модели и эксперимента
4.6.1 Эксплуатация фильтрующего элемента на табачном загрязнителе 108
4.6.2 Апробация физико-математической модели на данных ресурсных испытаний
4.7 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4117
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК
Приложение А. Анализ полимеров с помощью ИКФС
Приложение Б. Акт внедрения
Приложение В. Акт внедрения

# Перечень основных сокращений и обозначений

АШП – аналого-цифровой преобразователь

БРС – быстроразъемное соединение

ГА – генератор аэрозоля

ДМФА – N,N-диметилформамид

ИВН – источник высокого напряжения

ИКФС – инфракрасная Фурье спектрометрия

ИТ – инфракрасная термография

ММ – молекулярная масса

МНК – метод наименьших квадратов

ОМ – оптическая микроскопия

ПА – полиамид

ПВП – поливинилпирролидон

ПВХ – поливинилхлорид

ПДК – предельно допустимая концентрация

ПП – полипропилен

РРГ — регулятор расхода газа

САПР — система автоматизированного проектирования

СВМПЭ - сверхвысокомолекулярный полиэтилен высокой плотности

СЭМ — сканирующая электронная микроскопия

ФП – фильтрующий элемент Петрянова-Соколова

 $T_{\text{плав}}$  — температура плавления

динамическая вязкость воздуха, Па·с

Р – пористость материала, %

 $\mathbf{d}_{\text{пп}}$  — диаметр ПП волокон, м

d<sub>па</sub> – диаметр волокон ПА, м

 $d_{_{\!\scriptscriptstyle H}}$  — диаметр частицы, м

d<sub>Ф</sub> – толщина фильтрующего элемента, м

**d** внешний диаметр фильтрующего элемента, м

 $\mathbf{d}_{\mathtt{BHVTD}}$  — внутренний диаметр фильтрующего элемента, м

 $V_{\Phi}$  — объем фильтрующего элемента, м<sup>3</sup>

 $S_{\Phi}$  — средняя площадь поверхности фильтрующего элемента, м<sup>2</sup>

t — время формования фильтрующего элемента, с

 ${\rm M_{\pi\pi}}$  — масса фильтрующего элемента (ПП в фильтрующем элементе), г

 $V_{\text{ппв}}$  — объем ПП волокон в фильтрующем элементе, м<sup>3</sup>

 $S_{\Pi\Pi B}$  — площадь поверхности ПП волокон в фильтрующем элементе, мм<sup>2</sup>

 $\mathrm{KS}_{\pi\pi}$  — отношение площади ПП волокон к поверхности фильтрующего элемента

 $\mathbf{M}_{\mathsf{пав}}$  — масса ПА волокон в фильтрующем элементе, г

 $\mathbf{M}_{\Pi \mathbf{a}}$  — массовый расход  $\Pi \mathbf{A}$ , г/с

 $V_{\text{пав}}$  — объем ПА волокон в фильтрующем элементе, мм<sup>3</sup>

 $\mathbf{L}_{\text{пав}}$  — полная длина ПА волокон в фильтрующем элементе, мм

 $S_{\text{пав}}$  — площадь поверхности ПА волокон в фильтрующем элементе, мм<sup>2</sup>

КЅпа — отношение площади ПП волокон к поверхности фильтрующего элемента

 $\mathsf{L}_{\mathsf{\Phi}}$  — высота фильтрующего элемента, м

 $\mathbf{Q}_{\scriptscriptstyle{\mathrm{M}}}$  — массовый расход ПП, кг/час

 $\rho_{\text{пп}}$  — плотность ПП, г/л

 $ho_{\text{па}}$  — плотность ПА, г/л

 $ho_{pact}$  — плотность раствора, г/мл

 $\rho_{\rm ч}$  — плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>

О – объемный расход ПА, мл/час

 $\mathbf{C}_{\scriptscriptstyle{\Pi 9}}$  — массовая концентрация  $\Pi \mathbf{A}, \%$ 

 ${
m V_{cp}}$  — средняя скорость течения воздуха в пределах одной поры, м/с

 $V_{\mbox{\tiny RO3Л}}$  — скорость воздуха через материал, м/с

λ – длина свободного пробега, м

М — молярная масса воздуха, кг/моль

 $\rho_{\text{возд}}$  — плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>

∆Р – перепад давления, Па

 $\eta_{stk\,\pi a}$  — инерционный коэффициент захвата для ПА волокон

 $\eta_{D\;\pi a}$  — диффузионный коэффициент захвата ПА волокон

 $\eta_{R\,\pi a}$  — касательный коэффициент захвата ПА волокон

 $\eta_{DR\;\pi a}$  — неаддитивный диффузионно-касательный коэффициент захвата

Сk – коэффициент Канингема

D — коэффициент диффузии частиц

 $R_{\pi a}$  — отношение диаметра частиц к диаметру ПА волокон

Кипа — фактор Кувабары

Репа — число Пекле для ПА волокон

 $\eta_{stk\, nn}$  — инерционный коэффициент захвата для ПП волокон

 $\eta_{D\,\pi\pi}$  — диффузионный коэффициент захвата ПП волокнон

 $\eta_{R\, \Pi\Pi}$  — касательный коэффициент захвата ПП волокон

 $\eta_{D.R\,\pi\pi}$  — неаддитивный диффузионно-касательный коэффициент захвата

 $Stk_{\pi\pi}$  — число Стокса для ПП волокон

 $R_{\Pi\Pi}$  — отношение диаметра частиц к диаметру ПП волокон

 $Ku_{\pi\pi}$  — число Кувабары для ПП волокон

 $Pe_{\pi\pi}$  — число Пекле для ПП волокон

k — постоянная Больцмана, Дж/К

R — универсальная газовая постоянная,  $\kappa \Gamma^* M^2 / (c^2 * K^* MOJE)$ 

 $\mathbf{M}_{\text{па}}$  — поверхностная плотность волокон ПА, г/м<sup>2</sup>

 $\mathbf{M}_{\text{пп}}$  — поверхностная плотность волокон  $\Pi \mathbf{A}$ ,  $\mathbf{r}/\mathbf{m}^2$ 

 $\beta_{\rm па}$  — плотность упаковки ПА в фильтрующем элементе, абс. ед.

 $\beta_{\rm nn}$  — плотность упаковки ПП в фильтрующем элементе, абс. ед.

 $Kn_{\pi a}$  — число Кнудсена ПА волокон

Кппп – число Кнудсена ПП волокон

ү — коэффициент фильтрования

### **ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность работы. Естественные и антропогенные источники загрязнения воздуха ежегодно выбрасывают в атмосферу сотни миллионов тонн взвешенных частиц. Эти частицы оказывают отрицательное влияние на качество жизни населения, влияют на экосистемы и климат Земли. По данным глобальной статистики 2017 г. Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), загрязнение воздуха в помещениях и на открытых пространствах вызывает по всему миру около 6,5 млн. смертей (или 11,6 % смертей) в год. На данный момент, согласно оценке степени риска для здоровья ВОЗ, проблема плохого качества воздуха стоит на четвертом месте после высокого кровяного давления, некачественного питания и курения.

Кроме производство микроэлектроники, фармакологических τογο, препаратов, продуктов питания и т.п. предъявляет повышенные требования к чистоте и стерильности атмосферы рабочих зон производственных помещений. производства располагают Поэтому такие В, так называемых, помещениях, в которых поддерживается определенный класс чистоты воздуха (ГОСТ ИСО 14644-1-2002). В свою очередь, особые требования к чистоте воздуха предъявляются в медицинских учреждениях. Медицинские чистые помещения необходимы в родильных отделениях, палатах реанимации, операционных блоках.

На практике для выполнения требований нормативных документов используются высокоэффективные фильтрующие элементы. Недостатком таких фильтрующих элементов является непрочный фильтрующий материал, который может легко повреждаться при монтаже фильтрующего элемента, что приводит к браку продукции при производстве и угрозе причинения вреда жизни и здоровью людей. С точки зрения технологии производства недостатком является сложная конструкция фильтрующего элемента (требует множества технологических операций при производстве), что составляет значительную часть стоимости

фильтрующего элемента. Также большая площадь фильтрующего материала и, как следствие, большая протяженность границы корпуса элемента и фильтрующей бумаги предъявляют высокие требования к качеству сборки фильтрующего элемента.

либо вышеперечисленные Преодолеть недостатки онжом совершенствованием существующих подходов к производству фильтрующих элементов, либо новой разработанной технологией изготовления, превосходящей конкурирующие решения в простоте конструкции. Анализ литературных источников показывает, что совершенствование существующих производства фильтрующих элементов достигло своего предела. Поэтому, преодолеть недостатки существующих решений может новая технология производства комбинированных фильтрующих элементов. Комбинированные фильтрующие элементы должны обладать высокой эффективностью захвата частиц при хорошей воздушной проницаемости и низкой себестоимости. Такой новый вид фильтрующих элементов имеет перспективы применения в различных областях, начиная от бытовых средств поддержания чистоты воздушной среды в жилых помещениях, индивидуальной защиты и промышленной безопасности, до организации атмосферы в чистых помещениях медицинского и специального производственного назначения.

Представленная диссертационная работа выполнялась при финансовой поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научнотехнической сфере», программа «Умник», государственный контракт №12033ГУ/2017 от 04.07.2017 г.

Степень разработанности темы. Задачи повышения эффективности тонкой очистки воздуха решали многие научные группы: НИФХИ им. Л.Я. Карпова г. Москва (Петрянов И.В., Фукс Н.А., Филатов Ю.Н.), НИЦ «Курчатовский институт» г. Москва (Стечкина И.Б., Кирш А.А.), Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН г. Москва (Кирш В.А.). В большей степени изучены процессы электроформования так называемых

фильтрующих элементов Петрянова-Соколова. На данный момент общее количество публикаций по теме электроформования составляет более десятка тысяч. По данным национального университета Сингапура, работы в области электроформования ведут 143 университета и 55 исследовательских институтов.

Совершенствование технологии производства фильтрующих элементов Петрянова-Соколова достигло того уровня, что при заданных технологических параметрах оборудование способно создавать продукт заданного класса очистки и гидравлического сопротивления.

Однако главным недостатком элемента Петрянова-Соколова является сложный процесс производства. Кроме τογο, технология производства Петрянова-Соколова фильтрующих элементов включает создание поддерживающих разделительных элементов (жесткий корпус) И ДЛЯ фильтрующего материала, что усложняет процесс производства.

Следует отметить, что не существует расчётной модели, способной предсказывать основные характеристики фильтрования и ресурс эксплуатации фильтрующего элемента.

Чтобы реализовать технологию изготовления фильтрующих элементов нельзя использовать стандартные станки для создания элементов тонкой очистки воздуха.

**Цель работы:** разработка и изготовление фильтрующего элемента с повышенной эффективностью улавливания высокодисперсных частиц за счет применения наноразмерной волокнистой фильтрующей среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

 предложить и разработать численную физико-математическую модель фильтрования частиц, учитывающую влияние размеров и технологии размещения волокнистой фильтрующей среды и позволяющую прогнозировать основные характеристики фильтрующего элемента в процессе эксплуатации;

- на основании анализа предложенной модели выявить наиболее эффективную композицию волокнообразующих полимеров, способные обеспечить повышение эффективности фильтрующего элемента и увеличение ресурса его эксплуатации;
- предложить и разработать комбинированный способ формования фильтрующего элемента на основе выбранной наноразмерной волокнистой фильтрующей среды с применением процессов экструзии и электроформования;
- предложить и разработать эффективный принудительный способ снятия
   электрического заряда при изготовлении фильтрующих элементов;
- разработать технологию изготовления, которая позволит получать высокоэффективный фильтрующий элемент за один технологический этап;
- провести исследования функциональных возможностей созданного фильтрующего элемента и его ресурсные испытания для подтверждения повышения эффективности реализуемого процесса улавливания высокодисперсных частиц и определения ресурса эксплуатации;

### Научная новизна:

- впервые на основе физической теории фильтрации, предложена и разработана численная модель комбинированного фильтрующего элемента, учитывающая улавливание частиц каркасными и фильтрующими волокнами и позволившая проанализировать влияние размеров и размещения волокон на фильтрующие свойства в процессе эксплуатации, выявить новые сочетания и взаимовлияния волокон и их распределений по толщине материала для повышения эффективности фильтрации и увеличения ресурса эксплуатации;
- впервые предложен новый способ формования, позволяющий изготавливать фильтрующий элемент, в котором входящие частицы распределяются равномерно по толщине материала фильтрующего элемента, что позволяет снизить энерго- и ресурсозатраты на реализацию технологического процесса формования фильтрующего элемента;

- впервые, на основе анализа закономерности распределения стекания заряда, выявлена возможность принудительного снятия электрического заряда заземленным проволочным электродом;
- впервые предложена и реализована одностадийная технология формования высокоэффективных воздушных фильтрующих элементов;

## Практическая значимость работы:

- создан фильтрующий элемент на основе применения и реализации имеющий формования, технологии комбинированного характеристики, превышающие известные аналоги; при скорости фильтрования 5 cm/cэффективность очистки и перепад давления 99 % и 41 Па, соответственно, значение коэффициента фильтрующего действия комбинированного элемента при скорости фильтрования 1 см/с составило 2,2 (мм вод. ст.)-1;
- предложена и разработана технология, основанная на комбинированном применении методов экструзии и электроформования, с реализацией предложенного способа принудительного снятия электрического заряда с поверхности фильтрующего элемента в процессе изготовления, обеспечившая формование фильтрующих элементов повышенной эффективности и увеличенного срока эксплуатации;
- для практической реализации предложенной и разработанной технологии реализована на практике конструкция станка формования комбинированного фильтрующего элемента;

Результаты диссертационной работы внедрены на АО «Холдинговая Компания Тион» г. Новосибирск при реконструкции установок серийного производства воздушных фильтрующих элементов и в учебный процесс ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет».

# Положения, выносимые на защиту:

 численная модель, учитывающая влияние каркасных и фильтрующих волокон комбинированного элемента, а также изменение плотности упаковки при улавливании частиц в слоях материала фильтрующего элемента, позволяющая устанавливать зависимости распределения нановолокон по толщине фильтрующего элемента и определять оптимальные режимы формования;

- полученные в результате исследований рецептуры, композиции полимер/полимер и полимер/растворитель, данные о влиянии температуры экструзионного расплава на формование фильтрующих нановолокон, обеспечившие оптимизацию процесса формования и исключение дефектов материала фильтрующего элемента;
- предложенный и практически реализованный способ снятия электрического заряда с полимерного фильтрующего элемента, обеспечивший реализацию технологии изготовления комбинированного фильтрующего элемента;
- выявленные режимы и условия формования элемента, обеспечивающие максимальные характеристики фильтрования (эффективность очистки и перепад давления);

Достоверность результатов подтверждается результатами лабораторных испытаний результатами опытной эксплуатации, подтверждающими И достижение необходимых фильтрующих характеристик по эффективности очистки и времени эксплуатации, проведенными с помощью современных средств измерения (спектрометр наночастиц TSI, 3938, модель дифференциальный манометр Testo 512) и вспомогательных методов (генератор аэрозолей АТМ 226, регулятор расхода газа РРГ-12), успешной апробацией удовлетворительным разработанных устройств, методов И согласием экспериментальных данных, полученных различными электростатическими способами измерений; проверкой воспроизводимости микро – и наноструктуры, химического состава лабораторных образцов, полученных с помощью различных производственных аппаратов (экструдеров) при помощи современных точных методов анализа (оптической (ОМ) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ), метод аналитического взвешивания, инфракрасной термографии (ИТ), инфракрасной Фурье спектрометрии (ИКФС)); воспроизводимостью результатов испытаний характеристик фильтрования.

Объекты, предметы и методы исследования. Объектами исследования являются новый нетканый самонесущий материал фильтрующего элемента и его рецептурные композиции полимер/полимер и полимер/растворитель, обладающие высокой фильтрующей способностью. Предмет исследований — технология изготовления фильтрующего элемента с применением процесса экструзии и метода электроформования на динамическую, с точки зрения поверхностного электрического заряда, мишень (шпулю). В работе применены методы аналитических и экспериментальных исследований:

- методы математической статистики, численное решение обратной задачи с помощью метода наименьших квадратов (МНК) и обработки изображений;
- методы регулирования расхода газа, генерации аэрозолей для контроля дисперсности и концентрации тестового аэрозоля;
- методы измерения потенциала поверхности и электрического заряда пористого диэлектрика, позволившие рассчитать характерные времена стекания заряда с поверхности фильтрующего элемента;
- методы исследований влияния параметров процесса формования, свойств композиций полимер/полимер и полимер/растворитель, тестового загрязнителя на морфологию (структуры) нетканого материала фильтрующего элемента исследовали с применением методов аналитического взвешивания, ОМ, СЭМ, ИТ;
- методы измерения перепада давления и коэффициента проскока материала фильтрующего элемента (с применением рекомендованной ГОСТ Р ЕН 1822 аэрозольной жидкости «Бис-(2-этилгексил)овый эфир себациновой кислоты» на аэрозольном стенде с помощью спектрометра TSI, модель 3938), показавшие эффективность разработанного способа формования фильтрующего элемента;

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции «Современное состояние науки и техники» (г. Сочи, 2016), молодёжном научно-инновационном конкурсе «Умник» (г. Новосибирск, 2016), VI Всероссийской конференции молодых ученых (г. Томск, 2016), XVII Всероссийской научно-

технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.» (г. Новосибирск, 2016), 55-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2017 (г. Новосибирск, 2017), Международной конференция «Одиннадцатые Петряновские и Вторые Фуксовские чтения» (г. Москва, 2017), XVIII Всероссийской научнотехнической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.» (г. Новосибирск, 2017), 10-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности» (г. Бийск, 2017), Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (г. Бийск, 2017), 56-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2018 (г. Новосибирск, 2018).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 4 статьи, из них 3 статьи в журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий в соответствии с требованиями ВАК, 11 тезисов в сборниках докладов международных и всероссийских научно-технических конференций, получен 1 патент на изобретение.

Личный вклад автора. Вклад автора состоит в проведении патентного разработке поиска, новых методик новой технологии формования И комбинированного фильтрующего подборе элемента, основным эксплуатационным характеристикам композиций полимер/полимер И полимер/растворитель.

Автор диссертации принимал непосредственное участие в:

- разработке физико-математической модели и численном решении задачи нахождения оптимальной структуры комбинированного фильтрующего элемента;
- проведении экспериментов по измерению динамики электрического заряда и анализе экспериментальных данных;
  - разработке конструкции и изготовлении опытной установки;

- определении технологических параметров формования образцов воздушных фильтрующих элементов;
- изготовлении лабораторных образцов и проведении испытаний их фильтрующей способности;
- сопоставлении полученных результатов с имеющимися литературными данными;

### подготовке публикаций;

**Благодарности.** Автор выражает глубокую признательность и благодарность к.ф.-м.н. Гореву Василию Николаевичу, д.т.н., профессору, заведующему кафедрой инженерных проблем экологии НГТУ, Ларичкину Владимиру Викторовичу, д.ф-м.н., профессору Бардаханову Сергею Прокопьевичу и Мик Дарье Сергеевне.

# 1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АППАРАТАХ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ОТ АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ

#### 1.1 Постановка задачи

В настояшей главе проведены работы ПО изучению научноисследовательской и патентной литературы в отношении современных тенденций проблем формования фильтрующих материалов аппаратов ДЛЯ высокоэффективной очистки воздуха от аэрозольных частиц. Отмечены перспективные методы формования фильтрующих материалов, способных повысить эффективности улавливания аэрозолей в аппаратах тонкой очистки обзор работ, воздуха. Приведён связанных с измерением снятием электрического заряда волокнистых материалов, полученных методом электроформования. Следует отметить, что проблема накопления электрического заряда вполне решаема многими способами, однако не каждый способ может подойти в том или ином случае по технологическим причинам.

# 1.2 Анализ существующих проблем высокоэффективной очистки воздуха от аэрозольных частиц

Ежедневно человек вдыхает 8 – 10 тысяч литров воздуха. В каждом литре содержится около полумиллиона пылевых частиц. Пыль и аэрозоли, уровень которых во вдыхаемом воздухе превышает допустимую концентрацию, губительно влияют на здоровье человека. Пыль (примесь крупных частиц твердых веществ в воздухе) оказывает механическое действие на дыхательные пути. Длительное вдыхание такого воздуха приводит к повреждению слизистых оболочек трахеи и бронхов. В результате значительно снижаются их защитные свойства, проходящий воздух плохо увлажняется, хуже очищается от загрязнений и микроорганизмов. Все это приводит к тому, что начинают страдать легкие. Появляется хронический кашель, трудно отходит мокрота, становится трудно

дышать. Очень часто появляется ощущение нехватки воздуха, что приводит к одышке. На следующем этапе при длительном воздействии запыленного воздуха на органы дыхания развивается хроническая обструктивная болезнь легких [1, 2].

Если говорить об аэрозолях микронного и субмикронного размера, они, помимо губительного механического воздействия на систему дыхания, оказывают еще и химическое влияние [1-3]. Длительный контакт с аэрозолями чреват развитием бронхиальной астмы. Мельчайшие частицы, проходя через дыхательные пути малого калибра (бронхиолы), раздражают находящиеся в них нервные окончания. Это, в свою очередь, вызывает спазм гладкой мускулатуры бронхиол. Также аэрозоли, являясь чужеродным веществом и проходя через дыхательные пути, могут запускать в них аллергическую реакцию, что способствует отеку стенки бронхов и выработке густой, вязкой мокроты. Все эти механизмы приводят к уменьшению просвета дыхательных путей и являются ключевым звеном в формировании удушья. Как видно, в данном случае в основном страдает дыхательная система. Не менее тяжелые последствия возникают при вдыхании воздуха, содержащего аэрозоли микроскопических капель жидкостей. Они, попадая в дыхательные пути, проникают в кровеносные сосуды и распространяются по всему организму. В таких ситуациях страдают печень, почки, мозг и сердце. При продолжительном действии повреждающего фактора перечисленные процессы выше патологические становятся необратимыми.

В связи с мировой экологической ситуацией усилилась тенденция развития индивидуальных очистителей воздуха. Активно разрабатываются энергоэффективные комплексные системы очистки и кондиционирования воздуха, которые закладываются на этапе проектирования здания. Появляются программы государственного уровня, новые стандарты строительства жилых помещений, направленные, в том числе, на повышение качества микроклимата в жилых помещениях, например Minergy, Швейцария и KfW, Германия [4-6].

Производство микроэлектроники, фармакологических препаратов, пищевой промышленности, требовательно к чистоте и стерильности атмосферы рабочих зон производственных линий. Поэтому такие производства располагают в, так

называемых, чистых помещениях, В воздухе которых поддерживается определенный класс чистоты воздуха (ГОСТ ИСО 14644-1-2002) [7, 8]. Особые требования к очистке воздуха предъявляются в медицинских учреждениях. Медицинские чистые помещения необходимы в родильных отделениях, палатах реанимации, операционных блоках. Основная задача – снижение риска инфекционных постоперационных осложнений, профилактика развития внутрибольничной инфекции, поскольку давно установлено, число осложнений коррелирует с концентрацией аэрозольных частиц в воздухе операционного блока [7, 8].

На современном рынке оборудования очистки воздуха существует широкий спектр фильтрующих элементов (ГОСТ Р ЕН 1822), по эффективности действия фильтрующей способности их разделяют на 3 основных класса – фильтрующие элементы грубой очистки воздуха (G1 – G4), фильтрующие элементы тонкой очистки воздуха (F5 – F9) и фильтрующие элементы особо тонкой очистки воздуха (E10 – E12, H13, H14 и U15 – U17) [7]. Фильтрующие элементы грубой очистки используются в помещениях и процессах с низкими требованиями к чистоте воздуха, например, предварительная очистка в системах вентиляции и центрального кондиционирования; при эксплуатации компрессоров, холодильных машин в условиях большой запыленности и т.п. Фильтрующие элементы тонкой очистки воздуха используют в помещениях и процессах с высокими требованиями К чистоте воздуха, например В системах кондиционирования и вентиляции; очистки воздуха газотурбинных агрегатов; в качестве фильтрующих элементов второй ступени очистки (доочистки); в больничных палатах, административных зданиях, гостиницах; при производстве продуктов питания, лекарств; в электронной, мясомолочной промышленности и т.п. Фильтрующие элементы абсолютной очистки применяются для чистых зон, чистых помещений, где предъявляются самые высокие требования к чистоте воздуха, например в фармацевтической и электронной промышленности, в качестве "финишных" фильтрующих элементов, для решения проблем санитарии, гигиены и микроклимата; в лечебных учреждениях, операционных; на АЭС; при производстве некоторых категорий продуктов питания, лекарств и т.п.

В современных устройствах тонкой очистки воздуха используются, так называемые, HEPA (High Efficient Particulate Airfilter) и ULPA (Ultra Low Penetration Airfilter) фильтрующие элементы. Данные фильтрующие элементы представляют собой тонкие плотные волокнистые материалы, напоминающие бумагу. Такие фильтрующие элементы обладают высоким сопротивлением потоку фильтруемой среды и преимущественно поверхностной фильтрацией, что фильтрующего делает емкость элемента пропорциональной фильтрующего материала. Для уменьшения габарита систем очистки воздуха и снижения перепада давления на фильтрующих элементах, фильтрующий материал складывают в виде гофры. Материалы, из которых изготавливают фильтрующие элементы, имеют малую механическую прочность, что повышает требования при его монтаже. Для поддержания формы материала его помещают в корпус, при большой глубине гофры применяют специальные разделительные элементы. Как результат, для изготовления конечного продукта требуется множество различных технологических операций, что в свою очередь отражается на себестоимости продукта.

Высоко-конкурентная среда рынка промышленных и бытовых приборов очистки воздуха предъявляет более жесткие требования к фильтрующим элементам. Они должны быть оформлены в виде удобных сменных элементов. Производители современных фильтрующих элементов для воздуха стремятся оптимизировать фильтрующие элементы в пространстве эффективность – перепад давления – ёмкость – габарит – цена. В рамках традиционного подхода (НЕРАфильтрующий элемент из гофрированной фильтровальной бумаги) оптимизация себя исчерпала. Поэтому команды исследователей в области фильтрующих материалов предпринимают попытки найти альтернативные решения.

# 1.3 Перспективные методы формования высокоэффективных фильтрующих сред

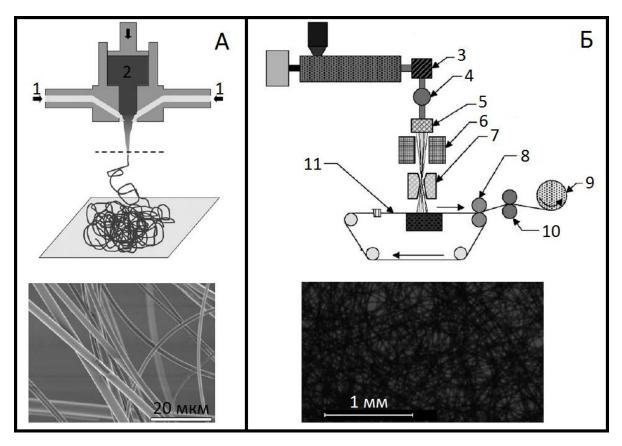
Аэрозольные частицы, ежегодно выбрасываемые в атмосферу, оказывают растущее отрицательное влияние на качество жизни населения, влияют на

экосистему и климат Земли [9]. Очистка воздуха от аэрозольных частиц критически важна во многих технологических процессах современных производств. Внедрение технологий высокопроизводительной новых энергоэффективной очистки воздуха, в том числе разработка высокоэффективных фильтрующих сред [10-12], является насущной необходимостью и крайне востребовано в мире. Волокнистая среда, которая будет обладать высокой эффективностью захвата аэрозольных частиц, при хорошей воздушной проницаемости имеет перспективы применения в различных областях, начиная от бытовых средств контроля воздушной среды жилых помещениях, В индивидуальной защиты и промышленной безопасности, организации атмосферы в чистых помещениях медицинского и производственного назначения.

Фильтрующие материалы, используемые В серийных фильтрующих создаются широко известными методами, среди элементах, электроформование волокнистых материалов (electrospinning) [13, 16], экструзия расплава с аэродинамическим вытягиванием волокон (meltblown) и «спанбонд» (spun-bond) (рис. 1.1) [14, 15]. На рис. 1.1 приведены экспериментальные схемы методов формования и микроснимки волокон: 1 – поток горячего воздуха, 2 – расплав полимера, 3 — фильтр расплава, 4 — насос расплава, 5 — фильеры, 6 воздушное охлаждение, 7 – зона утончения волокон, 8 – ролики укатки, 9 – намоточное приспособление, 10 – конвейерная лента формования материала.

Основным способом производства высокоэффективных фильтрующих элементов из тонкого волокнистого фильтрующего материала является его гофрирование и оформление в жесткий несущий корпус. В пространстве основных потребительских характеристик таких фильтрующих элементов (эффективность, перепад давления, габарит, ресурс фильтрующего элемента, цена) [13] оптимизация данной технологии за несколько десятков лет себя исчерпала. В зависимости от производителя и типа материалы воздушных фильтров, формованные такими методами, имеют ряд недостатков: могут обладать низкой производительностью из-за достаточно большого с точки зрения фильтрования диаметра волокна, низкой эффективностью очистки и низким коэффициентом качества [13-15]. На данный момент с точки зрения простоты

технологического производства, у развивающихся методов формования фильтрующих сред есть потенциал для разработки более энергоэффективных фильтрующих элементов.



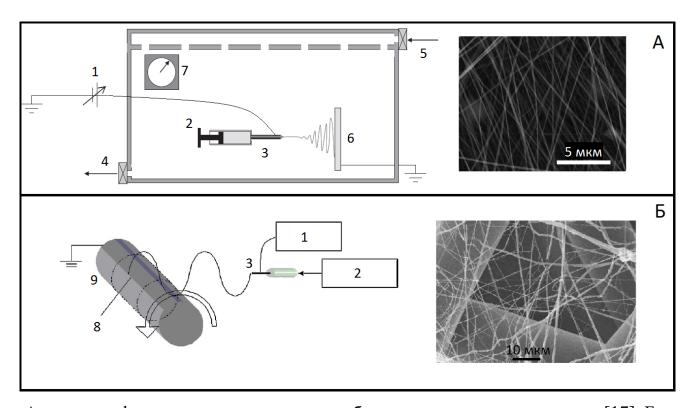
А – экструзия расплава с аэродинамическим вытягиванием волокон (meltblown)

[14], Б – формование материала методом «спанбонд» (spun-bond) [15]

Рисунок 1.1 – Экспериментальные схемы формования волокнистых материалов и микроснимки полученных волокон материала

Методы формования фильтрующих нано-размерных сред ДЛЯ высокодисперсных аэрозолей активно развиваются как наиболее подходящая альтернатива серийным фильтрующим элементам классической конструкции [10, 17-20]. Аэрозольные нано фильтрующие элементы за счёт тонкого диаметра эффективностью повышенной волокон обладают фильтрования, перепадом давления и увеличенным сроком службы. Эти факты подтверждаются помощью моделей фильтрации [19], так и экспериментальными исследованиями [18-20]. Нано фильтрующие элементы, получают с помощью

различных методов, в том числе способом химического осаждения нанотрубок на целевую полимерную матрицу [20], формованием нано-размерных волокон с помощью электроформования (рис. 1.2) [10, 17-19]. На рис. 1.2. приведены экспериментальные схемы электроформования и микроснимки волокон: 1 – ИВН, 2 – волюметрический насос, 3 – металлический капилляр, 4 – выход газа, 5 – вход N<sub>2</sub>, 6 – алюминиевая пластина, 7 – гигрометр, 8 – подложка обернутая вокруг барабана, 9 – вращающийся барабан. Из подобных подходов наибольшую популярность завоевал метод электроформования как один из эффективных и универсальных подходов для производства нановолокон с контролируемым морфологией нанесёнными функциональными диаметром, И на них компонентами [10, 17-19].



А – электроформование в закрытом коробе на металлическую пластину [17], Б – электроформование на вращающийся заземлённый барабан [19]
 Рисунок 1.2 – Экспериментальные схемы электроформования волокнистых материалов и микроснимки полученных волокон материала

С точки зрения производства готового продукта, одним из подходов в производстве фильтрующих материалов является самонесущий фильтрующий материал, состоящий из объемного связного каркаса (матрицы) из волокон диаметром 100 - 300 микрон и фильтрующих волокон диаметром 50 - 500 нанометров, распределенных в объемной матрице. Идея использовать два масштаба волокон известна [21-23], однако, толстослойный самонесущий высокоэффективный фильтрующий материал объемной фильтрации на данный момент никем не создан.

# 1.4 Обзор методов и проблем электроформования толстослойных волокнистых материалов и технических средств их решения

Одной из главных проблем получения толстослойного материала методом электроформования является накопление электрического заряда на сформованном материале в процессе производства. В зависимости от стоящей задачи исследователи и инженеры предлагают различные решения проблемы накопления электрического заряда [24-29]. Ниже рассматриваются несколько подобных примеров. На рис. 1.3 экспериментальные схемы некоторых исследований: А схема получения волокон методом встречных пучков (сверху) и процесс намотки волокна на шпулю (снизу): 1 – источник волокон (генератор положительного заряда), 2 – источник волокон (генератор отрицательного заряда), 3 – шпуля (вращающийся барабан), 4 – накопленный материал [24]; Б – схема установки для получения толстослойного волокнистого материала с применением вращающейся платформы: 5 – шприцевой насос, 6 – положительный ИВН, 7 – отрицательный ИВН [25]; В производство хлопкоподобного материала метолом электроформования: 4 – накопленный материал, 5 – шприцевой насос, 6 – положительный ИВН, 7 – отрицательный ИВН, 8 – диэлектрические стенки, 9 – сетка, 10 – камера сбора материала, 11 – электрод, на который подавалось положительное напряжение [26]; Г – процесс электроформования волокна со снятием статического заряда с материала электроспреем: 4 – накопленный

материал, 12 — разделительная диэлектрическая стенка с отверстием, 13 — генератор отрицательного заряда (распылитель), 14 — лазер, 15 — фотоприемник, 16 — экспериментальный короб [26]; Д — схема установки по получению толстослойного волокнистого материала методом электроформования, 3 — шпуля (вращающийся барабан), 5 — шприцевой насос, 6 — положительный ИВН, 7 — отрицательный ИВН, 17 — источник аэроионов противоположного знака [29].

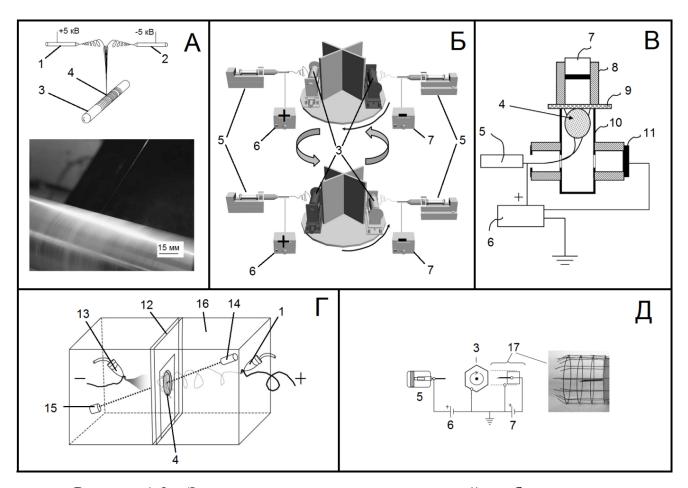


Рисунок 1.3 – Экспериментальные схемы решений проблемы накопления электрического заряда

При разработке модифицированного метода электроформования волокна [24] группа исследователей столкнулась с проблемой накопления заряда на получаемом материале. В качестве решения была предложена следующая экспериментальная схема: навстречу друг другу устанавливались металлические капилляры, на которые подавалось высокое напряжение (5 кВ), отличающееся

знаком (рис. 1.3 А). Из капилляров вытягивались субмикронные нити, переплетающиеся между собой. Нити наматывались на металлическую шпулю, которая способна вращаться с большой скоростью, в результате чего получался материал с выделенным направлением волокон. Данный способ позволяет получать нить, свитую из пучка ультратонких волокон. Как утверждают авторы, данный материал не подойдет для фильтрования или изготовления ткани, но такой материал может быть использован для армирования и укрепления живых тканей в биологии и медицине.

(тканевой Каркасы ИЗ нановолокон используются В медицине биоинженерии) для регенерации и восстановления формы различных тканей [24]. Обычный метод электроформования позволяет создавать только двумерные мембраны ограниченной толщины. Это связано с тем, что во время получения мембраны из нановолокон накапливается электрический заряд на материале, из-за которого процесс электроформования волокна прекращается. Для получения объемных волокнистых структур исследователи разработали метод получения толстослойных мембран [25] из нановолокон, схожий с предыдущим [24]. В своем эксперименте они используют два капилляра, расположенные друг напротив друга, на которые подаются напряжения плюс 15 и минус 15 кВ (рис. 1.3 Б). Между капиллярами (в центре) находится вращающаяся платформа, на которой расположены 2 шпули, изолированные друг от друга непроводящими экранами. Это сделано, чтобы волокна не притягивались и не сплетались между собой. Волокна летят под действием силы электрического поля и наматываются на шпулю, предварительно заряженную противоположным знаком. Через некоторое время, когда на шпуле образовался достаточный слой материала с достаточным зарядом, чтобы процесс электроформования не ухудшился или не прекратился, платформа, поворачиваясь, меняет шпули местами, тем самым меняя полярность системы шпуля – капилляр. Таким образом, команде исследователей удалось увеличить толщину материала со 100 мкм до 500 мкм.

Для сосудистых трансплантатов, которые применяются в тканевой инженерии, на основе метода электроспиннинга был синтезирован эластичный материал [26]. Для получения материала исследователи реализовали установку для получения хлопкоподобного материала из нановолокон (рис. 1.3 В). Волокно с положительным потенциалом вытягивается в камеру сбора материала, где притягивается к сетке заряженной аэроионами отрицательного потенциала. Положительный заряд волокна компенсируется отрицательным зарядом аэроионов с электрода. Разряженное волокно не препятствует осаждению новых порций волокна, в результате получается рыхлый хлопкоподобный материал.

Для синтеза толстослойных водорастворимых мембран в работе [27] предложен способ нанесения нановолокон методом электроформования, который выглядит следующим образом: имеется закрытый короб, изготовленный из пористого диэлектрика разделенный на 2 зоны (рис. 1.3 Г). В одной зоне установлен капилляр, из которого вытягивается волокно под действием электрического поля и осаждается в отверстии разделительной пенопластовой пластины. Для получения наноматериала авторы предложили следующий метод снятия заряда во время нанесения пленки: во второй зоне установлен распылитель, который генерирует электро-спрей этанола, заряженный противоположным знаком, в отличии от знака напряжения, подключенного к капилляру с раствором ПВП. Заряженные капли оседают на волокна в отверстии пластины и эффективно нейтрализуют накопленный на ней заряд. Лазер и фотоприемник установлены для контроля толщины пленки по просвету (рис.  $1.3 \Gamma$ ).

В рамках исследования процесса электроформования четырёх полимеров (желатин, хитозан, сополимер молочной-гликолевой кислоты и полибутилентерефталат) было проведено сравнение методов формования плёнок с положительным (PVES) и отрицательным ИВН (NVES) [28], рассмотрено влияние на процесс электроформования величины приложенного к капилляру напряжения, расстояния от капилляра до коллектора. В работе приводятся результаты измерения потенциала, который накапливается на пленке и измерение

времени стекания заряда. Так, например, для желатина время стекания заряда самое быстрое, пленка из желатина разряжается за час. А, например, для полибутилентерефталата время стекания превышает три месяца. Заряд измерялся электростатическим вольтметром, миниатюрный зонд устанавливался на расстоянии 2 мм, не касаясь полученной мембраны.

В процессе электроформования электростатическое взаимодействие между заряженными волокнами и подложкой может приводить к дефектам и неравномерной структуре волокнистых покрытий, особенно нано используются электроизоляционные подложки, поскольку они подвержены накоплению поверхностного заряда [29]. Один из методов решения данной проблемы – ионный душ (поток противоположно заряженных аэроионов). Применяя ионный душ, волокна Нейлона 4,6 наносили на подложки разного размера, проводимости и морфологии [29]. С одной стороны от шпули устанавливался капилляр, из которого вытягивалось волокно, а с другой коронирующий электрод, который подавалось напряжение на высокое противоположного знака (рис. 1.3 Д). Лавина аэроионов, возникающих в области коронирующих электродов, устремляется в сторону шпули и компенсирует заряд, который переносится на шпулю с волокном. При помощи метода ионного душа удалось значительно увеличить плотность и однородность волокнистых нано покрытий, как на электроизоляционных, так и на проводящих подложках.

В рамках технологии получения комбинированного материала фильтрующего элемента использовать методики снятия заряда, предложенные выше, по ряду причин затруднительно или невозможно. Во-первых, напротив установки электроформования волокна располагается экструдер, который состоит из металла и заземлен. Кроме того, в непосредственной близости от рабочей зоны находится большое количество электроники чувствительной к статическому электричеству (различные контролеры, датчики давления, расстояния, расхода воздуха), поэтому располагать рядом с ним коронирующие электроды, находящиеся под высоким напряжением (как предлагают в методах снятия заряда, предложенных в работах [24, 26, 27, 29]), недопустимо. Методика снятия

электростатического заряда с поверхности материала, предложенная в работе [25] наиболее реализуемая, но требует достаточно долгого и затратного перестроения производственных станков, что также нежелательно.

## 1.5 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 1

- 1. При изучении научной и патентной литературы по различным характеристикам фильтрующих материалов обнаружено, что наиболее перспективными подходами являются такие методы, как экструзия расплава с аэродинамическим вытягиванием волокон (meltblown), «спанбонд» (spun-bond) и электроформование волокнистых материалов (electrospinning).
- 2. В настоящей работе по результатам литературного и патентного поиска, в качестве метода формования высокоэффективной фильтрующей среды выбран метод электроформования.
- 3. Для создания несущего каркаса (матрицы) фильтрующих волокон выбран метод экструзии расплава с аэродинамическим вытягиванием волокон на цилиндрический вращающийся барабан (шпулю).
- 4. Для достижения максимальной фильтрующей способности и заданного класса очистки для формуемого фильтрующего элемента необходимо создать расчётную модель, способную предсказывать оптимальные параметры формования фильтрующего элемента и основные характеристики фильтрования.
- 5. Составлен обзор научно-технической литературы на основе которого выделены основные типы решений, позволяющих бороться с «паразитным» эффектом накопления электрического заряда в процессе электроформования толстослойных материалов.
- 6. Проведенный анализ научно-технической литературы показал, что для создания надёжной технологии производства воздушных фильтрующих элементов для аппаратов очистки воздуха от аэрозольных частиц на основе метода электроформования требуется разработать недорогой и удобный способ компенсации или снятия заряда с формуемого материала.

# 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОМБИНИРОВАННОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

#### 2.1 Постановка задачи

Комбинированный материал фильтрующего элемента представляет собой композицию двух типов волокон: первый тип волокон обеспечивает несущий каркас материала и практически не участвует в процессе фильтрования, второй тип волокон обеспечивает процесс фильтрования. Согласно известным вкладам в механизмы фильтрования для каждого типа волокон, при заданных условиях среды можно прогнозировать характеристики фильтрующего элемента. А значит определить наилучшее соотношение ДЛИН волокон реально создать оптимальный фильтрующий элемент, который по своим свойствам будет стремиться к теоретическому пределу комбинированного способа формования. Формование оптимальных по структуре фильтрующих элементов позволит качественный наукоёмкий продукт создать при минимальных затратах производства.

Моделирование работы комбинированного фильтрующего элемента позволяет решить следующие задачи:

- 1. Получить удобный аналитический «инструмент» способный прогнозировать фильтрующие характеристики на основании заданных параметров формования фильтрующего элемента;
- 2. Обосновать выбор объёмного соотношения фильтрующих волокон к каркасным, т.е. найти оптимальную толщину материала фильтрующего элемента с точки зрения характеристик очистки;
- 3. Произвести расчёт оптимального распределения волокон по толщине материала, при котором фильтрующий элемент будет иметь максимальную пылеёмкость;
- 4. Оценить срок эксплуатации фильтрующего элемента для выбранного ансамбля частиц;

С целью создания физико-математической модели комбинированного фильтрующего элемента был проведён анализ научной периодики. Были выбраны физические модели фильтрации, отвечающие параметрам материала фильтрующего элемента. На базе выбранных теоретических и эмпирических выкладок была разработана численная модель процесса фильтрования аэрозольных частиц комбинированным фильтрующим элементом.

### 2.2 Геометрические и массовые параметры фильтрующего элемента

В численной физико-математической модели учитывались различные параметры фильтрующего элемента. Например, для определения геометрических параметров составных волокон цилиндрического фильтрующего элемента (таблица 4.2), рассчитывались геометрический объем и площадь фильтрующего элемента в целом, что можно сделать, измерив внешний и внутренний радиусы, а также длину фильтрующего элемента:

$$V_{\Phi} = 0.25\pi L_{\Phi} (d_{\text{внеш}}^2 - d_{\text{внут}}^2)$$
 (2.1)

$$s_{\Phi} = 0.5\pi L_{\Phi}(d_{\text{внеш}} + d_{\text{внут}}) \tag{2.2}$$

Исходя из характеристик используемого материала и геометрических параметров фильтрующего элемента в целом (2.1, 2.2), были определены параметры ПП волокон фильтрующего элемента. Масса ПП волокон, объем ПП волокон, длина ПП волокон, площадь поверхности ПП волокон, отношение площади ПП волокон к поверхности фильтрующего элемента можно записать в виде:

$$M_{\Pi\Pi} = V_{\phi} (1 - P_{\Pi\Pi}) \rho_{\Pi\Pi} \tag{2.3}$$

$$V_{\Pi\Pi B} = \frac{M_{\Pi\Pi}}{\rho_{\Pi\Pi}} \tag{2.4}$$

$$L_{\Pi\Pi B} = \frac{(V_{\phi}(1 - \Pi_{\Pi\Pi}))}{0.25\pi d_{\Pi\Pi}^{2}}$$
 (2.5)

$$S_{\Pi\Pi B} = L_{\Pi\Pi B} \pi d_{\Pi\Pi}$$
 (2.6)

$$KS_{\pi\pi} = \frac{S_{\pi\pi}}{S_{\Phi}} \tag{2.7}$$

Аналогичным образом из параметров формования материала и геометрических параметров фильтрующего элемента в целом (2.1, 2.2) проводился для волокон ПА фильтрующего элемента. Масса ПА волокон, массовый расход ПА волокон, объем ПА волокон, длина ПА волокон, площадь поверхности ПА волокон, отношение площади ПА волокон к поверхности фильтрующего элемента можно записать в виде:

$$M_{\Pi AB} = tM_{\Pi A} \tag{2.8}$$

$$M_{\pi a} = \frac{C_{\pi a}}{100} \rho_{\text{pact}} \frac{Q}{3600}$$
 (2.9)

$$V_{\text{пав}} = \frac{M_{\text{пав}}}{\rho_{\text{па}}} \tag{2.10}$$

$$L_{\text{mab}} = \frac{V_{\text{mab}}}{0.25\pi d_{\text{ma}}^2} \tag{2.11}$$

$$S_{\text{пав}} = L_{\text{пав}} \, \pi d_{\text{па}} \tag{2.12}$$

$$KS_{\pi a} = \frac{S_{\pi aB}}{S_{\phi}} \tag{2.13}$$

Таким образом, с помощью формул (2.1-2.13) в численной физикоматематической модели учитывались различные параметры фильтрующего элемента.

# 2.3 Расчёт характеристик фильтрования комбинированного фильтрующего элемента

Расчет перепада давления на комбинированном фильтрующем элементе проводился с помощью обобщённой формулы гидродинамического сопротивления волокнистого слоя [30]:

$$\Delta P = \frac{4\mu M V_{\text{возд}}}{\rho_{\text{вол}}(0.5\text{d})^2 (-0.5\ln(\beta_{\text{вол}}) - 0.48 + 0.64\beta_{\text{вол}} + 1.43(1 - \beta_{\text{вол}})\frac{\lambda}{0.5\text{d}})} \tag{2.14}$$

Формула была получена на основе экспериментальных и теоретических работ Н.А. Фукса, И.Б. Стечкиной и А.А. Кирша применительно к наиболее близкой к реальной структуре веерной модели. Веерный фильтрующий элемент состоит из набора перпендикулярных потоку воздуха слоёв параллельных круглых цилиндров, расположенных на определенном расстоянии друг от друга и случайный угол. Следует повернутых на отметить, формула гидродинамического сопротивления не учитывает различные дефекты волокон размеров волокон ПО длине, площади поперечного сечения, формуле (2.14) d толщине). Поэтому в неравномерности слоя ПО гидродинамический диаметр волокон, который близок к значению диаметра полученного с помощью ОМ или СЭМ, но не совпадает с ним. Для расчёта суммарного перепада давления комбинированного материала фильтрующего элемента перепад давления каждого типа волокон рассчитывался отдельно. Перепад давления на волокнах ПА рассчитывался, как:

$$\Delta P_{\pi a} = \frac{4 \mu M_{\Pi A} V_{cp}}{\rho_{\pi a} (0.5 d_{\pi a})^2 (-0.5 \ln(\beta_{\pi a}) - 0.48 + 0.64 \beta_{\pi a} + 1.43 (1 - \beta_{\pi a}) \frac{\lambda}{0.5 d_{\pi a}})} \tag{2.15}$$

$$V_{cp} = \frac{V_{\text{возд}}}{P_{\pi\pi}} \tag{2.16}$$

Перепад давления на волокнах ПП рассчитывался, как:

$$\Delta P_{\Pi\Pi} = \frac{4\mu M_{\Pi\Pi} V_{BO3Д}}{\rho_{\Pi\Pi} (0.5 d_{\Pi\Pi})^2 (-0.5 \ln(\beta_{\Pi\Pi}) - 0.48 + 0.64 \beta_{\Pi\Pi} + 1.43 (1 - \beta_{\Pi\Pi}) \frac{\lambda}{0.5 d_{\Pi\Pi}})}$$
(2.17)

Зная вклад каждого типа волокон можно рассчитать суммарный перепад давления на комбинированном материале фильтрующего элемента:

$$\Delta P_{\text{CYMM}} = \Delta P_{\Pi\Pi} + \Delta P_{\Pi a} \tag{2.18}$$

Ниже предполагается, что суммарный коэффициент захвата частиц равен сумме коэффициентов, соответствующих:

диффузии, зацеплению и инерции. Эффективность фильтрования на волокнах ПА определяется как [31]:

$$E_{\pi a} = 1 - e^{-4\beta_{\pi a}(\eta_{D \pi a} + \eta_{R \pi a} + \eta_{DR \pi a} + \eta_{stk \pi a}) \frac{d_{\phi}}{\pi d_{\pi a}}}$$
 (2.19)

где выражения диффузионного коэффициента захвата [31], касательного коэффициент захвата [31], неаддитивного диффузионно-касательного коэффициента захвата [32], инерционного коэффициента захвата [31] записываются в виде:

$$\eta_{D \pi a} = 2.7 \text{ Pe}_{\pi a}^{-\frac{2}{3}}$$
 (2.20)

$$\eta_{R_{\pi a}} = \frac{0.5}{K u_{\pi a}} \left( \frac{1}{1 + R_{\pi a}} - (1 + R_{\pi a}) + 2(1 + R_{\pi a})(1 + 2K n_{\pi a}) \ln(1 + R_{\pi a}) \right)$$
(2.21)

$$\eta_{DR \, \pi a} = 1.24 (Ku_{\pi a} Pe_{\pi a})^{-\frac{1}{2}} R_{\pi a}^{\frac{2}{3}}$$
 (2.22)

$$\eta_{\text{Stk } \pi a}(\text{Stk}_{\pi a}) = \begin{cases} 0, & \text{Stk} < 0.2\\ 0.227 \text{ (Stk}_{\pi a} - 0.045), & 0.2 \le \text{Stk} \le 0.8\\ 0.45 \text{ (ln(Stk}_{\pi a} + 0.4)), & \text{Stk} > 0.8 \end{cases}$$
 (2.23)

где число Стокса, число Пекле, коэффициент диффузии частиц, коэффициент Канингема, фактор Кувабары, отношение диаметра частиц к диаметру волокон записываются в виде:

$$Stk_{\pi a} = 2 Ck \rho_{\tau} V_{cp} \frac{d_{\tau}^{2}}{9\mu d_{\pi a}}$$
 (2.24)

$$Pe_{\pi a} = V_{cp} \frac{d_{\pi a}}{D} \tag{2.25}$$

$$D = Ck \frac{kT_{\text{возд}}}{3\pi\mu d_{y}}$$
 (2.26)

$$Ck = 1 + 2\frac{\lambda}{d_y} \left( 1,257 + 0,4e^{-1,1} \frac{d_y}{2\lambda} \right)$$
 (2.27)

$$Ku_{\pi a} = -0.5 \ln(\beta) - 0.52 + 0.64\beta^2$$
 (2.28)

$$R_{\pi a} = \frac{d_{\Psi}}{d_{\pi a}} \tag{2.29}$$

Эффективность фильтрования на волокнах ПП определялась как:

$$E_{\Pi\Pi} = 1 - e^{-4\beta_{\Pi\Pi}(\eta_{D\Pi\Pi} + \eta_{R\Pi\Pi} + \eta_{D,R\Pi\Pi} + \eta_{Stk\Pi\Pi})} \frac{d_{\phi}}{\pi d_{\Pi\Pi}}$$
 (2.30)

где выражения диффузионного коэффициента захвата [31], касательного коэффициент захвата [33], неаддитивного диффузионно-касательного

коэффициента захвата [32], инерционного коэффициента захвата [34, 35] записываются в виде:

$$\eta_{\rm D\, nn} = 2.9 {\rm Ku}_{\rm nn}^{-\frac{1}{3}} {\rm Pe}_{\rm nn}^{-\frac{2}{3}}$$
 (2.31)

$$\eta_{R \,\Pi\Pi} = \frac{0.5(1 + R_{\Pi\Pi})}{Ku_{\Pi\Pi}} \left( 2 \ln(1 + R_{\Pi\Pi}) - 1 + \beta_{\Pi\Pi} + \frac{1}{1 + R_{\Pi\Pi}} \right)^{2} (1 - 0.5\beta_{\Pi\Pi}) - 0.5\beta_{\Pi\Pi} (1 + R_{\Pi\Pi})^{2} \right)$$
(2.32)

$$\eta_{D,R \, \Pi\Pi} = 1.24 (K u_{\Pi\Pi} P e_{\Pi\Pi})^{-\frac{1}{2}} R_{\Pi\Pi}^{\frac{2}{3}}$$
(2.33)

$$\eta_{\text{stk}\,\Pi\Pi} = \frac{0.5\text{Stk}}{\text{Ku}_{\Pi\Pi}^{2}} ((29.6 - 28\beta_{\Pi\Pi}^{0.62}) R_{\Pi\Pi}^{2} - 27.5 R_{\Pi\Pi}^{2.8})$$
(2.34)

где число Стокса, число Пекле, фактор Кувабары [36], отношение диаметра частиц к диаметру волокон записываются в виде:

$$Stk_{\Pi\Pi} = Ck \rho_{q} V_{cp} \frac{d_{q}^{2}}{\mu d_{\Pi\Pi}}$$
 (2.35)

$$Pe_{\pi\pi} = V_{cp} \frac{d_{\pi\pi}}{D} \tag{2.36}$$

$$Ku_{\pi\pi} = -0.5 \ln(\beta_{\pi\pi}) + \beta_{\pi\pi} - 0.25 \beta_{\pi\pi}^{2} - 0.75$$
 (2.37)

$$R_{\pi\pi} = \frac{d_{\text{q}}}{d_{\pi\pi}} \tag{2.38}$$

В результате, эффективность фильтрования комбинированного материала фильтрующего элемента определяется выражением:

$$E = 1 - e^{-4\beta_{\Pi a}(\eta_{D \Pi a} + \eta_{R \Pi a} + \eta_{DR \Pi a} + \eta_{Stk \Pi a})} \frac{d_{\varphi}}{\pi d_{\Pi a}} * e^{-4\beta_{\Pi \Pi}(\eta_{D \Pi \Pi} + \eta_{R \Pi \Pi} + \eta_{D,R \Pi \Pi} + \eta_{Stk \Pi \Pi})} \frac{d_{\varphi}}{\pi d_{\Pi \Pi}}$$
(2.39)

Электрическое взаимодействие частиц с волокном в модели комбинированного материала фильтрующего элемента не учитывалось, т.к. скорость фильтрования достаточно высокая [31, 37].

### 2.4 Представление модели комбинированного фильтрующего элемента

С целью прогнозирования работы фильтрующего элемента и поиска оптимального профиля концентраций волокон по толщине материала [38] и среднего диаметра волокон, было проведено моделирование работы Чтобы комбинированного моделирование работы элемента. провести фильтрующего элемента в данной работе выбран подход учёта изменения всех параметров фильтрующего материала (см. выше) при фильтровании выбранного ансамбля аэрозоля. Данный материал фильтрующего элемента представляет собой слоистую структуру, которая состоит из волокон двух типов: каркасных ПП и фильтрующих ПА. Если известно, количество частиц, отфильтрованных каждым типом волокон в слое, можно вычислить суммарный коэффициент проскока для определенного диаметра частиц:

$$K^{i} = \prod_{j=1}^{N} K_{\Pi\Pi}^{i,j} K_{\Pi A}^{i,j}$$
 (2.40)

$$K_{\Pi A}^{i,j} = K_{\Pi A}^{i,j} (\beta_{\Pi A}^{i,j}, d_{\Pi A}^{i,j}, n^{i,j}, L_{\Pi A}^{j})$$
 (2.41)

$$K_{\Pi\Pi}^{i,j} = K_{\Pi\Pi}^{i,j} (\beta_{\Pi\Pi}^{i,j}, d_{\Pi\Pi}^{i,j}, K_{\Pi A} n^{i,j}, L_{\Pi\Pi}^{j})$$
 (2.42)

где  $K^i$  — проскок комбинированного материала фильтрующего элемента для определенного диметра частиц i-го загрязнения;  $K_{\Pi A}^{i,j}$ ,  $\beta_{\Pi A}^{i,j}$ ,  $d_{\Pi A}^{i,j}$ , — проскок, плотность упаковки волокон в слое, диаметр волокон после фильтрования на  $\Pi A$  волокнах i-го загрязнения в j-м слое фильтрующего элемента;  $n^{i,j}$  — количество частиц i-го загрязнения перед j-м слоем  $\Pi A$  волокон;  $K_{\Pi \Pi}^{i,j}$ ,  $\beta_{\Pi \Pi}^{i,j}$ ,  $d_{\Pi \Pi}^{i,j}$ , — проскок, плотность упаковки волокон в слое, диаметр волокон после фильтрования на  $\Pi \Pi$  волокнах i-го загрязнения в j-м слое фильтрующего элемента;  $K_{\Pi A} n^{i,j}$  — количество частиц i-го загрязнения перед j-м слоем  $\Pi \Pi$  волокон (в модели первоначально ансамбль частиц фильтруется на  $\Pi A$  волокнах во вторую очередь

на ПП волокнах); N — количество слоёв материала фильтрующего элемента, I — количество загрязнений, ,  $L_{\Pi\Pi}^j$  и  $L_{\Pi A}^j$  — длина ПП и ПА волокон.

Системы уравнений (2.40 - 2.42) позволяют найти массу задержанных частиц после i-го загрязнения, а значит суммарную массу частиц и массу частиц в конкретном слое. На основании вышеперечисленного можно описать эффективность фильтрования после i-го загрязнения выражением:

$$Eff_{CYMM} = 1 - K^{I}$$
 (2.43)

где  $\mathrm{Eff}_{\mathrm{сумм}}$  — эффективность фильтрования комбинированного материала фильтрующего элемента для определенного диаметра частиц после всех загрязнений. Зная конечный проскок для определенного размера частиц, можно рассчитать эффективность фильтрования фильтрующего элемента для выбранного периода эксплуатации.

Для определения начальных перепадов давлений, создаваемых ПА и ПП волокнами, использовались значение экспериментального перепада давления комбинированного материала фильтрующего элемента и материала, не содержащего фильтрующие волокна (ПП матрицы), из которого по обобщённой формуле гидродинамического перепада давления (2.14, 2.15, 2.17), находились аэродинамические диаметры волокон. Из параметров эксперимента: расхода ПА раствора электроформования и расхода ПП экструдированного расплава находились начальные плотности упаковки и длина волокон в слое. Рост плотности упаковки и диаметра волокон учитывался через объём осевшего в слое аэрозоля, в приближении, что жидкий аэрозоль равномерно распределяется по всей длине фильтрующих волокон.

Зная параметры фильтрующего элемента, в каждом слое имеется возможность вычислить суммарный перепад давления:

$$\Delta P_{\text{cymm}} = \sum_{j=1}^{N} \Delta P^{i,j}$$
 (2.44)

$$\Delta P^{i,j} = \Delta P_{\Pi A}^{i,j} + \Delta P_{\Pi \Pi}^{i,j} \tag{2.45}$$

$$\Delta P_{\Pi A}^{i,j} = \Delta P_{\Pi A}^{i,j} \left( \beta_{\Pi A}^{i,j}, d_{\Pi A}^{i,j} \right) \tag{2.46}$$

$$\Delta P_{\Pi\Pi}^{i,j} = \Delta P_{\Pi\Pi}^{i,j} (\beta_{\Pi\Pi}^{i,j}, d_{\Pi\Pi}^{i,j}) \tag{2.47}$$

где  $\Delta P_{\Pi A}^{i,j}$ ,  $\Delta P_{\Pi \Pi}^{i,j}$  и  $\Delta P^{i,j}$  — перепады давления і-го загрязнения в ј-м слое, создаваемые  $\Pi A$  и  $\Pi \Pi$  волокнами и их результирующее значение, соответственно.

Зная эффективность фильтрования, можно найти оптимум концентраций волокон в слое фильтрующего элемента для фильтрования конкретного ансамбля аэрозоля. Например, для фильтрования ультра-дисперсного аэрозоля после фильтрующих элементов грубой и средней очистки в чистом помещении (ГОСТ ИСО 14644-1-2002) [7, 8] или фильтровании комнатного аэрозоля содержащего как крупные, так и частицы мелкой фракции (рис. 4.14 а).

## 2.5 Оптимальные параметры каркасных волокон фильтрующего элемента

Экструдированные волокна формируют массу и габарит фильтрующего элемента. Следовательно, встаёт вопрос обоснования выбора структурных и объёмных параметров каркасных ПП волокон. Технология производства комбинированных фильтрующих элементов позволяет варьировать в некотором диапазоне толщину материала цилиндрического фильтрующего элемента или средний диаметр ПП волокон. Требуется, учитывая влияние каркасных волокон на характеристики фильтрования, выбрать параметры матрицы с наибольшим коэффициентом фильтрующего действия (КФД) (см. формулу 4.2).

На основе модели фильтрования комбинированного фильтрующего элемента, было выполнено сравнение начальных характеристик (перепада давления и эффективности фильтрования) при различных параметрах каркасных волокон. Выборка средних диаметров проводилась для существующих

технологических режимов формования ПП пористого материала с помощью экструдера. Для качественного сравнения параметры пористости фильтрующих элементов, концентрация и распределение фильтрующих волокон по толщине моделируемых фильтрующих элементов одинаковые.

На рис. 2.1 перепады давления каркасных, фильтрующих волокон и суммарный перепад комбинированного фильтрующего элемента в зависимости от толщины материала. Зависимости на рис. 2.1 построены для лабораторных образцов комбинированного фильтрующего элемента (аэродинамический диаметр ПП волокон 221 мкм), использованных при ресурсных испытаниях на жидком аэрозоле. Экспериментальные точки приведены для контроля данных моделирования образцов без ПА волокон (матрица) толщиной от 7 до 20 мм, аэродинамический диаметр 221 мкм (рис. 2.1).

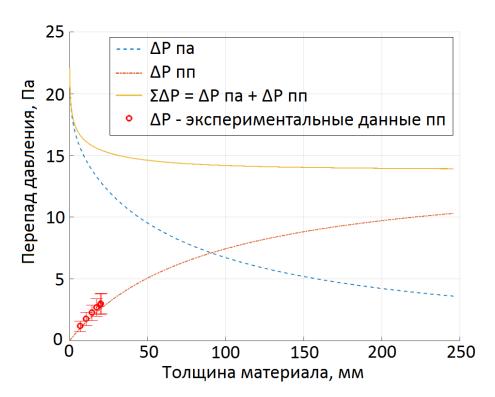


Рисунок 2.1 – Перепад давления на двух типах волокон в зависимости от толщины комбинированного материала фильтрующего элемента

Так как в «модельных» образцах концентрация фильтрующих волокон равная, то эффективность фильтрования будет слабо зависеть от диаметра

каркасных ПП волокон (рис. 2.2). Однако вклад ПП волокон в модели фильтрования учитывается и несколько сказывается на итоговых показателях эффективности комбинированного материала фильтрующего элемента. С точки зрения наибольшей эффективности фильтрования следует избегать толщины материала фильтрующего элемента при минимуме эффективности. Например, для матрицы с волокном 271 мкм минимум эффективности фильтрования расположен при толщине материала 7 мм. Особенности (10 – 20 мкм) кривых эффективности фильтрования от толщины материала на рис. 2.2 связаны с эмпирическим выражением (2.23).

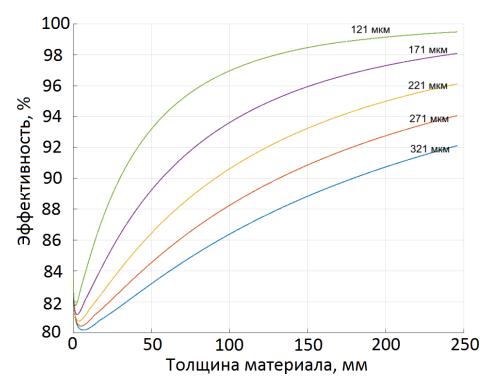


Рисунок 2.2 – Эффективность фильтрования комбинированного фильтрующего элемента при различных диаметрах каркасных волокон в зависимости от толщины материала

Как видно из рис. 2.3, при толщине материала 6 мм для диаметра ПП волокон 121 мкм образуется минимум перепада давления. Поэтому, с точки зрения сопротивления материала фильтрующего элемента, потоку воздуха для

матрицы 121 мкм выгодно формовать фильтрующие элементы толщиной 6 мм. Аналогично для каркасных волокон 171 мкм выгодно формовать фильтрующие элементы толщиной 10 мм. Что касается матриц 221, 271 и 321 мкм, перепад давления будет тем ниже, чем тоньше материал фильтрующего элемента. Однако скорость падения перепада давления на материале фильтрующего элемента с толщиной уменьшается и практически выходит на полку.

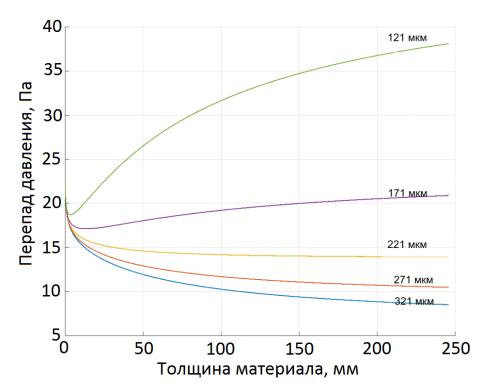


Рисунок 2.3 – Перепад давления комбинированного фильтрующего элемента при различных диаметрах каркасных волокон в зависимости от толщины материала

Итоговая характеристика фильтрующего элемента (КФД) будет увеличиваться с толщиной материала и диаметром каркасных волокон (рис. 2.4). Толщина фильтрующих элементов лабораторных образцов с аэродинамическим диаметром 212 мкм составляла 10 мм, что обусловлено удобством установки и стабильности режима, временем формования фильтрующего элемента. Для производственной технологии автор рекомендует формовать цилиндрические

фильтрующие элементы с максимально возможной толщиной материала и при этом использовать стабильный режим экструзии, позволяющий добиться максимального диаметра ПП волокон. Здесь и выше аэродинамический диаметр ПА волокон 77 нм.

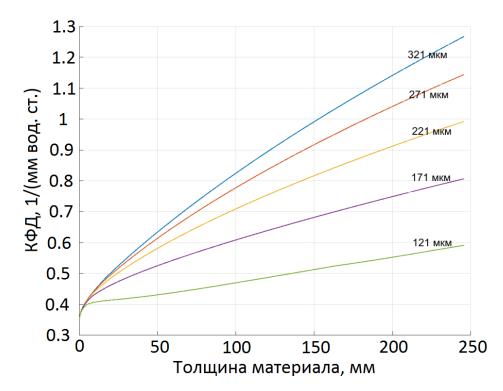


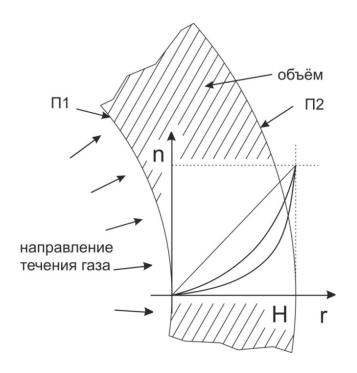
Рисунок 2.4 – КФД комбинированного фильтрующего элемента при различных диаметрах каркасных волокон в зависимости от толщины материала

Наши результаты согласуются с ранее проведенными экспериментальными и теоретическими исследованиями в области фильтрующих характеристик нетканых наноматериалов [19, 39]: при увеличении плотности упаковки (или уменьшении толщины) КФД комбинированного фильтрующего элемента снижается. Это означает, что нановолокна, осаждаемые в слой материала фильтрующего элемента, повышают падение давления без существенного повышения эффективности фильтрования.

# 2.6 Расчёт параметров формования оптимально-профилированного комбинированного фильтрующего элемента

С точки зрения эксплуатационных характеристик комбинированный фильтрующий элемент с постоянной плотностью нановолокон можно усовершенствовать профилированием распределения тонкого фильтрующего волокна по толщине материала фильтрующего элемента. На рис. 2.5 радиальный разрез фильтрующего элемента цилиндрической формы с профилированной по толщине плотностью нановолокон.

Таким образом, функционально-градиентный фильтрующий элемент добиться более позволит равномерного распределения загрязнений, улавливаемых в процессе очистки в объеме фильтрующего материала. За счёт ЭТОГО происходит уменьшение скорости роста перепада давления профилированном фильтрующем элементе по сравнению с фильтрующим элементом с равномерным распределением нановолокна при равных условиях эксплуатации. Подход профилирования комбинированного материала позволит увеличить срок эксплуатации фильтрующего элемента.



П1 – поверхность фильтрующего элемента, обращенная к входящему потоку; П2 – поверхность фильтрующего элемента через которую выходит очищенный воздух; объём – объём фильтрующего элемента. п – концентрация фильтрующих волокон; г – координатная ось толщины фильтрующего элемента; Н – толщина фильтрующего элемента; Рисунок 2.5 – Радиальный разрез фильтрующего элемента цилиндрической формы

Добиться того, чтобы фильтрующие волокна были распределены таким образом, что их плотность упаковки в объеме фильтрующего элемента была различна и увеличивалась от входной поверхности фильтрующего элемента, к поверхности фильтрующего элемента, через которую выходит очищенный путём контролируемого воздух, онжом изменения скорости осаждения нановолокон. Процесс электроформования волокнистых материалов позволяет достаточно быстро менять свою производительность. Кроме того, для каждого типа аэрозоля существует оптимальная функция распределения плотности фильтрующих волокон, которая позволит наиболее равномерно осаждать загрязнения в объеме фильтрующего элемента, что сделает фильтрующий элемент существенно более емким, при прочих равных параметрах процесса фильтрования.

С точки зрения распределения загрязнителя по толщине фильтрующего элемента, оптимальным распределением фильтрующих волокон в слое будет то, при котором суммарная масса загрязнителя распределится равномерно по толщине фильтрующего элемента. Задача состоит в нахождении оптимального профиля концентраций фильтрующих волокон в каждом слое для выбранного ансамбля загрязнителя. Одним из возможных способов расчёта оптимального распределения фильтрующих волокон является нахождение по выходным данным из модели фильтрования (масса осевших частиц) входных модельных параметров фильтрующего элемента (длина фильтрующих волокон), которые напрямую связаны технологическими параметрами ПА c (расход раствора электроформования). В этом смысле необходимо решить обратную задачу для представленной выше физико-математической модели. Согласно численной модели, загрязнение фильтрующего элемента происходит в одном направлении, плоским фронтом, начиная с первого слоя фильтрующего элемента и заканчивая последним. Другими словами, ј-й слой не зависит от изменений параметров ј+1-го слоя фильтрующего элемента и изменения входного ансамбля концентрации частиц загрязнителя. Такая автономность слоя от следующего позволяет решить обратную задачу с помощью МНК для каждого слоя фильтрующего элемента.

$$L_{\Pi A}^{j} = \frac{4tC_{\Pi a}Q^{j}}{N\pi d_{\Pi a}^{2}}$$
 (2.48)

где  $Q^j$  — технологический параметр (вводится в интерфейс опытной установки), значения расхода раствора в j-м слое;  $L^j_{na}$  — модельный параметр (участвует в расчётах модели фильтрующего элемента), то есть суммарная длина фильтрующих волокон зависит от расхода раствора.

$$e_{j}^{2} = \sum_{i=1}^{I} \left( \frac{M_{i}E}{N} - m_{ij}(Q^{j}) \right)^{2}$$
 (2.49)

где  $M_i$  — суммарная масса ансамбля частиц i-го загрязнения, E — заданная интегральная эффективность фильтрующего элемента,  $e_j$  — вектор приближений для j-го слоя,  $m_{ij}(Q^j)$  — масса частиц в j-м слое после i-го загрязнения (зависит от технологического и соответственно модельного параметра), I — количество загрязнений

$$e_j^2 \longrightarrow \min_{L_{\Pi\Lambda}^j(Q^j)} \tag{2.50}$$

Формулы (2.48 — 2.50) позволяют найти «оптимальный» вектор **e** в смысле максимальной близости векторов стоящих в скобке суммы (см. формулу 2.49) и тем самым получить закон, по которому будет меняться технологический параметр при формовании оптимального фильтрующего элемента. Таким образом, обратная задача нахождения оптимального распределения фильтрующих волокон по толщине фильтрующего элемента была численно решена на основе физико-математической модели фильтрования с помощью МНК.

В рамках представленной технологии существуют ограничения связанные со стабильностью процесса электроформования (электроспиннинга), а также временем формования, которое зависит от скорости намотки экструдированных каркасных волокон фильтрующего элемента. Например, с помощью аппарата

«Электроспиннер» (рис. 4.4) для шприцевой иглы с внутренним диаметром сечения 150 мкм максимальный расход раствора, при котором удаётся добиться стабильного режима электроформования  $U_{\rm kp}$ , составляет 0.65 мл/час. При расходе раствора больше  $U_{\rm kp}$  с конца капилляра отрываются капли, что приводит к дефектам ПА волокон и, следовательно, к уменьшению фильтрующей способности материала [40, 41, 30, 42]. Ограничение по максимальному расходу раствора накладывает рамки на профилирование материала фильтрующего элемента по толщине. Однако добиться большей концентрации волокон в слое, т.е. большей, чем при расходе 0.65 мл/час, можно, увеличив число формующих тонкие ПА волокна капилляров (шприцов), что усложнит технологический процесс, однако повысит характеристики материала фильтрующего элемента. Аппарат «Электроспиннер» позволяет устанавливать до четырёх капилляров (шприцов).

На рис. 2.6 полученное численными методами оптимальное распределение фильтрующих волокон в сравнении с линейными и равномерным распределениями. Чтобы экспериментально получить фильтрующий элемент с оптимальным распределением фильтрующих волокон для последнего слоя фильтрующего элемента, требуется расход раствора 3.4 мл/час (рис. 2.6). Что для представленного оборудования составляет 6 шприцов (капилляров). Однако разработанная установка имеет четыре волюметрических насоса, что не позволяет экспериментально добиться теоретического максимума предлагаемого способа формования.

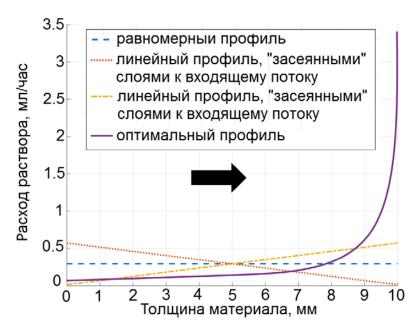


Рисунок 2.6 – Распределение фильтрующих ПА волокон в комбинированном элементе (стрелкой показано направление потока аэрозольных частиц)

На рис. 2.7 эффективность фильтрования от массы загрязнителя на фильтрующем элементе для различных распределений фильтрующих волокон. Видно, что по наиболее проникающим частицам фильтрующий элемент с оптимальным распределением ПА волокон выигрывает по эффективности фильтрования.

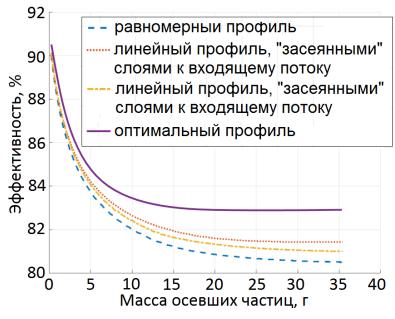


Рисунок 2.7 – Эффективность от массы загрязнителя на комбинированном элементе для различных распределений фильтрующих волокон

Ha рис. 2.8 перепад давления фильтрующего элемента OT массы загрязнителя на материале для различных распределений фильтрующих волокон. Комбинированный фильтрующий элемент с оптимальным распределением несколько проигрывает в перепаде давления в процессе эксплуатации в сравнении фильтрующими элементами, имеющими равномерное распределение ПА волокон и линейно-профилированным фильтрующим элементом, установленным разреженными слоями к воздушному потоку. По-видимому, эффект связан с тем, что для оптимального в сравнении с остальными вариантами, распределения ПА большей волокон присутствуют слои на порядок плотности упаковки. Значительно более резкая неравномерность плотности упаковки по толщине привносит вклад в эффективность фильтрования по наиболее проникающим другой стороны создаёт дополнительное сопротивление частицам, НО образом, потоку воздуха. Таким положительный входящему вклад эффективности фильтрования уравновешивается вкладом перепада давления, что наглядно отражает рис. 2.9.

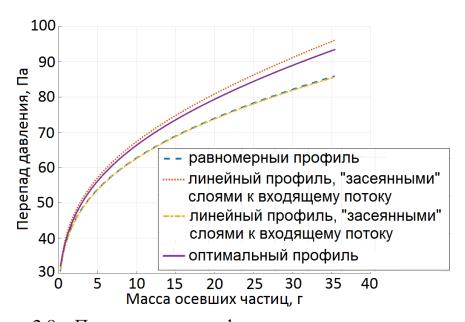


Рисунок 2.8 – Перепад давления фильтрующего элемента от массы загрязнителя для различных распределений фильтрующих волокон

На рис. 2.9 КФД оптимального распределения фильтрующих волокон в сравнении с линейными и равномерным распределениями. Как видно, КФД оптимального, равномерного и линейного, установленного разреженными слоями

к потоку аэрозольных частиц распределений, несколько отличаются. На рис. 2.10 распределение массы по толщине комбинированного элемента для различных распределений фильтрующих волокон (стрелкой показано направление потока аэрозольных частиц).

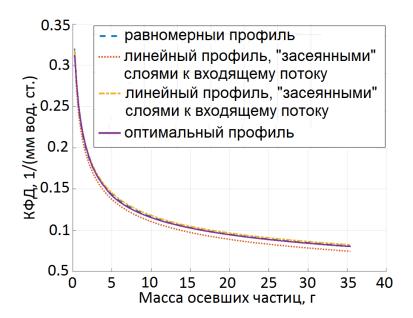


Рисунок 2.9 – КФД от массы загрязнителя на комбинированном фильтрующем элементе

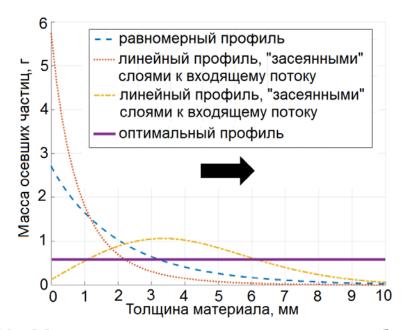


Рисунок 2.10 – Масса загрязнителя в слое от толщины комбинированного элемента различных распределений фильтрующих волокон

Ha физико-математической основе численной модели, показана целесообразность формования и использования функционально-градиентного Фильтрующие фильтрующего элемента. элементы c оптимальным функционально-градиентным распределением будут иметь значительно большую пылеёмкость при почти равных начальных характеристиках с фильтрующими элементами полученными с равномерным распределением ПА волокон. Другими словами, при равных фильтрующих возможностях функционально-градиентный фильтрующий элемент «забьётся» много позже, чем фильтрующий элемент с равномерным распределением фильтрующих волокон.

Используя расчётную модель, была получена оценка возможностей представленной технологии формования воздушных фильтрующих элементов, результаты которых показаны в таблице 2.1.

 Таблица 2.1 – Технологические
 и
 эксплуатационные
 параметры

 комбинированного фильтрующего элемента

Технологические параметры фильтрующего элемента				Параметры эксплуатации фильтрующего элемента			
Расход раствор а ПА, мл/час	Масса ПА волоко н в фильтр ующем элемен те, мкг	Начальна я пористост ь, %	Распределен ие фильтрующ их волокон	Минималь ная эффективн ость фильтрова ния, %	Конечн ый перепад давлени я фильтру ющего элемент а, Па	Масса осевших частиц на фильтру ющем элемент е, г	Оценка ресурса эксплуатац ии (комнатны й аэрозоль), сутки
0,32	23,4	75,2	равномерное	80,5	174	233	38
			линейное, "засеянными " слоями к входящему потоку	81,4	153	107	17
			линейное, разреженны ми слоями к входящему потоку	81	286	667	109
			оптимальное	82,8	450	1085	177

Время эксплуатации фильтрующего элемента оценивалось до момента, когда плотность упаковки хотя бы одного слоя за счёт увеличения среднего диаметра волокон начнёт стремиться к 1. Другими словами, когда не «забьётся» хотя бы один слой фильтрующего элемента. В таблице 2.1 показано, что с функционально-градиентного помощью подхода pecypc эксплуатации фильтрующего элемента можно увеличить в 4,5 раза. При этом массовый расход сырья (полимеров), затраченных на производство функционально-градиентных фильтрующих элементов фильтрующих элементов И c равномерным распределением ПА волокон, будет одинаковым. Минимальная эффективность фильтрования для выбранного периода эксплуатации определяет требуемый класс очистки воздушного фильтрующего элемента (ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010). Таким образом, результаты работы подтверждают, что функционально-градиентный подход профилирования комбинированных фильтрующих элементов имеет большой потенциал в применении очистки воздуха.

### 2.7 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 2

- 1. Получен прикладной аналитический «инструмент», способный на основании заданных технологических параметров формования фильтрующего материала прогнозировать характеристики фильтрующего элемента.
- 2. На базе численной физико-математической модели обоснован подход выбора каркасной матрицы ПП волокон с целью достижения максимального КФД комбинированного фильтрующего элемента.
- 3. Численно рассчитана оптимальная зависимость распределения фильтрующих ПА волокон по толщине комбинированного материла, при которой фильтрующий элемент будет иметь максимальную пылеёмкость.
- 4. Проведена оценка ресурса эксплуатации фильтрующего элемента для выбранного ансамбля частиц. За 177 суток эксплуатации фильтрующего элемента с оптимальным профилем нановолокон эффективность фильтрования снизится с 90 до 82 %.

## З ПОДБОР СЫРЬЕВОЙ КОМПОЗИЦИИ И ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ЗАРЯДКИ ПОРИСТОГО ДИЭЛЕКТРИКА В ПРОЦЕССЕ ФОРМОВАНИЯ

#### 3.1 Постановка задачи

Представленный в работе комбинированный фильтрующий элемент по субмикронным частицам обладает преимущественно объемной фильтрацией [43]. загрязнения Это означает, задерживаются что не на поверхности комбинированного материала фильтрующего элемента, а в его объеме. Наличие объемной фильтрации значительно увеличивает емкость фильтрующего элемента и дает весомое преимущество над традиционными фильтрующими элементами типа НЕРА (из гофрированной фильтровальной бумаги). Производство такого фильтрующего элемента намного проще, так как комбинированный материал является самонесущим, т.е. материал фильтрующего элемента не требует большого количества деталей каркаса и разделительных элементов и его можно изготовить за одну технологическую операцию.

В результате, существенно себестоимость снижается данного комбинированного элемента ПО сравнению имеющимися  $\mathbf{c}$ рынке фильтрующими (традиционной складчатой элементами конструкции) соответствующей производительности и перепада давления. По качеству очистки комбинированные фильтрующие воздуха элементы являются аналогами фильтрующих элементов традиционной складчатой конструкции. Фильтрующий материал комбинированных элементов имеет запас по механической прочности (материал является самонесущим), что исключает его повреждения транспортировке и монтаже.

На основе данных научной периодики, проведено исследование по подбору наиболее подходящей рецептурной композиции. Учтены температуры релаксации полимеров для используемых режимов формования. С помощью методов ИТ и СЭМ экспериментально подтверждена работоспособность выбранных

рецептурных композиций. Даны технологические рекомендации по снижению токсичности растворов электроформования.

Для процесса электроформования в классической постановке [24-29] необходимы большие значения электрических полей на кончике капилляра, позволяющих вытягивать и ускорять нить из раствора полимера, выдавливаемого из капилляра. В процессе формования (рис. 3.1) волокно ПА приобретает электрический заряд и переносит его на ПП матрицу. Так как ПП является диэлектриком, заряд накапливается на поверхности материала фильтрующего элемента, создавая область одноименного потенциала. В результате, разность потенциалов между капилляром и мишенью (шпулей) снижается, что приводит к остановке процесса электроформования.

Таким образом, целями исследований данной главы являются:

- провести исследование по подбору наиболее подходящей сырьевой композиции;
- изучить зависимость электрического заряда материала фильтрующего элемента от времени при естественной разрядке;
- найти простой и эффективный способ принудительной разрядки материала фильтрующего элемента в процессе его производства.

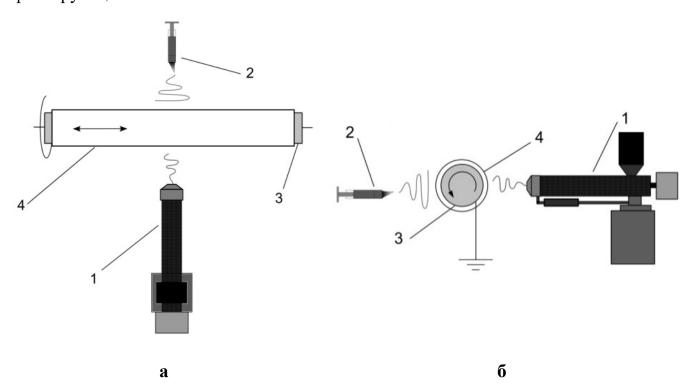
## 3.2 Технология формования комбинированного фильтрующего элемента

## 3.2.1 Процесс получения комбинированного фильтрующего элемента

В данной работе рассматриваются аспекты технологии производства комбинированного фильтрующего элемента, в основе которой лежат два процесса, протекающих одновременно: экструзия волокна с последующим раздувом расплава (melt-blown process) [44] и электроформование [24-29] субмикронных волокон или нановолокон (рис. 3.1).

На металлическую шпулю, которая способна вращаться вокруг своей оси и двигаться поступательно вдоль своей оси, с одной стороны, из экструдера,

подается волокно из расплавленного ПП; характерный диаметр такого волокна составляет 100-300 мкм. Экструдированное волокно растягивается в полете интенсивным закрученным потоком воздуха и укладывается на шпулю спирально, сплавляясь при этом с волокном предыдущего слоя. Наматываясь, таким образом, ПП волокно создает объемную несущую матрицу из сплавленных друг с другом волокон обеспечивающую фильтрующему элементу жесткость и механическую прочность, на которую напыляется тонкое волокно из ПА 6.6., характерный диаметр волокна составляет 100-200 нм, обладающий отличными фильтрующими качествами.



1 – экструдер и факел волокон, образующих несущий каркас материала фильтрующего элемента, 2 – блок электроформования и факел тонких фильтрующих волокон, 3 – шпуля (барабан) на котором формируется фильтрующий элемент, 4 – фильтрующий элемент;

а – вид сверху, б – вид сбоку

Рисунок 3.1 – Процесс получения комбинированного фильтрующего элемента

Для предотвращения засыхания раствора электроформования капилляр (медицинская игла) обдувается воздухом, насыщенным парами спирта.

#### 3.2.2 Подбор наиболее эффективной сырьевой композиции

С целью выбора наиболее эффективной композиции каркасных ПП и фильтрующих полимерных волокон был проведён анализ научной периодики волокнистых фильтрующих материалов, полученных методом электроформования. В результате подбора, с точки зрения эксплуатационных свойств материала (прочностные свойства волокон [45]) технологии производства (параметры формования, вредность) была предложена известная в литературе синтетических волокнообразующих полимеров: композиция каучукоподобный сополимер винилиденфторида и гексафторпропилена СКФ-26  $(MM = 5 \cdot 10^5)$  и сополимера винилиденфторида с тетрафторэтиленом  $\Phi$ -42  $(MM = 2 \cdot 10^5)$  [40, 41]. В качестве растворителя использовался ДМФА (ПДК в воздухе рабочей зоны  $10 \text{ мг/м}^3$ ).

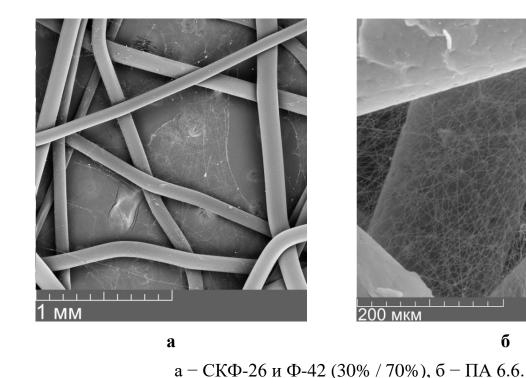


Рисунок 3.2 – СЭМ изображения образцов фильтрующего элемента, полученные на основе полимеров

Для получения образцов комбинированного фильтрующего элемента был приготовлен полимерный раствор электроформования: массовая доля полимеров

в ДМФА 3,7 %, массовое соотношение СКФ-26 30 % и Ф-42 70 %. С помощью СЭМ были сделаны снимки образцов полимерного фильтрующего элемента (рис. 3.2 а).

Как видно из рис. 3.2 (а), образцы комбинированного фильтрующего элемента состоят из «толстых» ПП волокон и «тонких» субмикронных фильтрующих волокон. Однако образцы композиции СКФ-26 и Ф-42 (30 % / 70 %) имеют неравномерную структуру. На рис. 3.2 (а) наблюдаются участки с локальным или полным отсутствием тонких фильтрующих волокон, агломерации по контуру разрыва «сетки». Дефектность материала фильтрующего элемента объясняется размягчением и последующим расплавлением (разрывом) волокон при контакте с «горячими» волокнами ПП.

С помощью метода инфракрасной термографии (ИТ) во время процесса экструзии была измерена температура матрицы несущих волокон, имеющей непосредственный контакт фильтрующими полимерными волокнами полученными электроформованием. На рис. 3.3 изображение распределения температуры расплава ПП на теплоизолированной мишени, с права на картинке часть аппарата «Экструдер». Распределение температуры получено с помощью 192,2 °C инфракрасного тепловизора Fluke Ti300, где максимальная температура расплава ПП.

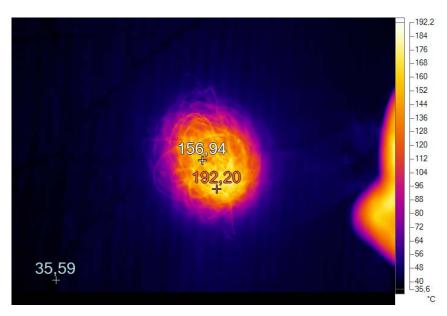


Рисунок 3.3 – Изображение температур расплава ПП в процессе формования

Согласно измерениям, для выбранного технологического режима максимальная температура ПП волокон изменяется в диапазоне 190–200 °С. Если в процессе формования фильтрующего элемента фильтрующие волокна не будут выдерживать температуру ПП, то существует вероятность размягчения волокон и последующего разрушения (релаксации), что наблюдалось в случае СКФ-26 на рис. 3.2 (а).

Таким образом, было установлено, что одним из основных параметров полимерам, волокнообразующим предъявляемым К применяемым ДЛЯ комбинированного формования, должна стать термическая стойкость. Среди волокнообразующих полимеров, применяемых ДЛЯ электроформования, обладающих повышенными термомеханическими характеристиками, хорошо зарекомендовал себя ПА [46-56]. Среди ПА наибольшей температурой плавления обладает полигексаметиленадипинамид или ПА 6.6. ( $T_{плав} = 260$  °C,  $MM = 3 \cdot 10^4$ ). Для получения термостойких образцов комбинированного фильтрующего элемента приготавливался полимерный раствор для электроформования: массовая доля ПА 6.6. в муравьиной кислоте 7 %. На рис. 3.2 (б) наблюдается равномерная сеточная структура «тонких» волокон ПА 6.6., что доказывает термоустойчивость композиции фильтрующего элемента. Химический состав производственного сырья (полимеров) подтверждался с помощью метода ИКФС [57, 58] (см. Приложение А).

В результате, для базовой технологии формования в качестве фильтрующих субмикронных волокон был выбран ПА 6.6. Однако, с точки зрения токсичности (технологический фактор), растворы ПА 6.6. на основе муравьиной кислоты имеют на порядок меньший ПДК рабочей зоны в сравнении с ДМФА. Решением снижения токсичности растворов может стать смесь растворителей муравьиной (ПДК в воздухе рабочей зоны 1 мг/м³) и уксусной кислоты (ПДК в воздухе рабочей зоны 5 мг/м³). Для массового производства фильтрующего полимерного элемента автор рекомендует использовать следующие рецептурные композиции полимер / растворитель: массовая доля ПА 6.6. в растворителе 6 - 12 %, массовое

соотношение растворителей (муравьиная кислота / уксусная кислота) 70 % / 30 % или 50 % / 50 %.

#### 3.3 Измерительный стенд

Для динамики электрического заряда толстослойного исследования пористого диэлектрика при его естественной разрядке была изготовлена установка, которая моделирует технологический процесс во время намотки фильтрующего элемента (рис. 3.4). Исследуемая система представляет собой фильтрующий элемент цилиндрической формы внутренним диаметром 80 мм, толщиной 20 мм, длиной 600 мм, пористость фильтрующего элемента 80 – 85%, средний диаметр волокна фильтрующего элемента 200 мкм. Фильтрующий элемент надет на барабан (шпулю) диаметром 80 мм, имеющий на поверхности проводящий заземленный слой шириной 400 мм. Барабан способен вращаться вокруг своей оси. Далее для упрощения понимания физического процесса, задача намотки фильтрующего элемента квазидвумерной считается квазистационарной.

Из-за малого диаметра волокна, получаемого процессе электроформования и высокой напряженности поля на поверхности волокна, воздух в пучке волокна должен быть сильно ионизован. Таким образом, вместе с заряженным волокном на поверхность формуемого волокнистого материала фильтрующего элемента поступает поток аэроионов, который так же, как и заряженное волокно сообщает поверхности электрический заряд [26-29]. Сложно сказать, какой из механизмов переноса заряда преобладает, однако, можно предположить, что поверхностный заряд, сообщенный аэроионами и заряд, принесенный осажденными волокнами, на макро-масштабе, могут одинаково компенсироваться аэроионами, противоположного знака имеющимися в воздухе. Поэтому, в данной работе при изучении стекания заряда или перезарядки материала фильтрующего элемента, полученного методом электроформования,

сделано предположение, что нанесение электрического заряда волокном и аэроионами равносильно. Поэтому факел электроформования в данном исследовании заменен на коронирующий проволочный электрод, параллельный оси шпули.

Пространство вокруг шпули разделено непроводящими стенками на 2 части: область, в которой расположен коронирующий электрод, и область измерения, в которой будут располагаться измерительные устройства. Эти области отделены друг от друга, чтобы не происходило прямого перетекания аэроионов с коронирующего электрода на измерительный электрод, то есть, чтобы прямое влияние коронирующего электрода на системы измерения было минимально (рис. 3.4). Диэлектрические стенки не касаются поверхности фильтрующего элемента, зазор между ними и поверхностью фильтрующего элемента составляет 3 мм.

Стенд имеет диэлектрический каркас, что позволяет свести к минимуму утечки электрического заряда и влияние конструктивных элементов на процесс переноса заряда. Частота вращения шпули может варьироваться в диапазоне от 0,04 до 5 Гц, что соответствует режимам работы подобных станков на производстве. Коронирующий электрод расположен параллельно оси фильтрующего элемента на расстоянии 20 мм от его поверхности и подключен к ИВН. Источник способен выдавать напряжение от минус 7,5 до минус 50 кВ, точность установки напряжения 1% от полной шкалы. Диаметр электрода составляет 0,2 мм.

При включении ИВН, в области электрода возникает коронный разряд, а электрическое поле от коронирующего электрода направлено через диэлектрический материал фильтрующего элемента на заземленную шпулю. Ионы, двигаясь вдоль линий электрического поля, стремятся достичь поверхности шпули. На пути движения ионов находится преграда из пористого диэлектрика (материал фильтрующего элемента), на поверхности волокон которого они задерживаются. При этом растет заряд поверхности фильтрующего элемента

(поверхности волокон внешнего слоя) и, соответственно, увеличивается потенциал этой области. Так как вокруг установки есть далеко отстоящие заземленные объекты, коронный разряд на электроде горит независимо от того, фильтрующий элемент нет, перенос заряжен ИЛИ поэтому заряда коронирующего электрода на поверхность фильтрующего элемента прекратится, когда потенциал поверхности фильтрующего элемента станет равен потенциалу коронирующего электрода.

Электрод может быть установлен на разном расстоянии от поверхности фильтрующего элемента. Предполагается, что качественно на картину исследуемого явления этот параметр не влияет. Поэтому в данном эксперименте расстояние от коронирующего электрода до поверхности выбрано равным 20 мм. С противоположной стороны шпули размещается устройство, реализующее тот или иной способ снятия заряда с поверхности фильтрующего элемента.

## 3.4 Методика измерения потенциала поверхности материала фильтрующего элемента

Для измерения потенциала использовался электростатический трехпредельный киловольтметр С100 (рис. 3.4), предназначенный для измерения величины высокого напряжения в диапазоне от 5 до 75 кВ. Киловольтметр С100 предназначен для измерения постоянного напряжения, либо эффективного переменного напряжения в диапазоне частот от 45  $\Gamma$ ц до 500 к $\Gamma$ ц в рабочем диапазоне исследуемого процесса (10 - 25 кВ). Предел допускаемой основной погрешности С100 на всех отметках шкалы диапазона не превышает  $\pm 1,5$ %.

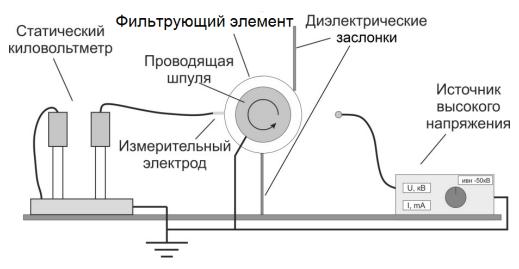


Рисунок 3.4 — Схема измерения потенциала на поверхности фильтрующего элемента с помощью статического киловольтметра C100

Измерения величины потенциала выполнялись на подвижной поверхности вращающегося диэлектрического фильтрующего элемента (рис. 3.4). В качестве измерительного электрода использовалась медная щетка (подобная щеткам в электрофорных машинах).

Было проведено измерение распределения потенциала вдоль поверхности фильтрующего элемента (рис. 3.5).

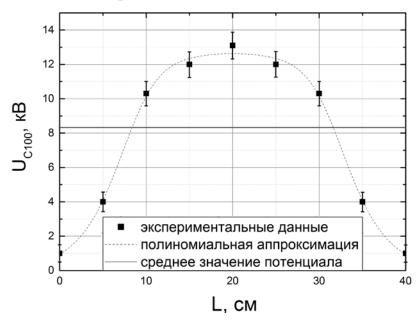


Рисунок 3.5 – Распределение потенциала вдоль поверхности фильтрующего элемента

Из рис. 3.5 видно, что максимальная величина потенциала поверхности фильтрующего элемента находится по центру и больше средней величины потенциала примерно в 1,5 раза. В окрестности центральной части фильтрующего элемента (плюс/минус 100 мм) задачу можно считать квазидвумерной. На краях фильтрующего элемента потенциал практически равен нулю.

# 3.5 Измерение характерных времен процесса естественного стока заряда с материала фильтрующего элемента

Важной характеристикой в производстве комбинированного фильтрующего элемента является скорость вращения шпули, изменение которой позволяет управлять структурой укладки несущего волокна производимого фильтрующего волокна. Поэтому важно знать, как зависит потенциал поверхности фильтрующего элемента от скорости его вращения, а точнее, каковы характерные времена динамических процессов, которые имеют место при зарядке и разрядке поверхности материала фильтрующего элемента.

В связи с этим была проведена серия экспериментов по измерению потенциала поверхности пористого диэлектрического материала фильтрующего элемента. Частота вращения шпули изменялась в диапазоне от 0,1 до 5 Гц. Измерительный электрод (медная щетка) был установлен на противоположной стороне фильтрующего элемента от коронирующего электрода. На коронирующий электрод подавалось напряжение минус 20 кВ.

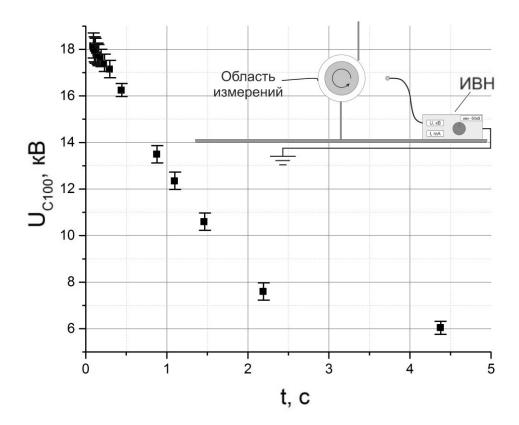


Рисунок 3.6 – Зависимость потенциала поверхности фильтрующего элемента от времени перемещения участка поверхности от разделительной заслонки до измерительного электрода (t = 0,38\*T)

Из рис. 3.6 видно, что потенциал поверхности фильтрующего элемента зависит от скорости вращения шпули, что подтверждает утечку заряда с поверхности пористого диэлектрика.

Если предположить, что вся поверхность фильтрующего элемента, расположенная в области со стороны коронирующего электрода, отделенная диэлектрическими стенками от области, где расположены средства измерения, заряжена и находится в равновесии с коронирующим электродом, то отсчет времени разрядки следует вести с момента пересечения границы задаваемой диэлектрической стенкой.

Измерительный электрод киловольтметра находится на противоположной стороне от коронирующего электрода, и его расположение не изменяется,

следовательно, время, за которое заряженная область фильтрующего элемента доходит до щетки, зависит от частоты вращения шпули и равно Т\*135/360. Так как угол между диэлектрической заслонкой, расположенной со стороны набегающей поверхности фильтрующего элемента и измерительным электродом, равен 135° (рис. 3.6). Чем меньше скорость, тем больше времени потребуется, чтобы заряженная область повернулась к измерительной щетке, и тем больше заряда успевает стечь за это время с поверхности фильтрующего элемента.

Тот же эффект должен наблюдаться при измерении потенциала поверхности в зависимости от угла между коронирующим электродом и измерительным электродом от центра вращения (рис. 3.7). На коронирующий электрод подавалось напряжение минус 20 кВ. Скорость вращения шпули составляла 0,1 Гц. Диэлектрические заслонки были расположены аналогично схеме при измерении потенциала поверхности при разной частоте вращения.

Измерительный электрод киловольтметра закреплялся под углами, как показано на рис. 3.7. Частота вращения шпули оставалась постоянной. Зная угловую скорость шпули, можно вычислить время, которое затрачивается на поворот заряженной области фильтрующего элемента на определенный угол. Таким образом, были произведены измерения остаточного потенциала поверхности фильтрующего элемента для разных значений времени разрядки поверхности фильтрующего элемента (рис. 3.7).

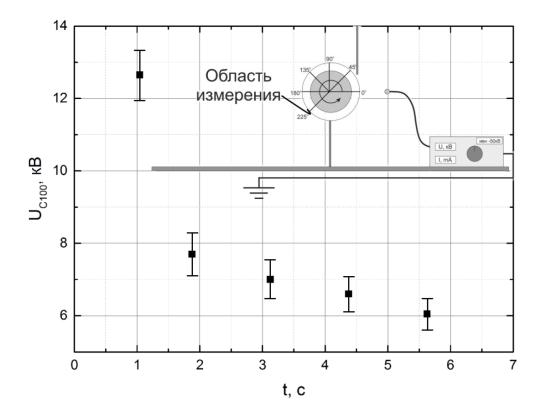


Рисунок 3.7 – Зависимость потенциала поверхности от времени перемещения заряженного участка от границы области зарядки до измерительного электрода

Данные, представленные на рис. 3.7, неоднократно подтверждают наличие стока заряда с поверхности фильтрующего элемента.

Сравним характерные времена быстрого (несколько секунд) процесса стекания заряда по данным разрядки фильтрующего элемента, измеренные в зависимости от угла и от скорости вращения шпули. Для этого расположим результаты обоих измерений на одном графике (рис. 3.8). Как видно из рис. 3.8, после второй секунды характер падения потенциала меняется, соответствующие группы точек хорошо аппроксимируются отдельными линиями. Точка, в которой аппроксимирующая линия, являющаяся в точке начала отсчета касательной для экспоненциальной пересекает зависимости, ось времени, соответствует времени экспоненциального процесса (т) стекания характерному заряда с Считаем, фильтрующего элемента (рис. 3.8). поверхности что разрядка

поверхности начинается с момента пересечения участком поверхности границы определяемой диэлектрической стенкой.

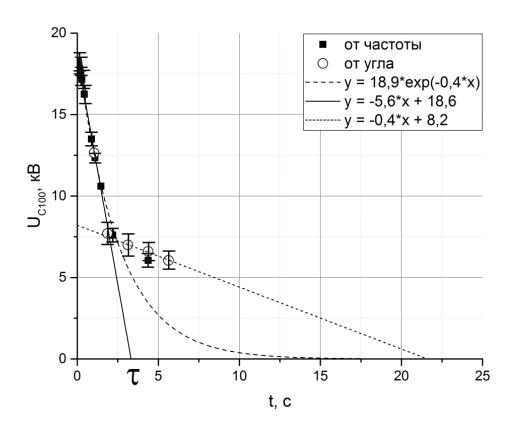


Рисунок 3.8 – Оценка характерного времени стекания заряда с поверхности фильтрующего элемента

# 3.6 Методика измерения заряда материала фильтрующего элемента путем интегрирования импульса тока

Систему «фильтрующий элемент и шпуля» можно представить в виде цилиндрического конденсатора, в котором, однако, внешняя обкладка является диэлектриком. Если считать, что для уединенного фильтрующего элемента плотность поверхностного заряда одинакова, цилиндрическая поверхность фильтрующего элемента является эквипотенциальной.

Когда внешняя поверхность фильтрующего элемента заряжается отрицательными ионами, образующимися в области коронного разряда на

электроде, ШПУЛЮ (внутреннюю обкладку высоковольтном земли на конденсатора) натекает положительный заряд, равный заряду, нанесенному на поверхность фильтрующего элемента. Заряд, осевший на поверхность фильтрующего элемента, можно вычислить, интегрируя ток, который протекает с земли на шпулю через измерительный резистор (R = 1 МОм). Напряжение на резисторе регистрируется с помощью АЦП (рис. 3.9). Здесь и далее, перед каждым экспериментом по зарядке, материал фильтрующего элемента разряжался путем орошения изопропанолом.

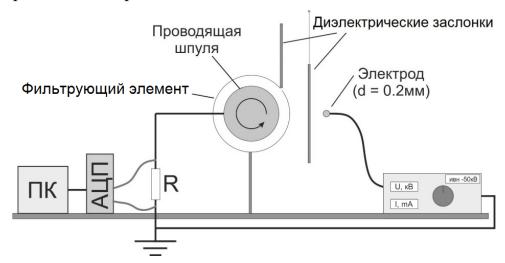
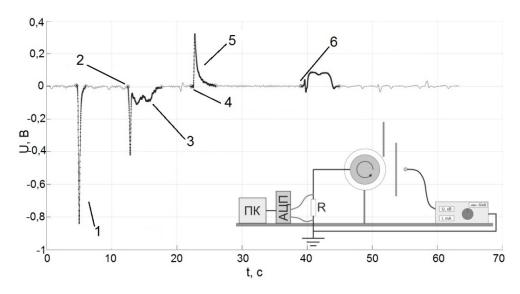


Рисунок 3.9 – Схема измерения заряда, натекающего на поверхность фильтрующего элемента: АЦП, R – резистор (1 МОм)

В установку добавлена подвижная диэлектрическая заслонка, которая позволяет в любое время закрыть фильтрующий элемент от потока ионов (заслонка 1) со стороны коронирующего электрода.

В исходном положении заслонка 1 закрыта. Когда на коронирующий электрод подается высокое напряжение, на шпуле индуцируется заряд (зарядизображение), что на осциллограмме соответствует первому большому пику (1 рис. 3.10), закрытая диэлектрическая заслонка этому не препятствует, т.к. проницаема для электрического поля.



1 — включение ИВН; 2 — открытие заслонки; 3 — зарядка фильтрующего элемента; 4 — закрытие заслонки; 5 — выключение ИВН; 6 — открытие заслонки после выключения ИВН, стекание заряда с фильтрующего элемента на электрод;

Рисунок 3.10 – Осциллограмма, регистрируемая АЦП во время проведения эксперимента

При открытии заслонки (2 рис. 3.10) между коронирующим электродом и фильтрующим элементом, поверхность фильтрующего элемента начинает заряжаться аэроионами. В первый момент времени едино моментно заряжается часть фильтрующего элемента, находящаяся перед коронирующим электродом (3 рис. 3.10). На осциллограмме этот процесс также отображается в виде пика, потом фильтрующий элемент, поворачиваясь до полного оборота, дозаряжается, на осциллограмме этот процесс соответствует полке (3 рис. 3.10). Стоит отметить, что фильтрующий элемент полностью заряжается за один оборот, так как длительность полки зарядки соответствует периоду оборота фильтрующего элемента.

После того как фильтрующий элемент зарядился, закрывается диэлектрическая заслонка (4 рис. 3.10), и выключается ИВН (5 рис. 3.10). Индуцированный заряд-изображение стекает со шпули, что соответствует

третьему обратному пику (5 рис. 3.10). После выключения ИВН при повторном открытии заслонки было замечено (6 рис. 3.10), что заряд с поверхности фильтрующего элемента стекает. Предположительно на электроде, подключенном к выключенному источнику, наблюдается коронный разряд противоположного знака, индуцированный полем расположенного рядом заряженного фильтрующего элемента. Таким образом, была обнаружена возможность разрядки поверхности фильтрующего элемента заземленным электродом. Описанный способ разрядки с технологической точки зрения прост и удобен.

Далее был проведен сравнительный эксперимент ПО измерению фильтрующего нанесенного на поверхность элемента заряда путем интегрирования тока и путем измерения локального потенциала поверхности с Напряжение, последующим вычислением полного заряда. поданное коронирующий электрод составляло минус 25 кВ.

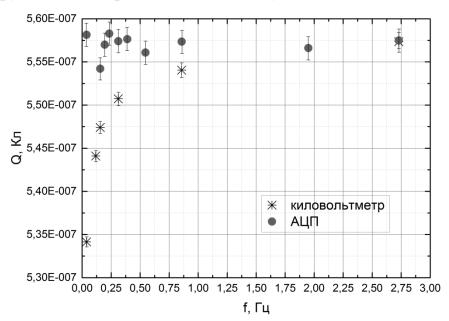


Рисунок 3.11 – Зависимость поверхностного заряда на фильтрующем элементе, измеренного с помощью АЦП и зависимость потенциала поверхности фильтрующего элемента, измеренного киловольтметром (потенциал пересчитан в заряд), от частоты вращения шпули

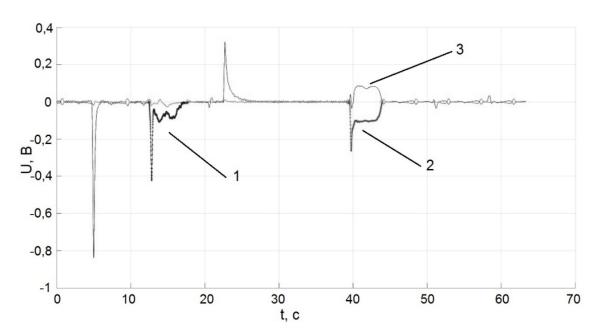
Из рис. 3.11 видно, что поверхностный заряд, измеренный с помощью АЦП, не зависит от скорости вращения шпули. Это разногласие данных объясняется тем, что интегрируя импульс тока, получается заряд равный по модулю и противоположный по знаку заряду, перенесенному на фильтрующий элемент аэроионами за один период вращения шпули. Этот метод измерения не учитывает последующей компенсации этих зарядов путем стекания заряда с материала фильтрующего элемента на проводящую шпулю. Метод измерения потенциала поверхности киловольтметром, напротив, является локальным и измеряет величину потенциала, пропорциональную поверхностной плотности заряда в поверхности фильтрующего Этот определенной точке элемента. метод чувствителен к изменению заряда внешней поверхности фильтрующего элемента и регистрирует его уменьшение со временем.

Поэтому, можно сделать вывод, что заряд, который переносится на фильтрующий элемент аэроионами за один оборот фильтрующего элемента, постоянен и не зависит от частоты вращения. Кроме того, данный результат показывает, что сток заряда с внешней поверхности фильтрующего элемента происходит через толщу материала на заземленную подстилающую поверхность, а не в окружающее пространство. Однако после зарядки поверхности фильтрующего элемента с начального нулевого значения до равновесного состояния, пока не закрыта диэлектрическая заслонка, отделяющая коронирующий электрод от поверхности фильтрующего элемента, должен наблюдаться ток утечки.

## 3.7 Динамика разрядки материала фильтрующего элемента на больших временах

Чтобы продемонстрировать всю полноту картины процесса разрядки фильтрующего элемента, проведены измерения остаточного заряда на поверхности фильтрующего элемента на временах много больших периода

вращения (десятки минут) (рис. 3.12). Проводился он следующим образом: вначале при зарядке фильтрующего элемента (1 рис. 3.12) полный наносимый заряд измерялся методом интегрирования тока натекающего с земли на шпулю. После зарядки фильтрующего элемента обе заслонки закрыты, а ИВН выключен, выдерживается определенное время (например, 10 секунд), затем заслонка 2 открывается и с фильтрующего элемента на заземленный электрод стекает заряд (2 рис. 3.12). Импульс тока, прошедший через резистор R (3 рис. 3.12), записывается с помощью второго канала АЦП. Величина стекшего с поверхности фильтрующего элемента заряда вычисляется также, путем интегрирования импульса тока. Затем эксперимент повторяется полностью, изменяется лишь выдержки заряженного фильтрующего элемента в изолированном состоянии, то есть когда ИВН выключен и заслонки закрыты.



1 – сигнал со шпули, который соответствует зарядке фильтрующего
 элемента, 2 – сигнал с заземленного электрода, который соответствует
 разрядке, 3 - одновременно наблюдается такой же импульс тока на
 резисторе, заземляющем шпулю;

Рисунок 3.12 – Сигнал со шпули и сигнал с заземленного электрода

Таким образом, было проведено несколько измерений величины стекающего заряда с поверхности фильтрующего элемента на заземленный электрод при временах выдержки от 10 до 3600 секунд (рис. 3.13). Характерное время стекания заряда с поверхности фильтрующего элемента т составляет около 3000 секунд. Динамика стекания заряда с поверхности фильтрующего элемента удовлетворительно аппроксимируется экспоненциальной зависимостью.

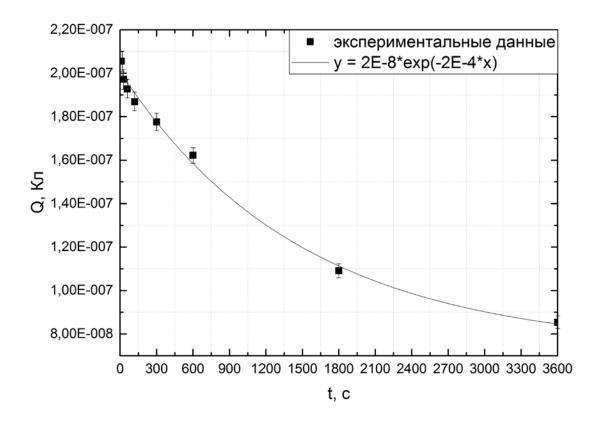


Рисунок 3.13 – Медленный процесс разрядки фильтрующего элемента

Ранее говорилось, что система «фильтрующий элемент – шпуля» может быть представлена как цилиндрический конденсатор. Следовательно, система обладает электрической емкостью, которая пропорциональна заряду и средней величине потенциала поверхности (рис. 3.5). Это означает, что оба метода измерения, описанные выше, с учетом коэффициента пропорциональности, должны регистрировать одну и ту же величину. Таким образом, система

рассматривается как цилиндрический конденсатор, имеющий распределение потенциала по длине фильтрующего элемента, между обкладками которого преимущественно воздух. Расчёт производился по формуле:

$$U = \frac{Q}{\left(\frac{U_{cp}}{U_0}C\right)} \tag{3.1}$$

где  $\frac{U_{cp}}{U_0}$  — отношение среднего потенциала к потенциалу в центре фильтрующего элемента (рис. 3.5), С – постоянная ёмкость системы, величина которой 62 пФ (измерялась мультиметром), Q - остаточный заряд фильтрующего элемента (рис. 3.13). Следует отметить, что в выключенном состоянии высоковольтный выход ИВН не имеет соединения с землей, однако, между выходной высоковольтной клеммой и землей есть емкость, величина которой составляет 490 пФ. Так как емкость ИВН много больше емкости системы «фильтрующий элемент – шпуля», то подключение коронирующего электрода к емкости ИВН равноценна заземлению. На эту емкость и происходит разрядка фильтрующего элемента. Чтобы измерить ёмкость системы (62 пФ), внешняя поверхность фильтрующего элемента была обернута тонким слоем алюминиевой фольги, чтобы сделать цилиндрический конденсатор. Отложив все данные по разрядке фильтрующего элемента на одном графике, получим полную картину разрядки фильтрующего элемента (рис. 3.14). При этом следует помнить, что строго говоря, данные потенциала при медленном процессе разрядки не учитывают, то, что ёмкость системы динамическая величина, которая зависит от распределения заряда в объёме фильтрующего элемента.

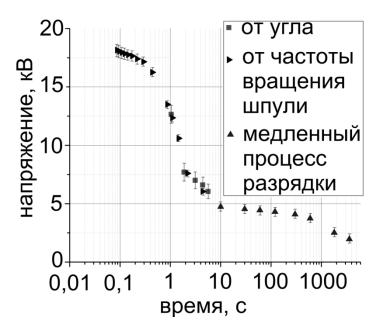


Рисунок 3.14 – Быстрый и медленный процессы разрядки фильтрующего элемента

На рис. 3.14 (по горизонтальной оси логарифмический масштаб) приведены измерения зарегистрированные остаточного заряда, киловольтметром зависимости (рис. 3.7) между коронирующим электродом OT угла И измерительной электродом и от частоты вращения шпули (рис. 3.6); потенциал при медленном процессе разрядки фильтрующего элемента.

Таким образом, существует два различных физических процесса стекания заряда с поверхности фильтрующего элемента. Первый, быстрый процесс стекания заряда, происходит за единицы секунд. Данный характер стока заряда объясняется, скорее всего, тем, что в первое время после зарядки фильтрующего элемента на тонком ПП волокне (средний диаметр волокна фильтрующего элемента равен 130 мкм, что меньше диаметра коронирующего электрода, который составляет 200 мкм) находится большой поверхностный заряд (заряд поверхностного слоя фильтрующего элемента отнесенный к площади волокна этого слоя), вследствие чего в начальный момент времени, сразу после зарядки, напряженность у поверхности волокна, вероятно, велика настолько, что на волокне горит коронный разряд, и электрический заряд с внешней поверхности фильтрующего элемента дрейфует сквозь диэлектрический материал к земле (поверхность шпули), напряженность на поверхности волокон быстро

уменьшается и скорость стекания заряда снижается, заряд при этом распределяется в толще материала фильтрующего элемента.

Второй, медленный, характерное время стекания заряда 50 минут, характер зависимости медленного процесса стекания заряда с фильтрующего элемента предположительно объясняется проводимостью воздуха и поверхностной проводимостью материала фильтрующего элемента.

#### 3.8 Способ ускоренной разрядки фильтрующего элемента

Ранее было замечено, что заряд с поверхности фильтрующего элемента стекает на электрод, подключенный к обесточенному ИВН. Поэтому была реализована схема, позволяющая разряжать поверхность фильтрующего элемента заземленным проволочным электродом. В схеме эксперимента с противоположной коронирующему электроду стороны фильтрующего элемента, симметрично, параллельно оси шпули был установлен еще один электрод (рис. 3.15). Между фильтрующим элементом и заземленным электродом присутствует диэлектрическая заслонка 2.

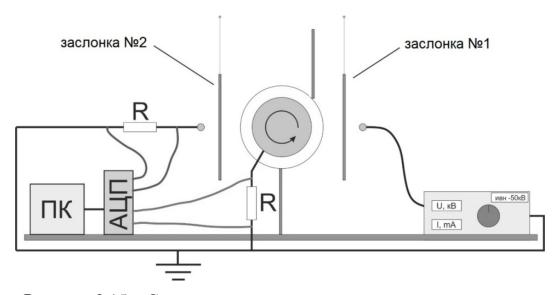


Рисунок 3.15 — Схема измерения величины заряда снимаемого с поверхности фильтрующего элемента заземленным электродом

Так как в условиях производства использование электрода диаметром 0,2 мм может быть нежелательно по причине его непрочности, была исследована возможность снятия заряда более толстым электродом (0,5 мм) и кромкой тонкой металлической ленты (толщина ленты 20 мкм).

Во время проведения эксперимента на коронирующий электрод подавалось напряжение минус 25 кВ. Частота вращения шпули была – 4 Гц, чтобы эффект стекания заряда оказывал наименьшее влияние на результаты.

Из рис. 3.16 видно, что заземленный электрод на расстоянии от 0 до 5 мм снимает весь заряд с поверхности фильтрующего элемента. При удалении электрода на расстояние до 30 мм величина разрядки линейно спадает, более 30 мм – зависимость, по-видимому, становится более пологой. Результаты снятия заряда тонким и толстым электродом совпадают, что позволяет использовать технологически более удобный толстый электрод. Снятие заряда тонкой металлической лентой ощутимых результатов не даёт (рис. 3.16).

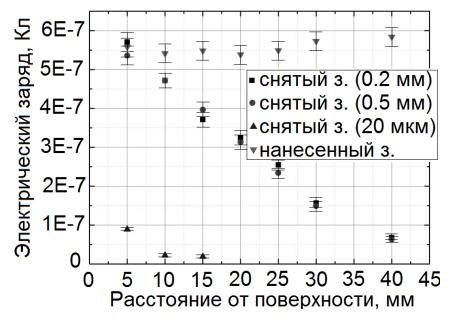


Рисунок 3.16 — Сравнение величины поверхностного заряда с величиной заряда, снятого заземленным электродом, в зависимости от расстояния между заземленным электродом и поверхностью фильтрующего элемента

#### 3.9 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 3

На основе анализа научной периодики волокнистых фильтрующих материалов, полученных методом электроформования и экспериментальных выбрана наиболее исследований, эффективная композиция каркасных фильтрующих полимерных волокон. В результате подбора, с точки зрения эксплуатационных свойств фильтрующего элемента, была композиция ПП/ПА 6.6 и в качестве раствора электроформования композиция ПА 6.6. в муравьиной кислоте. С точки зрения производственной технологии, автор рекомендует использовать растворы электроформования с массовой долей ПА 6.6. в растворителе 6-12 %, массовое соотношение растворителей (муравьиная кислота / уксусная кислота) 70 % / 30 % или 50 % / 50 %.

Разработана методика измерения потенциала поверхности и поверхностного заряда слоя пористого диэлектрического материала фильтрующего элемента на металлической заземленной подложке, включающая измерение потенциала поверхности пористого диэлектрика с помощью статического киловольтметра и поверхностного заряда путем интегрирования импульса тока протекающего с подложки на землю при зарядке поверхности диэлектрика.

Показано, ЧТО динамика стекания заряда с внешней поверхности материала фильтрующего волокнистого элемента представлена двумя физическими процессами – быстрым, с характерным временем единицы секунд, котором внутри волокнистого материала, по-видимому, ионизация воздуха, и медленным (характерное время – десятки минут), обусловленным процессами проводимости.

Обнаружена возможность разряжать поверхность фильтрующего элемента заземленным проволочным электродом, на котором вблизи заряженной поверхности диэлектрика возникает коронный разряд противоположного знака, разряжающий поверхность диэлектрика. Показано, что таким способом можно снять с фильтрующего элемента долю заряда, близкую к 100 %. Для массового производства фильтрующих элементов рекомендовано использовать заземлённый электрод диаметром 500 мкм на расстоянии не более 5 мм от поверхности материала.

Основные результаты приведенных в главе исследований представлены в [59].

## 4 ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО ФИЛЬТРУЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

#### 4.1 Постановка задачи

В настоящей главе рассматривается:

- 1. Материалы формования комбинированного фильтрующего элемента.
- 2. Опытная установка (станок), способная формовать комбинированный фильтрующий элемент за один технологический этап.
- 3. Методика изготовления опытных образцов комбинированного элемента для объемного фильтрования.
- 4. Методика испытаний фильтрующей способности комбинированного элемента.
- 5. Ресурсные испытания образцов комбинированного фильтрующего элемента с различным распределением фильтрующих волокон.
  - 6. Сравнение экспериментальных данных с данными моделирования.

Комбинированный фильтрующий элемент испытывался как на начальные так и на изменяющиеся в процессе характеристики фильтрования для выбранного периода эксплуатации (ресурсные испытания). Ресурсные испытания фильтрующей способности и опытная эксплуатация с табачным загрязнителем показали, что функционально-градиентные фильтрующие элементы имеют большой потенциал применения для различных приложений воздухоочистки. Сведением данных испытаний и моделирования проведена апробация численной физико-математической модели работы фильтрующего элемента.

### 4.2 Способ формования и материалы

Новый волокнистый фильтрующий элемент изготовлен из двух типов волокон. Первый — полимерные волокна диаметром 100-300 мкм (этот тип назван крупномасштабными волокнами). Такие волокна получают на основе технологии экструзии с аэродинамическим выдувом расплава (melt-blown process) [14].

Данная технология хорошо известна и широко применяется для изготовления волокнистых фильтрующих элементов для воды. В технологии экструзии используют широкий класс полимеров – термопластов. При укладке на барабан волокна сплавляются между собой в точках контакта. Этот тип волокон образует объемный несущий каркас фильтрующего элемента, то есть, выполняет силовую функцию. В качестве термопласта для экструзии использовался гомополимер пропилена (ПП) БАЛЕН 01270 производства ОАО «Уфаоргсинтез».

Второй тип волокон – полимерные волокна, диаметром 50-500 нм (этот тип назван мелкомасштабными волокнами). При формовании фильтрующего элемента, мелкомасштабные волокна наносятся на формуемый слой материала послойно, соединяясь со слоями экструдированного волокна. Этот тип волокна в объеме фильтрующего элемента крепится на объемном несущем каркасе из экструдированных волокон И обеспечивает процесс фильтрования. лабораторных образцов фильтрующих элементов волокна получаются путем электроформования волокнистого наноматериала (electrospinning) из раствора ПА 6.6. производства Xinxiang Nylon Co., Ltd. в муравьиной кислоте класса чистоты «ч.» изготовленной в соответствии с ГОСТ 5848-73. В экспериментах применялся раствор, в котором массовая концентрация ПА 6.6. составляла 7 %.

Комбинированный фильтрующий элемент, получаемый по описываемой технологии, представляет собой цилиндр. Толщина фильтрующего элемента может меняться в широких пределах – от 1 до 40 мм и более. Внутренний диаметр цилиндра может быть в диапазоне от 30 мм и более (рис. 4.1). Комбинированный фильтрующий элемент состоит из двух типов волокон (рис. 4.1). Волокна большого диаметра выполняют функцию распределенного трехмерного каркаса, волокна малого диаметра – обеспечивают процесс фильтрования.

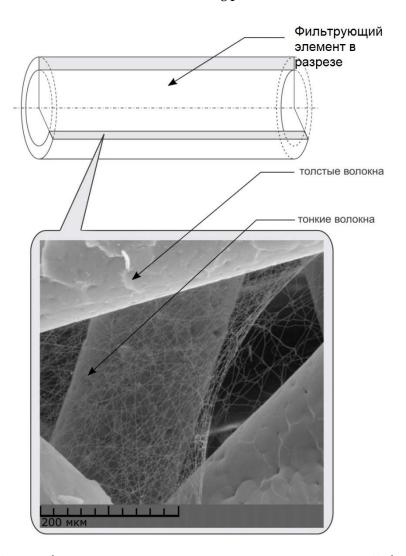


Рисунок 4.1 – Схема фильтрующего элемента цилиндрической формы и СЭМ микрофотография внутренней структуры образца фильтрующего элемента, которая демонстрирует размеры волокон двух масштабов

На рис. 4.2 схематически показан экспериментальный формовочный станок для получения комбинированного фильтрующего элемента. В состав станка входит экструдер, волюметрический шприцевой насос и каретка.

Экструдер производительностью 1 кг/ч ПП волокон оснащен фильерой с одним отверстием, диаметром 1 мм. Вокруг фильеры расположено кольцевое воздушное сопло, в которое подается предварительно закрученная струя горячего воздуха (25 – 35 л/мин). На выходе из сопла образуется закрученный направленный поток воздуха, который подхватывает струю расплава полимера, вытягивает в тонкую спираль с увеличивающимся по мере удаления от фильеры диаметром и набрасывает ее на шпулю, которая вращается вокруг своей оси.

Шприцевой насос подает рабочий раствор полимера головку электроформования с заданной производительностью (до 0.65 мл/ч). Головка электроформования представляет собой насадку на шприц, в которой по металлическому капилляру с внешним диаметром 200 мкм, подается рабочий раствор, а по коаксиальной капилляру трубке внешним диаметром 1,2 мм подаётся воздух, содержащий насыщенные пары спирта для предотвращения засыхания раствора на кончике капилляра [40, 30]. Другими словами, для того, чтобы на конце капилляра, через который подаётся раствор, не накапливался застывший полимер, на капилляр «одета» трубка, по которой подаётся воздух насыщенный парами растворителя. К капилляру подключено напряжение минус 15 кВ – минус 40 кВ. При подаче раствора на конце капилляра возникает участок свободной поверхности раствора, который вытягивается электрическим полем, образуя непрерывную тонкую струю в направлении электрического поля. Во время движения струи от капилляра до противоположного электрода, струя продольно разрывается поверхностным зарядом вдоль (ветвится) и растягивается, достигая субмикронных диаметров [14]. За время полета струи растворитель испаряется, тонкое отвержденное волокно осаждается на подложку.

Каретка приводит в движение шпулю, на которой происходит формование фильтрующего элемента. Каретка совершает возвратно-поступательные движения. Таким образом, на шпулю послойно наносится волокно. При достижении требуемого внешнего диаметра фильтрующего элемента, каретка останавливается, фильтрующий элемент снимается со шпули специальным съемником. Рабочая поверхность шпули выполнена из металла и заземлена через скользящий контакт.

шприцевой Экструдер И волюметрический насос расположены противоположных сторон от шпули и наносят волокно на барабан навстречу друг другу (рис. 4.2). ПА волокна, в силу особенности технологии их получения обладают высоким поверхностным зарядом. При нанесении волокна на формуемый фильтрующий элемента поверхность материала приобретает поверхностный электрический заряд, разность потенциалов между капилляром и поверхностью при этом уменьшается. После нанесения нескольких слоев

комбинированного фильтрующего элемента режим процесса электроформования сильно меняется, что препятствует получению толстослойного материала. Поскольку толщина формуемого фильтрующего элемента достаточно велика, требуется снимать нанесенный поверхностный заряд в течении всего времени изготовления фильтрующего элемента. При формовании лабораторных образцов снятие заряда осуществляется аэроионами противоположного знака. Другими словами поверхность цилиндрического фильтрующего элемента перезаряжается во время всего процесса формования. Источник аэроионов располагается над шпулей (рис. 4.2) со стороны экструдера и представляет собой 200 мкм проволоку (нихром) с подведенным к ней положительным напряжением (до плюс 15 кВ).

В результате процесса объединенного формования в зависимости от режима экструзии получается слоистый фильтрующий элемент пористостью 70 – 80 % со стохастическим распределением волокон внутри каждого слоя (нетканый волокнистый материал) (рис. 4.1) с высокой эффективностью фильтрования аэрозольных частиц.

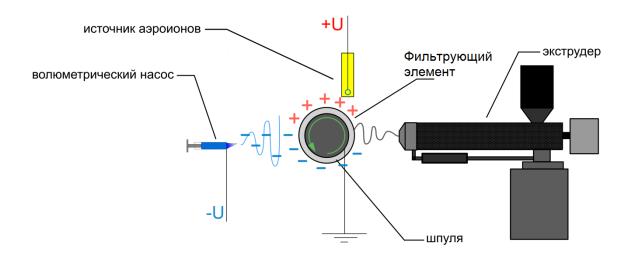


Рисунок 4.2 – Принципиальная схема формования комбинированного фильтрующего элемента из волокон двух масштабов

При помощи СЭМ образцов фильтрующего элемента были получены микрофотографии структуры комбинированного элемента. На микрофотографии образца комбинированного элемента (рис. 4.1) видны толстые волокна,

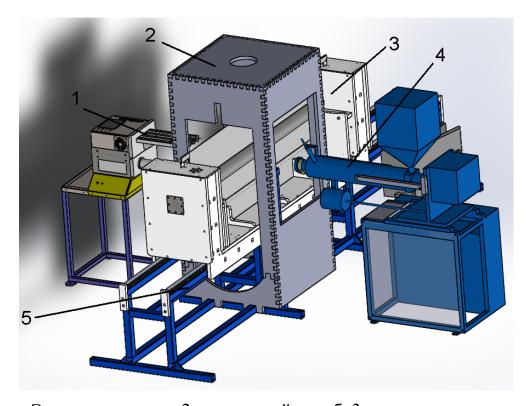
выполняющие функцию каркаса и слои состоящие из тонких фильтрующих волокон.

## 4.3 Разработка аппаратной части технологии формования комбинированных воздушных фильтрующих элементов

## 4.3.1 Разработка станка формования комбинированных фильтрующих элементов

С целью создания технологии производства нового типа воздушных фильтрующих элементов классов E10 - H14 (ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010), на основе имеющейся материально-технической базы был разработан станок формования комбинированных воздушных фильтрующих элементов. Опытная установка представляет собой три стационарных устройства, функционирующих в составе станка по производству комбинированных фильтрующих элементов (рис. 4.3):

- 1. Экструдер (имеющееся оборудование). Его основным назначением является формования электретных ПП фильтрующих элементов [60]. Этот «узел» станка, формует толстые каркасные (100-300 мкм) волокна фильтрующего элемента из расплава полимера (ПП). Задача экструдера стабильное производство несущей матрицы (ПП волокон).
- 2. «Электроспиннер» (разработанное оборудование). Аппарат генерации тонких фильтрующих волокон. «Узел» станка, формующий тонкие (50-500 нм) ПА волокна. Аппарат имеет четыре волюметрических насоса с регулировкой скорости подачи.
- 3. «Каретка» (разработанное оборудование). Аппарат, с помощью которого послойно «выращивается» фильтрующий элемент. Каретка состоит из нескольких основных частей: динамическая часть каретки, вытяжной короб, станина (основание) (рис. 4.3).

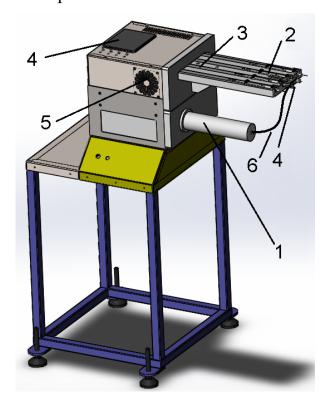


1 – «Электроспиннер», 2 – вытяжной короб, 3 – динамическая часть «Каретки», 4 – экструдер, 5 – основание «Каретки»;
 Рисунок 4.3 – САПР модель станка для производства комбинированных воздушных фильтрующих элементов

Таким образом, для создания опытной установки с целью формования комбинированных фильтрующих элементов с использованием уже готового оборудования (экструдера) были промышленного разработаны: аппарат формования фильтрующих волокон «Электроспиннер» и аппарат на котором формируется фильтрующий элемента «Каретка». «Электроспиннер» и «Каретка» работают обособленно от экструдера и имеют интегрированную систему управления. Процесс экструзии запускается или останавливается при помощи заслонки, которая управляется контроллером. Вытяжной короб (изготавливался из листового вспененного ПВХ) выполняет две функции: предохраняет обслуживающий персонал, обеспечивая удаление газовых продуктов экструзии и агрессивных паров растворителя из атмосферы рабочей зоны и ограничивает доступ к опасному технологическому сектору станка.

#### 4.3.2 Разработка аппарата «Электроспиннер»

Во время работы «Электроспиннер» (рис. 4.4) наносит слои тонких наноили микро- волокон, в зависимости от выбранного класса формования фильтрующих элементов, на шпулю «Каретки» одновременно с нанесением волокон формуемых экструдером. В результате получается фильтрующий элемент, в котором «толстые» экструдированные волокна выполняют функцию объемного каркаса, а «тонкие» волокна обеспечивают процесс фильтрования. Контроллер непрерывно управляет работой шаговых двигателей обеспечивая подачу раствора согласно выбранной программе. Волюметрический шприцевой насос состоит из механической передачи (вала двигателя с трапецеидальной резьбой и латунной гайки) и поршня, скользящего в пазу рельсового основания (рис. 4.4) «Электроспиннера».



1 — ИВН -50 кВ, 2 — медицинские шприцы, 3 — рельсовое основание и поршень насоса, 4 — сенсорный дисплей, 5 — выход охлаждения, 6 — высоковольтный кабель;

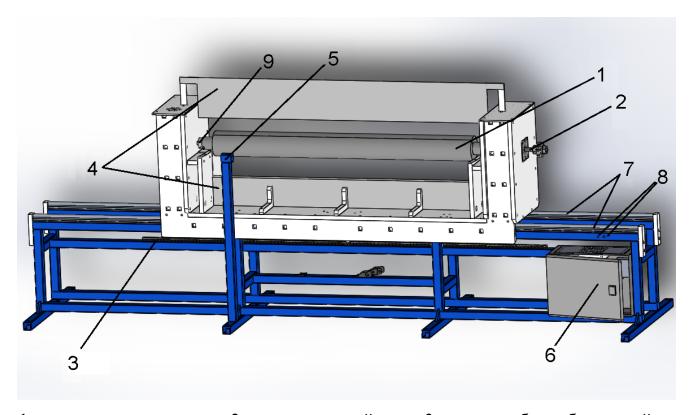
Рисунок 4.4 – САПР модель аппарата «Электроспиннер»

В процессе формования производительность шприцевых насосов меняется по мере увеличения толщины фильтрующего элемента по заданному закону, при ИВН «Электроспиннера» ЭТОМ может изменяться напряжение путем эмулирования переменного резистора. Такая функция прибора необходима для того, чтобы иметь возможность получать заданное распределение количества нановолокон фильтрующего элемента. При работе ПО толщине «Электроспиннера» поддув парами изопропилового спирта рабочих головок электроформования не даёт забиваться капиллярам застывшим раствором.

### 4.3.3 Разработка аппарата «Каретка»

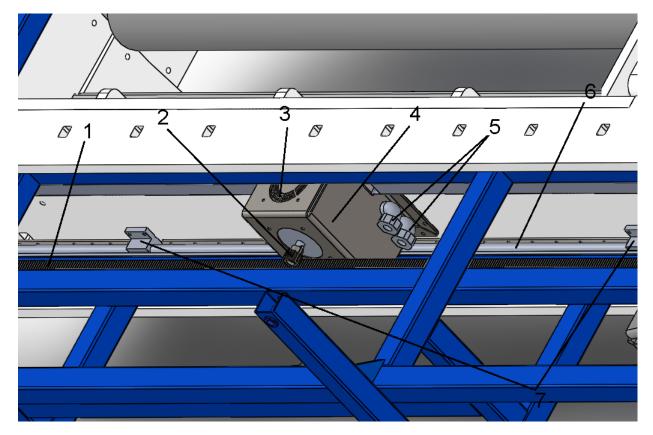
Так как комбинированный способ формования частично основывается на методе электроформования, то для разработки технологии производства требуется заземленная целевая мишень, куда за счёт кулоновских сил будут стремиться заряженные волокна. Поэтому все части каретки (вытяжной короб, динамическая часть), находящиеся в зоне электроформования, должны быть выполнены из диэлектрического материала. Кроме того непроводящий корпус каретки должен защищать электронные компоненты от влияния высокого напряжения. Материал из которого выполнены не проводящие части каретки должен обладать высокими эксплуатационными характеристиками, низким водопоглощением (например, дерево способно впитывать влагу и менять соотношение электрических полей и соответственно режимы технологии), свойствами, способностью электроизоляционными высокой высокими противостоять воздействию агрессивных химических веществ (например, кислот). С точки зрения экономических показателей, динамическая часть должна быть выполнена из материала низкой плотности (чем выше масса, тем должен быть выше момент развиваемый шаговым двигателем), и при этом обладать высокими прочностными характеристиками (прочность, износостойкость, ударная вязкость и.т.д.). Поэтому корпус динамической части каретки (рис. 4.3) изготавливался из листового СВМПЭ. Динамичная (верхняя) часть каретки перемещается на рельсовых направляющих (длина цилиндрических полированных рельс 3000 мм)

с помощью четырех опорных модулей с линейными подшипниками. Таким образом, кроме металлической заземленной шпули к капиллярам «Электроспиннера» обращены только непроводящие детали каретки.



1 – металлическая шпуля, 2 – установочный винт, 3 – прямозубая зубчатая рейка,
 4 – диэлектрические шторки, 5 – датчик расстояния, 6 – ящик силовой электроники, 7 – цилиндрические рельсовые линейные направляющие, 8 – датчики положения, 9 – вал и установочный паз для шпули;
 Рисунок 4.5 – САПР модель аппарата «Каретка»

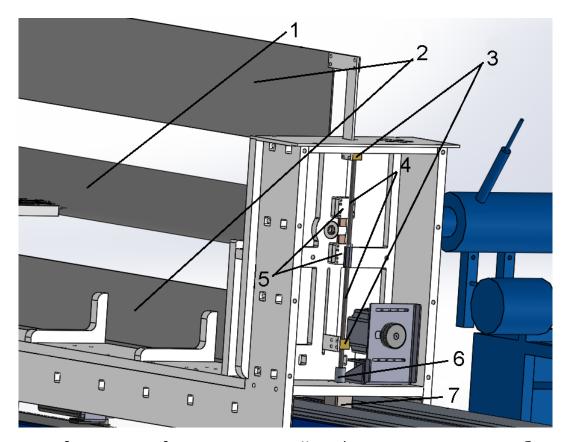
Возвратно поступательное движение «Каретки» реализовано при помощи прямозубой зубчато-реечной передачи (рис. 4.6). Зубчатая рейка закрепляется на основании «Каретки». Шестерня устанавливается на вал шагового двигателя, расположенного на динамической части каретки, и в системе с зубчатой рейкой преобразует вращательное движение двигателя в поступательное.



1 — прямозубая зубчатая рейка, 2 — шестерня на валу двигателя, 3 — выход охлаждения, 4 — ящик двигателя, 5 — «Г» образные кабельные вводы, 6 — рельсовые направляющие, 7 — линейные подшипники;

Рисунок 4.6 – САПР модель устройства системы перемещения динамической части каретки

По мере роста толщины материала otфильтрующего элемента отодвигаются непроводящие разделительные шторки, отделяющие область экструзии от области электроформования (рис. 4.7). Шторки приводятся в действие двумя шаговыми двигателями, расположенными по краям каретки. На стальной вал через соединительную муфту передаётся крутящий момент шагового двигателя. По длине вала «нарезана» метрическая резьба с крупным шагом. Половина длины вала имеет правое направление движения винтовой поверхности (правая резьба) и, соответственно, вторая половина имеет левое направление движения винтовой поверхности (левая резьба). Латунные гайки соединены метизами со шторками и свободно вращаются на валу. Поскольку шторки ограничены вырезами на корпусе «Каретки», то вращение на один период двигателей раздвигает (или сдвигает в зависимости от направления вращения) шторки на расстояние равное двум шагам резьбы вала. На протяжении процесса формования расстояние между шторками и материалом фильтрующего элемента не превышает 5 мм. Таким образом, вращательное движение преобразуется в поступательное.



1 — шпуля, 2 — шторки, 3 — крепёжные гайки, 4 — правая и левая резьба вала, 5 — графитовые щётки, 6 — соединительная муфта, 7 — шаговый двигатель шторок (для наглядности некоторые детали скрыты);

Рисунок 4.7 – САПР модель устройства механики «каретки»

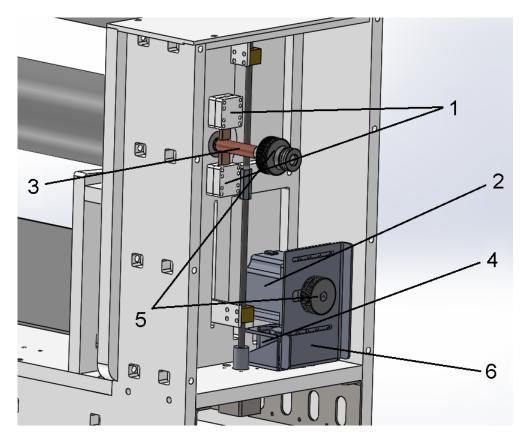
Благодаря стабильной работе экструдера (стабильности факела ПП) шторки не усложняют технологический процесс формования комбинированных фильтрующих элементов. В технологическом процессе шторки выполняют две функции:

1. Функция заслонки. Шторки препятствуют проникновению потоков воздуха от экструдера в область генерации тонких фильтрующих волокон. Без

установки шторок волокна электроформования отклоняются (сдуваются) от направления движения, заданного электростатическими силами воздушными потоками экструдера, не достигая шпули. При малом диаметре шпули процент улавливания тонких волокон без шторок снижается на порядок.

2. Функция снятия электрического заряда. По длине (800 мм) нижней (200 мкм) шторки расположена тонкая нихромовая проволока, которая обеспечивает снятие электрического заряда с поверхности фильтрующего элемента. К проволоке подводится «земля». Для создания лабораторных образцов на нихромовую проволоку подводилось высокое напряжение обратного знака электроформованию (генерация аэроионов), что обеспечивает коэффициент улавливания фильтрующих волокон близкий к 100 %. Однако для массовой технологии производства воздушных фильтрующих элементов нихромовая проволока заземляется, что обеспечивает достаточный коэффициент улавливания, чтобы формовать воздушные фильтрующие элементы.

Графитовые щетки для электродвигателей (графит средней твердости и пружина) использовались с целью заземления проводящей шпули (рис. 4.8). Задача скользящего электрического контакта решалась изготовлением корпуса для графитовой щетки так, чтобы пружинный механизм щётки обеспечивал надёжный контакт с валом вращения шпули. На валу вращения шпули коаксиально (на трении) зафиксирована медная трубка, которая обеспечивает наилучший контакт и долгий срок службы в системе с графитовой щёткой (графитовая щётка заземляется). На валу располагается шкив, который соединяется со шкивом на двигателе ременной передачей с поликлиновым ремнем. Натяжение ремня устанавливается путем перемещения двигателя вращения шпули и фиксации его метизами на кронштейне (рис. 4.8). Вал через систему шариковых радиальных и упорных подшипников и стопорных колец устанавливается в пазах на стенках каретки. Вал имеет паз, в который устанавливается металлическая шпуля и тем самым достигается заземление «приёмника» (шпули).



1 — корпус графитовых щёток, 2 — двигатель вращения шпули, 3 — вал вращения шпули, 4 — вентилятор охлаждения двигателя, 5 — шкивы вала и двигателя, 6 — кронштейн двигателя (для наглядности некоторые детали скрыты);

Рисунок 4.8 – САПР модель заземления шпули и устройство передачи вращения шпули

Подобная конструкция не исключает возможность перенесения высокого обеспечить напряжения на проводящую шпулю, которые МОГУТ 100 % коэффициент улавливания фильтрующих волокон. Однако, такой технологической схеме способ производства фильтрующих элементов усложнятся.

## 4.3.4 Управление режимом работы опытного станка формования комбинированных фильтрующих элементов

Управление «Кареткой» и «Электроспиннером» осуществляется с помощью сенсорного дисплея. Для сенсорного дисплея разработан пользовательский интерфейс управления «Кареткой», «Электроспиннером» и заслонкой экструдера. На дисплее реализовано управление шаговыми моторами в ручном режиме: кнопки движения шприцевым насосом (для установки шприцов). Индикация параметров процесса выводится на сенсорном дисплее прибора. По окончанию формования фильтрующего элемента динамическая часть «Каретки» (рис. 4.3) выкатывается за пределы «Электроспиннера». В результате, «Каретка», изолирована (находится вне зоны электроформования) от высокого напряжения, что даёт оператору станка возможность безопасно снять шпулю с готовым фильтрующим элементом, не прерывая процесс электроформования.

Толщина фильтрующего элемента контролируется датчиком расстояния, который измеряет расстояние до поверхности фильтрующего элемента. Сигнал с датчика усредняется по одному периоду продольного движения каретки. Датчик установлен на основании «Каретки» со стороны экструдера со смещением вдоль оси фильтрующего элемента (рис. 4.5), поэтому датчик периодически выходит за пределы фильтрующего элемента. Интервалы времени выхода датчика за пределы фильтрующего элемента удаляются из усреднения. Для обнаружения края фильтрующего элемента служат индуктивные датчики (рис. 4.5). В процессе работы контроллер измеряет напряжение на информационных выходах ИВН (выходы – тока и напряжение).

На рис. 4.9 схема управления станком формования комбинированных фильтрующих элементов: 1-3 — индуктивные датчики положения (контроллер регистрирует передачу импульсов); 4 — датчик расстояния до фильтрующего элемента (датчик толщины фильтрующего элемента); 5 — 12 — программируемые блоки управления шаговыми двигателями; 13 — 16 — шаговые двигатели шприцевого насоса;17 — шаговый двигатель для обратно поступательного движения «Каретки»; 18 — шаговый двигатель вращения шпули; 19 — 20 —

двигатели шторок; 21 — электро-клапан сжатого воздуха для управления заслонкой (металлическая заслонка устанавливается на экструдер); 22 — ИВН, макс напряжение минус 50 кВ; 23 — эмулятор переменного резистора; 24 — преобразователь интерфейсов.

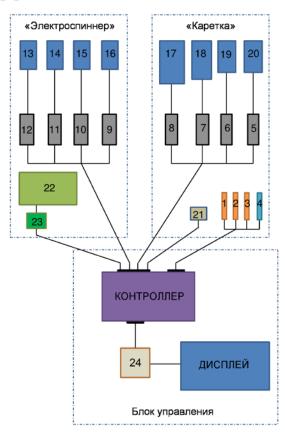


Рисунок 4.9 – Структурная схема управления станком формования комбинированных фильтрующих элементов

Контроллер выполняет один из заданных алгоритмов управления внешними устройствами (шаговыми моторами, заслонкой экструдера). Для производства каждого типа фильтрующих элементов реализуется свой заданный алгоритм работы, например, в соответствии с требованиями производства выбранного типа фильтрующих элементов (длина фильтрующего элемента, толщина материала, профиль фильтрующих волокон) по заданному закону изменяются обороты шаговых двигателей (вращение шпули и линейная скорость перемещения динамической части «Каретки»).

В процессе формования происходит автоматическое управление напряжением ИВН «Электроспиннера» в зависимости от намотанной толщины

фильтрующего элемента (расстояние до поверхности фильтрующего элемента контролируется датчиком). Заслонка автоматически открывается при нажатии на сенсорном экране кнопки процесса формования и закрывается при окончании программы намотки фильтрующего элемента. При аварийных значениях показаний датчиков (в случае достижения критических параметров процесса) срабатывает сигнализация.

Подобно конвейерному производству ФП непроводящие части станка: шторки, вытяжной короб, корпус динамической части каретки выполняют роль электростатического экрана, что создаёт условия направленного осаждения заряженных волокон преимущественно на заземленную поверхность шпули [30].

## 4.3.5 Условия эксплуатации опытного станка формования комбинированных фильтрующих элементов

В таблице 4.1 представлены основные условия эксплуатации (условия среды и технологического помещения) станка для производства комбинированных фильтрующих элементов.

Таблица 4.1 – Эксплуатационные характеристики станка формования комбинированного фильтрующего элемента

Наименование	Значение	
Требования к электрической сети	220В/50Γц (±1 Гц)	
Режим эксплуатации	Непрерывный (возможны включения / выключения прибора в произвольное время с частотой более одного раза в сутки)	
Габаритные размеры (ВхШхГ)	1500x3000x2000	
Масса нетто, не более	150 кг	
Электрическая потребляемая мощность, не более	4 кВт	
Назначенный срок службы	5 лет	
Температура	+15 - +40 °C	

Наименование	Значение	
Относительная влажность	≤ 90 %	
Класс чистоты сжатого воздуха	по ГОСТ Р ИСО 8573-1-2016: 1.1.2 – 1.6.2	
Давление сжатого воздуха	1 — 8 МПа	
Производительность вытяжной	не менее 50 м <sup>3</sup> /ч	
вентиляции		

Для исключения вероятности повреждения электронных частей аппаратов статическим электричеством применялись экранированные кабели питания, кабели, соединяющие прибор с выносными устройствами. Входные каналы были защищены от импульсов статического электричества фильтрами. Несущие основания аппаратов изготавливались из стандартных электросварных труб квадратного сечения (ГОСТ 8639-82). Рельсовое основание толкателей поршней насоса (рис. 4.4), детали корпуса динамической части каретки (рис. 4.5), корпусы графитовых щеток (рис. 4.7) изготавливались из листового СВМПЭ на фрезерном станке и собирались с помощью стандартных метизов. Диэлектрические шторки, вытяжной короб изготавливались из листового вспененного ПВХ.

# 4.4 Методика измерения эффективности фильтрования комбинированного фильтрующего элемента

Основной закон фильтрации, впервые сформулированный Лэнгмюром [61], заключается в том, что количество монодисперсного аэрозоля, уловленным слоем толщиной d , пропорционально толщине слоя и количеству частиц перед фильтрующим элементом. Из этого следует, что эффективность фильтрования η записывается в виде:

$$\eta = 1 - e^{-\gamma d} \tag{4.1}$$

где у — коэффициент пропорциональности (коэффициент фильтрования), зависящий от свойств частиц, среды и фильтрующего элемента. Очевидно, что при фиксированной скорости потока через фильтрующий элемент перепад давления на нем прямо пропорционален толщине слоя. Отношение логарифма проскока к перепаду давления является величиной, характеризующей способность фильтрующего материала к улавливанию аэрозолей:

$$K\Phi Д = -\frac{\lg(1-\eta)}{\Delta P_{\text{сумм}}}$$
(4.2)

где К $\Phi$ Д — коэффициент фильтрующего действия, (мм вод. ст.) $^{-1}$  [62-64].

Для испытания фильтрующего элемента на эффективность требуется создать поток воздуха, засеянный аэрозольными частицами, затем измерить концентрацию частиц в воздухе на входе и выходе фильтрующего элемента. В этом случае эффективность фильтрования η вычисляется по формуле:

$$\eta = 1 - \frac{N_{\text{out}}}{N_{\text{in}}} \tag{4.3}$$

где  $N_{out}$  — концентрации частиц после, а  $N_{in}$  — перед фильтрующим элементом. Как известно, эффективность фильтрования аэрозольных частиц сильно зависит от их размера [19]. При этом, крупные частицы (более 0,4-0,5 мкм) фильтруются волокнистыми фильтрующими элементами преимущественно за счет инерционного и касательного механизмов осаждения, эффективность растет с увеличением диаметра. Частицы, диаметром менее 0,1-0,2 мкм, фильтруются за счет диффузионного механизма осаждения, и эффективность захвата таких частиц растет с уменьшением диаметра частиц. Поэтому, согласно ГОСТ Р ЕН 1822, эффективность фильтрующих элементов Е11 — U17 определяется по наиболее проникающим частицам (MPPS — most penetrative particle size) — частицам такого размера, эффективность по которым у фильтрующего элемента минимальна.

изучения фильтрования эффективности полученного работе комбинированного элемента был разработан специальный аэрозольный стенд. Методика исследования фильтрующего элемента на аэрозольном заключается в следующем: поток чистого воздуха (не более 1000 частиц на 1 м<sup>3</sup>) смешивается с аэрозолем постоянной концентрации и распределения (рис. 4.10), который подаётся В канал, устанавливается исследуемый образец где фильтрующего элемента. Далее, спектрометром частиц измеряется концентрация до и после установки образца в стенд.

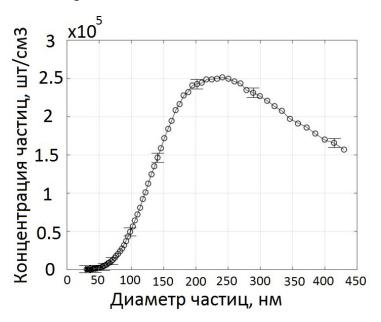
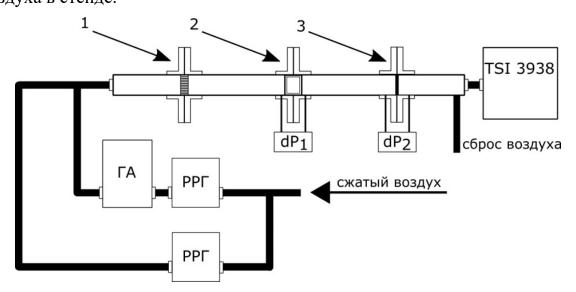


Рисунок 4.10 – Зависимость числа от диаметра аэрозольных частиц ГА Тораs ATM 226

Корректные испытания фильтрующего элемента требуют высокую герметичность стенда и узла для установки образца. Для этого использовались высокогерметичные БРС, места соединения образцов со специальным образом фланцами изготовленными уплотнялись прокладками. силиконовыми Герметичность тестировалась путем прокачки чистого фильтрованного воздуха через стенд с подключенным (ранее испытанным) к нему нулевым фильтрующим элементом.

Схема аэрозольного стенда представлена на рис. 4.11. В ГА Тораѕ ATM 226 заправленный, рекомендованной ГОСТ Р ЕН 1822 жидкостью Бис-(2-этилгексил)овый эфир себациновой кислоты, подается воздушный поток через

первый РРГ-12, который обеспечивает постоянный расход воздуха с точностью 0.1 %. Концентрация частиц регулируется  $\mathbf{c}$ помощью подачи чистого отфильтрованного воздуха на вход через второй РРГ-12. Таким образом, через аэродинамическую трубу прокачивается поток воздуха аэрозольными частицами. Для того чтобы подавить крупные вихри течения газа, в первом фланце трубы устанавливается выравнивающая поток мелкоячеистая регулярная сетка. В середине стенда между фланцами устанавливается образец, закреплённый в специальной обойме. При помощи манометра (с погрешностью измерений ±3 Па), подключенного к штуцерам, измерялся перепад давления на образце. Также в конце трубы установлена расходомерная мембрана, с помощью которой путем измерения перепада давления манометром контролируется расход воздуха в стенде.



1 – выравнивающая сетка; 2 – исследуемый образец; 3 – расходомерная мембрана; РРГ-12,  $\Gamma$ A – ATM 226; TSI 3938 – спектрометр частиц;  $dP_1$  и  $dP_2$ 

 дифференциальные манометры Testo 510 для измерения перепада давления на образце и контроля расхода воздуха, соответственно;

Рисунок 4.11 – Аэрозольный стенд для испытания образцов фильтрующих элементов

Для испытаний образец фильтрующего элемента в форме квадрата со стороной 40 мм вырезался из цилиндрического фильтрующего элемента внутренним диаметром 83 мм. Каждая из четырех боковых сторон образца

последовательно заливалась силиконовым компаундом для герметичной установки образца в испытательный стенд. Скорость воздуха через фильтрующий элемент составляла 5 см/с.

Выход стенда подключается к спектрометру аэрозольных частиц TSI 3938 (Зав. № 0003655300). Спектрометр оснащен своим воздушным насосом и может пропускать через себя только фиксированный объём воздуха, поэтому избыток воздуха на выходе стенда сбрасывался в атмосферу. Спектрометры такого типа широко используются в качестве стандарта для измерения распределения частиц аэрозолей. Данный спектрометр измеряет распределение по размерам частиц и концентрацию с помощью метода анализа дифференциальной подвижности частиц. Погрешность такого метода измерений составляет 2 %. Максимальный диапазон измеряемых размеров частиц прибора составляет от 2 нм до 1 мкм.

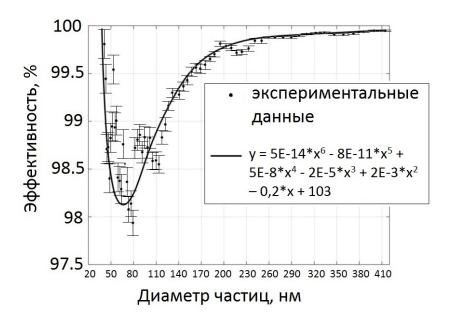


Рисунок 4.12 – Зависимость эффективности фильтрования опытного образца от диаметра аэрозольных частиц

На рис. 4.12 приведена типичная зависимость эффективности фильтрования образца фильтрующего элемента от диаметра аэрозольных частиц. Видно, что средний диаметр наиболее проникающих частиц увеличивается и находится в диапазоне от 50 до 80 нм, при этом эффективность фильтрования по наиболее проникающим частицам составляет 98 %. Перепад давления на образце при

скорости воздуха через фильтрующий элемент 5 см/с составляет величину 37.5 Па.

Погрешность измерения эффективности фильтрования была оценена по формуле:

$$\Delta \eta = (1 - \eta) \sqrt{\frac{1}{n} \left( \left( \frac{2\sigma_{\text{in}}}{N_{\text{in}}} \right)^2 + \left( \frac{2\sigma_{\text{out}}}{N_{\text{out}}} \right)^2 \right)}$$
 (4.4)

где  $\sigma_{\rm in,\,out}$  – стандартное отклонение результатов измерений концентраций частиц  $N_{\rm in}$  или  $N_{\rm out}$ ; n – количество измерений.

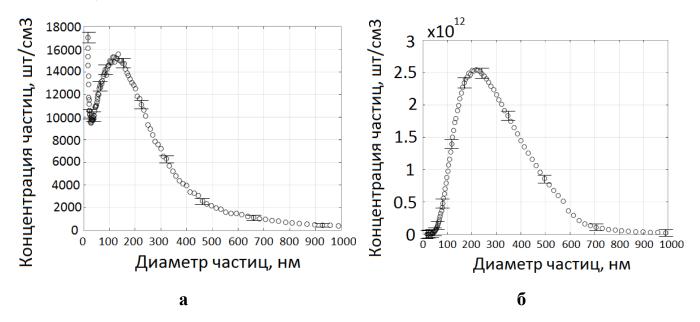
### 4.5 Ресурсные испытания комбинированного фильтрующего элемента

Ресурсным загрязнителем комбинированных фильтрующих элементов был выбран аэрозоль диэтилгексилсебацината. Выбор жидких аэрозольных частиц обусловлен:

- 1. Наиболее проблемной средой для фильтрования высокоэффективными фильтрующими элементами типа НЕРА являются аэрозольные жидкие частицы. Согласно литературным источникам, жидкие частицы в отличие от твердых частиц способны уменьшать эффективность фильтрования [65-71];
- 2. Заведомо проверенной стабильностью генерации частиц, что в условиях ресурсных испытаний является приоритетным фактором;
- 3. Выбором подхода моделирования. Жидкий аэрозоль за счёт сил поверхностного натяжения объединяются в агломерации, чем обеспечивает равномерный рост диаметров волокон фильтрующего элемента, что обеспечивает лучшее согласие расчётной модели и экспериментов.

Таким образом, выбранные условия ресурсных испытаний являются оценкой снизу. Другими словами, в условиях потребительской эксплуатации комбинированные фильтрующие элементы покажут или представленные, или более высокие показатели фильтрования. На рис. 4.13 зависимости концентрации

ансамбля частиц от их диаметра используемые для проведения испытаний и пересчёта загрязнения в эквивалент эксплуатации (погрешность измерений не более 2 %).



а – комнатный аэрозоль, б – аэрозоль 226 диэтилгексилсебацината ГА Тораѕ АТМ Рисунок 4.13 – Зависимость числа частиц от их диаметра ансамблей аэрозолей использованных для ресурсных испытаний фильтрующего элемента

Ресурсные испытания проводились согласно методике описанной выше при линейной скорости фильтрования 5 см/с. С той разницей, что ресурсные испытания в отличие от проверки класса воздушного фильтрующего элемента (ГОСТ ИСО 14644-1-2002) [7, 8] проводились на протяжении нескольких часов при наибольшей концентрации частиц на входе образца (рис 4.13 б). Максимум концентрации частиц входе устанавливался исходя близкого максимальному разрешению спектрометра частиц (TSI 3938) в объёме. Каждой значений:  $N_{\underline{0}}$ образца, точке эксперимента присваивался массив «запыления», перепад давления, количество частиц перед образцом, количество частиц на выходе образца. Так как в ресурсном эксперименте использовались высокие концентрации аэрозоля, существовала сложность измерить начальный Поэтому начальные перепады давления на перепад давления. измерялись заранее в потоке «чистого» воздуха.

Выбор скорости фильтрования обусловлен следующими фактами и рассуждениями: обычно с увеличением фронтальной скорости эффективность фильтрования снижается, и снижение растёт при уменьшении размера частиц. При использовании нановолокон в применении процесса фильтрования авторы работы [19] рекомендуют использовать минимально возможную фронтальную скорость фильтрования; в противном случае КФД резко падает. Этот эффект связан с тем, что увеличение фронтальной скорости («effect face velocity») уменьшает время удерживания частиц в структуре нановолокон, что снижает вероятность столкновения частиц с волокнами через броуновское движение. Ниже величина КФД рассчитывается по формуле (4.2) для фронтальной скорости 5 см/с.

Диэтилгексилсебацинат - это нерастворимая жидкость с низкой скоростью испарения и плотностью 912 кг / м<sup>3</sup> [71]. При проведении тестовых ресурсных экспериментов с диэтилгексилсебацинатом было замечено, что масса осевшего аэрозоля много ниже, чем интегральная масса аэрозоля поданного на вход Macca исследуемых образцов. осевшего аэрозоля контролировалась взвешиванием образцов на аналитических весах (весы лабораторные, ВЛ-224, ГР № 53573-13). Заниженное значение массы после испытаний объясняется тем, что аэрозольная жидкость, задержанная в виде частиц фильтрующим элементом, испаряется в потоке воздуха (5 см/с). Факт испарения диэтилгексилсебацината является преимуществом ЭТОГО подтвержден И рыночным монодисперсного тестового аэрозоля [72]. Испарение диэтилгексилсебацината в процессе эксплуатации позволяет не уменьшая ресурс фильтрующего элемента провести его тестирование на класс очистки.

был Поэтому экспериментальным путём получен коэффициент улетучивания диэтилгексилсебацината режима образцов для испытания фильтрующих элементов. Проверка коэффициента выполнялась как на образцах комбинированного фильтрующего элемента, так на боросиликатной И фильтрующей ткани [7, 8], которую используют отечественные и зарубежные производители высокоэффективных HEPA и ULPA фильтрующих элементов. Был

образец из фильтрующей ткани создан ДЛЯ испытательного стенда фильтрующую способность 5 см/с. протестирован на при Интегральная эффективность фильтрования боросиликатной ткани составила 99 %. В результате экспериментов, коэффициент улетучивания аэрозольного загрязнителя (за 2,5 часа эксперимента) из фильтрующего элемента для испытательного режима составил 7.5.

В таблице 2 параметры и габариты полноразмерного воздушного фильтрующего элемента (требования к фильтрующему элементу определялись из теоретических расчетов, глава 2).

Таблица 4.2 – Параметры образцов комбинированного воздушного фильтрующего элемента

Начальная пористость, %	75,2
Толщина материала, мм	10
Количество слоёв	61
Расход раствора ПА, мл/час	0,33
Масса ПА волокон в фильтрующем элементе, мкг	24,2
Внутренний диаметр фильтрующего элемента, мм	83
Внешний диаметр фильтрующего элемента, мм	103
Длина фильтрующего элемента, мм	800
Аэродинамический диаметр ПП волокон, мкм	221
Аэродинамический диаметр ПА волокон, нм	77
Средний диаметр ПП волокон, мкм	198
Средний диаметр ПА волокон, нм	88

Пористость цилиндрического фильтрующего элемента вычислялась по формуле:

$$P = 100 \left( 1 - \frac{m}{\pi \rho_{\Pi\Pi} \bar{L} \left( \bar{l}^2 + 2\bar{l} \, \bar{r} \right)} \right) \tag{4.5}$$

где m — масса фильтрующего элемента,  $\rho_{nn}$  — плотность ПП,  $\bar{L}$  — усреднённая длина фильтрующего элемента,  $\bar{l}$  — усреднённая толщина фильтрующего слоя,  $\bar{r}$  — усреднённый внутренний радиус фильтрующего элемента.

Для ресурсных испытаний были получены два вида фильтрующего элемента с постоянным и линейным распределениями фильтрующих волокон. Причем суммарный расход раствора использованного для создания фильтрующих элементов и, следовательно, суммарная длина фильтрующих волокон были одинаковыми. В результате, испытывались три типа образцов с равным фильтрующих образец суммарным количество волокон: постоянной концентрацией фильтрующих волокон в каждом слое; образец с линейным установленный профилем, «засеянными» слоями К входящему профилем, образец линейный аэрозольных частиц; c установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц (рис. 4.14). Данные экспериментов с малыми образцами были пересчитаны на реальный крупногабаритный фильтрующий элемент (таблица 4.2) с учётом коэффициента испарения загрязнителя и приведены на рис 4.15 – 4.18. На рис. 4.14 изображены распределения фильтрующих волокон образцов с постоянным и линейными распределениями по толщине материала фильтрующего элемента (стрелкой показано направление потока аэрозольных частиц).

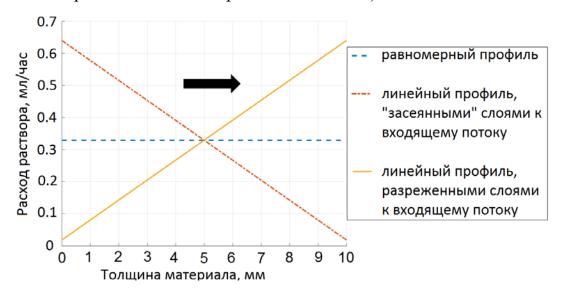
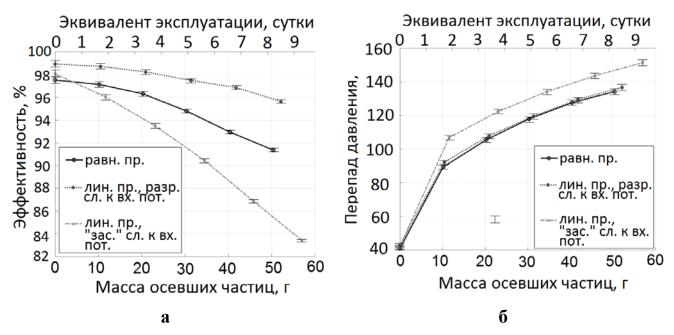


Рисунок 4.14 – Профиль фильтрующих ПА волокон в образцах

На рис. 4.15 – 4.17, помимо массы осевших частиц на фильтрующем элементе приведены оси эквивалента эксплуатации. Эквивалент рассчитывался из распределения взвешенных частиц в помещении лаборатории (распределение комнатного аэрозоля приведено на рис. 4.13 а и сравнивался по интегральному объёму с аэрозолем, поданным на вход образца. Таким образом, можно оценить, как будут меняться характеристики фильтрования в условиях выбранной среды. Например, для фильтрования воздуха в чистом помещении (ГОСТ ИСО 14644-1-2002) [7, 8] период эксплуатации фильтрующего элемента будет на порядок выше, чем для комнатного аэрозоля (рис. 4.13 а).

Рис. 4.15 – 4.16 демонстрируют деградацию фильтрующих свойств комбинированного элемента (эффективность фильтрования, перепад давления).



а — зависимость эффективности фильтрования по наиболее проникающим частицам от массы осевших частиц на фильтрующем элементе и от эквивалента эксплуатации фильтрующего элемента в условиях комнатного аэрозоля, б — зависимость перепада давления от массы осевших частиц на фильтрующем элементе и от эквивалента эксплуатации фильтрующего элемента в условиях

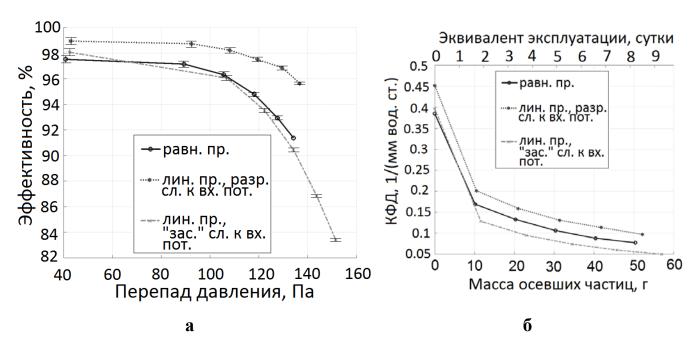
комнатного аэрозоля

Рисунок 4.15 – Данные ресурсных испытаний

Различные скорости деградации эффективности фильтрования (рис. 4.15 а) образцов комбинированного элемента объясняются различным распределением загрязнителя по слоям материала. Иными словами, жидкие аэрозольные частицы увеличивают средний диаметр волокон и уменьшают пористость, и чем равномерней эти параметры фильтрующего элемента будут распределяться по толщине материала комбинированного элемента, тем будет выше эффективность фильтрования. Так, например, эффективность фильтрования линейно профилированного образца установленного засеянными слоями к потоку снижается быстрее, чем для образца с равномерным распределением и образца установленного разреженными слоями к потоку при тех же условиях (рис 4.15 а). В свою очередь, эффективность фильтрования равномерного образца снижается линейного несколько быстрее, чем ДЛЯ распределения, направленного разреженными слоями к потоку. В результате, на протяжении 8 эквивалентных суток эксплуатации: фильтрующие элементы с постоянным и с «засеянным» к потоку распределениями не вышли из класса очистки Е10 (85 %), а фильтр с разреженными слоями к потоку не вышел из начального класса очистки Е11 (95 %).

Увеличение среднего диаметра волокон приводит к уменьшению пористости фильтрующего элемента, что ведёт к росту перепада давления (рис. 4.15 б). Для равномерного и направленного разреженными слоями к потоку образцов увеличение пористости происходит более равномерно, чем для образца направленного «засеянными» слоями к потоку, что подтверждает зависимости перепада давления. В результате, для всех образцов за 8 эквивалентных суток эксплуатации перепад от начального давления возрос более чем на 300 %.

На рис. 4.16 (а) эксперименты представлены в координатах эффективность фильтрования / перепад давления. Не смотря на то, что начальный перепад давления образцов одинаковый (в пределах 1 Па), кривая образца направленного разреженными слоями к потоку находится выше кривых «засеянного» к потоку и равномерного образцов.



а — зависимость эффективности фильтрования по наиболее проникающим частицам от перепада давления на фильтрующем элементе; б — зависимость КФД от массы осевших частиц на фильтрующем элементе и от эквивалента эксплуатации фильтрующего элемента в условиях комнатного аэрозоля Рисунок 4.16 — Данные ресурсных испытаний

Экспериментальные зависимости КФД от периода эксплуатации указывают на то, что фильтрующая способность будет тем выше, чем более равномерно загрязнитель распределится по толщине фильтрующего элемента (рис. 4.16 б).

### 4.6 Сравнение модели и эксперимента

### 4.6.1 Эксплуатация фильтрующего элемента на табачном загрязнителе

Проверка опытной эксплуатации комбинированного элемента проводилась на табачном загрязнителе. При равномерном распределении табачного загрязнителя по толщине материала фильтрующего элемента можно добиться оптимального, с точки зрения пылеёмкости, процесса фильтрования. Расчётная модель учитывает изменение плотности упаковки в каждом слое в процессе

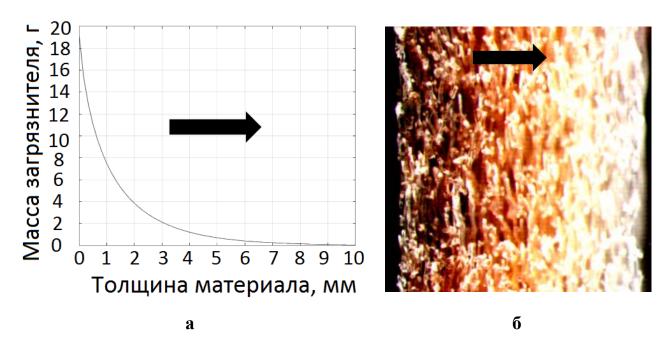
работы фильтрующего элемента, что позволяет прогнозировать распределение массы по толщине фильтрующего элемента.

Как и в некоторых зарубежных исследованиях, в данной работе в качестве «модельного» загрязнителя использовался табачный аэрозоль [73, 74]. Табачный дым содержит в себе в молекулярном виде и в виде твердых и жидких аэрозольных частиц размером от 100 до 900 нм [75] несколько тысяч органических компонентов. На примере стойкого табачного загрязнителя существует возможность наглядно продемонстрировать характерные фильтрующие свойства комбинированного фильтрующего элемента.

Для проведения опытной эксплуатации фильтрующих элементов был разработан генератор табачного дыма. Генератор дыма представляет собой герметичную ёмкость с проточной подачей воздуха и держателем для сжигания сигаретных штранг. Сигаретный штранг заданной длины и массы устанавливается в нихромовую спираль. При подачи постоянного напряжения на нихромовую спираль происходит поджигание штранга. На генераторе табачного дыма установлены два БРС соединения, к первому через РРГ подключается источник сжатого воздуха, второе соединение выводится на вход образца фильтрующего элемента.

После загрязнения табачным аэрозолем образца с равномерным распределением фильтрующих волокон, первые слои фильтрующего элемента набирают основную часть массы загрязнителя (рис. 4.17). При этом начальная эффективность фильтрования образца составляла 97,3 %.

После проведенной опытной эксплуатации комбинированного элемента с равномерным распределением фильтрующих волокон эффективность фильтрования снизилась до 93,9 %, а перепад давления на образце увеличился в 4 раза (что соответствует примерно 7 месяцам эксплуатации).

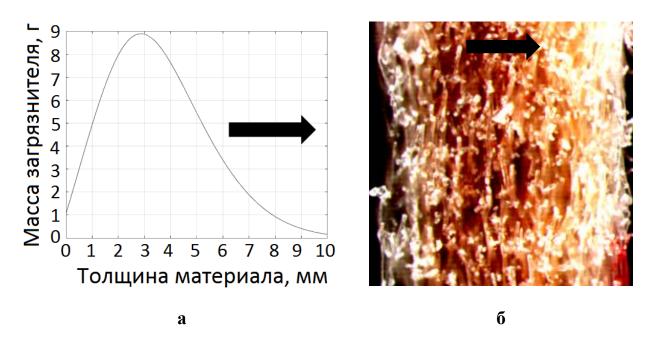


а — данные моделирования в пересчёте на крупногабаритный фильтрующий элемент, б — фотография (10х10 мм) среза образца фильтрующего элемента после загрязнения табачным дымом

Рисунок 4.17 – Зависимость массы загрязнителя в образце с равномерным распределением фильтрующих волокон по толщине (стрелкой показано направление потока загрязнителя)

Для образца с линейным распределением наблюдается иная картина, как для данных моделирования, так и для экспериментального изображения распределения массы (рис. 4.18). На рис. 4.18 видно, что минимумы распределения массы находятся в первых и последних слоях фильтрующего элемента. При этом начальная эффективность фильтрования образца составляла 98,9 %.

После проведенной опытной эксплуатации комбинированного элемента с линейным распределением фильтрующих волокон по толщине (разреженными слоями к потоку загрязнителя) эффективность фильтрования снизилась до 96,1 %, а перепад давления на образце увеличился в 4 раза (что соответствует примерно 7 месяцам эксплуатации).

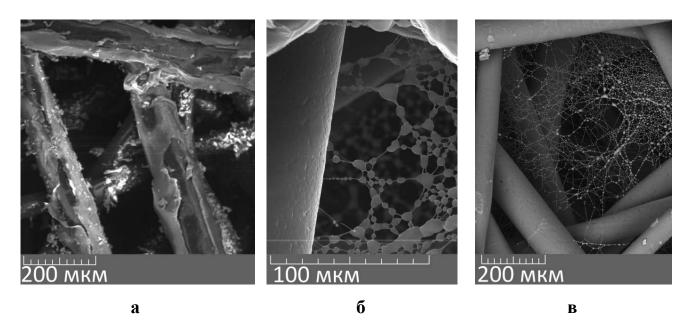


а — данные моделирования в пересчёте на крупногабаритный фильтрующий элемент, б — фотография (10х10 мм) среза образца фильтрующего элемента после загрязнения табачным дымом

Рисунок 4.18 – Зависимость массы загрязнителя в образце с линейным распределением фильтрующих волокон по толщине разреженными слоями к потоку загрязнителя (стрелкой показано направление потока загрязнителя)

Моделирование уловленной массы в слоях фильтрующего элемента проводилось на основании данных аналитического взвешивания образцов до и после «запыления» табачным загрязнителем.

На рис. 4.19 СЭМ микроснимки слоёв фильтрующего элемента загрязненных табачным дымом. В первых слоях фильтрующего элемента к входящему потоку частиц (рис. 4.19 а), в середине фильтрующего элемента (рис. 4.19 б) и в последних слоях фильтрующего элемента (рис. 4.19 в). Как видно из рис. 4.19 а, после загрязнения, на входе в фильтрующий элемент сохранились только ПП волокна, выполняющие роль каркаса фильтрующего элемента, что говорит о релаксации (разрушении) нановолокон в первых слоях фильтрующего элемента.



а — первые слои фильтрующего элемента к входящему потоку, б — слои в середине толщины фильтрующего элемента, в — последние слои фильтра к входящему потоку

Рисунок 4.19 – Микроснимки комбинированного фильтрующего элемента

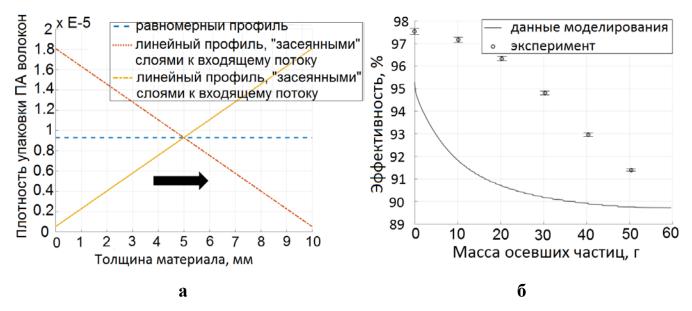
В центре фильтрующего элемента (рис. 4.19 б) наблюдается структура ПА волокон и объединённые в агломерации жидкие частицы. В результате под действием силы поверхностного натяжения и увеличения силы сопротивления потоку воздуха структура ПА волокон разрушается. В последних слоях фильтрующего элемента распределение частиц на ПА волокнах более равномерное (рис. 4.19 в). Количество жидкого аэрозоля на волокне ещё не достигло критического значения, при котором частицы будут объединяться в крупные агломерации, что приведёт к разрушению фильтрующей структуры силами поверхностного натяжения жидкости.

# 4.6.2 Апробация физико-математической модели на данных ресурсных испытаний

Для сравнения экспериментальных данных ресурсных испытаний с моделью, в программе расчёта использовались параметры ранее созданных

воздушных фильтрующих элементов и режима испытаний: линейная скорость потока воздуха 5 см/с; цилиндрический фильтрующий элемент: длина цилиндра 800 мм, внутренний диаметр 83 мм, внешний диаметр 103 мм (таблица 4.2); при этом расход воздуха моделируемого фильтрующего элемента составит 42 м<sup>3</sup>/час. Как и для ресурсных испытаний, в модели использован экспериментальный ансамбль жидких частиц (аэрозоля) генератора Тораѕ АТМ 226 диэтилгексилсебацината (рис. 4.13 б).

На рис. 4.20-4.24 представлены данные ресурсного эксперимента и моделирования: зависимости характеристик фильтрования от массы частиц накопленных на крупногабаритном фильтрующем элементе. Начальная плотность упаковки для каждого слоя фильтрующего элемента изображена на рис. 4.20 а.

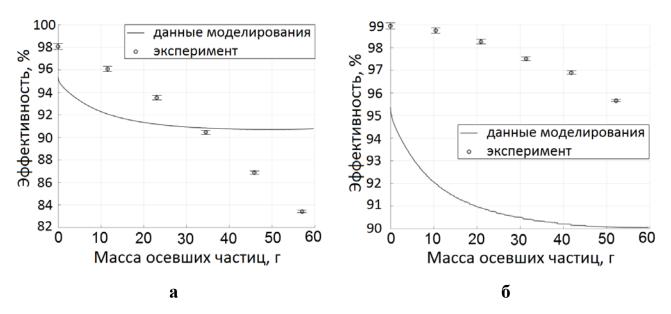


а — зависимость плотности упаковки фильтрующих волокон от толщины материала комбинированного элемента (стрелкой показано направление потока аэрозольных частиц), б — зависимость эффективности фильтрования образца с равномерным распределением фильтрующих волокон от массы осевших частиц

Рисунок 4.20 – Данные моделирования и эксперимента

Для неоптимального распределения фильтрующих волокон, где основная масса частиц задерживается в первых слоях фильтрующего элемента на рис. 4.21 а наблюдается наиболее интенсивное разрушение (релаксация) волокон:

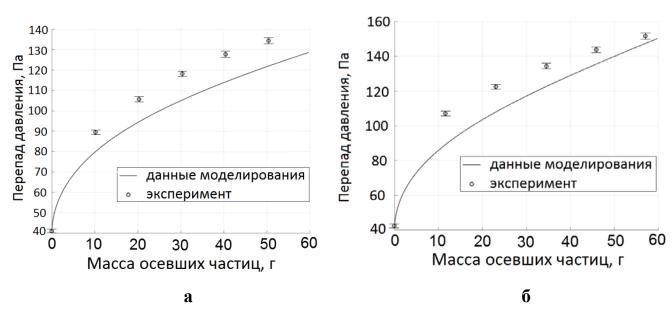
экспериментальная кривая пересекает модельный расчёт. На рис. 4.21 б резкая деградация эффективности фильтрования не наблюдается.



а — зависимость эффективности фильтрования образца с линейный профилем установленный «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц, б — зависимость эффективности фильтрования образца с линейный профилем, установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц Рисунок 4.21 — Данные моделирования и эксперимента

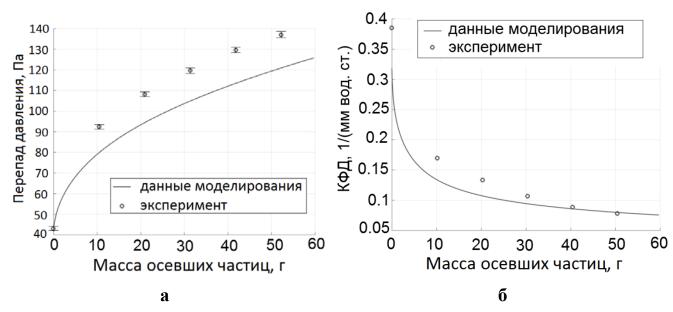
На рис. 4.22 – 4.23 а зависимости перепада давлений от массы осевших на фильтрующем элементе частиц. Экспериментальные данные показывают большее значение перепада давления, чем данные получены при моделировании фильтрующего элемента. Предположительно, это может быть связано с допущениями, использованными в модели. А именно, согласно модели, рост среднего диаметра волокон происходит мгновенно пропорционально массе прилетевших частиц. Жидкие частицы собираются в агломерации, забивая поры материала фильтрующего элемента, что приводит к большему сопротивлению потоку воздуха. Подобная картина наблюдается на микроскопии образцов фильтрующего элемента загруженных табачным аэрозолем (рис. 4.19).

На рис.  $4.23\ 6-4.24$  итоговая характеристика образцов фильтрующего элемента (КФД).



а – зависимость перепада давления образца с равномерным распределением фильтрующих волокон от массы осевших частиц, б – зависимость перепада давления образца с линейный профилем установленный «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц

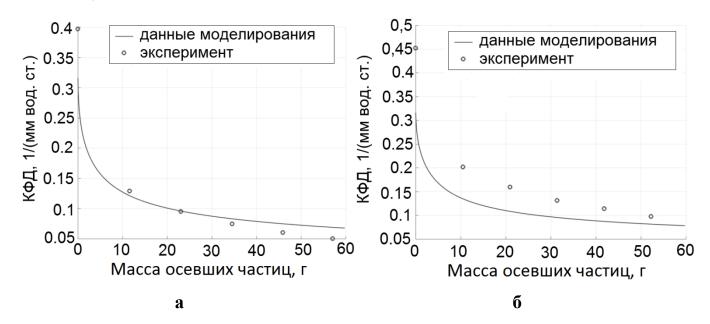
Рисунок 4.22. – Данные моделирования и эксперимента



а — зависимость перепада давления образца с линейный профилем установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц, б — зависимость КФД образца с равномерным распределением фильтрующих волокон от массы осевших частиц

Рисунок 4.23 — Данные моделирования и эксперимента

В результате учёта перепада давления и эффективности фильтрования в КФД, образец с линейным распределением, установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц, показывает наименьшую скорость деградации фильтрующих свойств комбинированного элемента. Вероятно, это связано с наименьшей степенью разрушения волокон. В случае образца с линейным профилем, установленным «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц, экспериментальная зависимость пересекает кривую моделирования при достижении 20 г для крупногабаритного фильтрующего элемента.



а — зависимость КФД образца с линейный профилем установленный «засеянными» слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы осевших частиц, б — зависимость КФД образца с линейный распределением установленный разреженными слоями к входящему потоку аэрозольных частиц от массы

# Рисунок 4.24 – Данные моделирования и эксперимента

осевших частиц

Предположительно, релаксация (разрушение) фильтрующих ПА волокон снижает эффективность комбинированного фильтрующего элемента, что косвенно подтверждается лучшим согласованием модели и эксперимента для более оптимальных образцов в смысле распределения массы загрязнителя по

толщине материала. В подтверждении этому для фильтрующих элементов с не «оптимальным» распределением волокон по толщине тенденция релаксации (разрушения) ПА волокон в структуре фильтрующего элемента наблюдается для жидкого табачного аэрозоля (рис. 4.19). В случае жидких аэрозольных частиц, для создания ресурс пригодного фильтрующего элемента требуется максимально равномерный рост среднего диаметра фильтрующих волокон по толщине фильтрующего элемента, что позволит создать меньшую нагрузку на фильтрующие волокна и продлить срок эксплуатации фильтрующего элемента.

## 4.7 ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ 4

Идея использовать два масштаба волокон известна [21-23], однако, высокоэффективный фильтрующий элемент объемной фильтрации получен впервые [43].  $\mathbf{C}$ точки зрения эксплуатационных характеристик, комбинированный фильтрующий элемент с постоянной плотностью нановолокон усовершенствовать профилированием онжом распределения тонкого фильтрующего волокна по толщине материала фильтрующего элемента. На разработанной образцы функциональноустановке получены опытные градиентного фильтрующего элемента.

На основании результатов испытаний и моделирования приведены основные преимущества и недостатки представленной технологии формования. Конкурентным преимуществом комбинированного фильтрующего элемента являются: высокий КФД, при скорости потока воздуха 1 см/с составил 2,2 (мм вод. ст.)<sup>-1</sup>; одноэтапная технология производства комбинированного элемента; возможность создания профилированных структур позволяющих максимально увеличить ресурс фильтрующего элемента без увеличения энергетических и сырьевых затрат (затрат на производство). Недостатком представленного комбинированного элемента является релаксация (разрушение) фильтрующих ПА волокон при фильтровании жидких аэрозолей, снижающая эффективность фильтрования, что подтверждается как согласием с расчётной

моделью фильтрования, так и прямым изображением структуры комбинированного элемента. В случае жидких аэрозольных частиц, для создания ресурс пригодного фильтрующего элемента требуется максимально равномерный рост среднего диаметра фильтрующих волокон по толщине фильтрующего элемента, что позволит создать меньшую нагрузку на фильтрующие волокна и продлить срок эксплуатации фильтрующего элемента.

Основные результаты приведенных в главе исследований представлены в [76-89].

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

- 1. Разработана численная физико-математическая модель фильтрования частиц комбинированного фильтрующего элемента, позволяющая прогнозировать основные характеристики функционально-градиентного материала фильтрующего элемента в процессе эксплуатации. Проведена оценка ресурса эксплуатации фильтрующего элемента для выбранного ансамбля частиц. За 177 суток эксплуатации фильтрующего элемента с оптимальным профилем нановолокон эффективность фильтрования снижается с 90 до 82 %
- 2. Предложены наиболее эффективные композиции волокнообразующих полимеров, способные обеспечить требуемые фильтрующие свойства. Для массового производства фильтрующих элементов рекомендовано использовать рецептурную композицию: массовая доля ПА 6.6. в растворителе 6 12 %.
- 3. Разработан и запатентован способ формования фильтрующего элемента с применением процесса экструзии и метода электроформования. Самонесущий материал фильтрующего элемента состоит из волокон диаметром 100 300 мкм и фильтрующих волокон диаметром 50 500 нанометров.
- 4. Установлено, что заземлённый электрод вблизи материала снимает электрический заряд при изготовлении полимерного фильтрующего элемента. На основе результатов экспериментальных исследований накопления и стока электрического заряда от времени рекомендовано использовать заземлённый электрод диаметром 500 мкм на расстоянии не более 5 мм от поверхности материала.
- 5. Создана технология производства фильтрующего элемента типа НЕРА, обладающего повышенной эффективностью улавливания аэрозольных частиц в аппаратах очистки воздуха. Технология обеспечивает создание фильтрующих элементов классов E10 H14 (эффективность очистки 85 99,995 %) при скорости фильтрования 5 см/с.
- 6. На основе ресурсных испытаний установлено, что для фильтрующего элемента с линейным распределением нановолокон по толщине материала при

скорости фильтрования 5 см/с: начальная эффективность очистки и перепад давления 99 % и 41 Па, соответственно. На основе ресурсных испытаний проведена верификация функциональных возможностей комбинированного фильтрующего элемента.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1. World Health Organization. Air quality guidelines global update 2005 / World Health Organization. Copenhagen: World Health Organization, 2006.–484 p.
- 2. World Health Organization. WHO guidelines for indoor air quality: selected pollutants / World Health Organization. Bonn: World Health Organization, 2010.–454 p.
- 3. Parkhomchuk, E.V. Ultrasensitive detection of inhaled organic aerosol particles by accelerator mass spectrometry [Tekct] / E.V. Parkhomchuk, D.G. Gulevich, A.I. Taratayko, A.M. Baklanov, A.V. Selivanova, T.A. Trubitsyna, I.V. Voronova, P.N. Kalinkin, A.G. Okunev, S.A. Rastigeev, V.A. Reznikov, V.S. Semeykina, K.A. Sashkina, V.V. Parkhomchuk // Chemosphere. 2016. Vol. 159. P. 80-88.
- 4. Beyeler, F. Minergie: the Swiss sustainable building standard [Текст] / F. Beyeler, N. Beglinger, U. Roder // Innovations. 2009. Vol. 4. P. 241-244.
- 5. Salvi, M. What Drives "Green Housing" Construction? Evidence from Switzerland [Tekct] / M. Salvi, J. Syz // Journal of Financial Economic Policy. 2011. Vol. 3. P. 86-102.
- 6. Carvalho, L. Handbook of Research on Entrepreneurial Success and its Impact on Regional Development / L. Carvalho. Hershey: IGI Global, 2015.–878 p.
- 7. Федотова, А.Е. Чистые помещения / А.Е. Федотова. М.: АСИНКОМ, 2003.–576 с.
  - 8. Уайт, В. Чистые помещения / В.Уайт. М.: изд. «Клинрум», 2008.–304 с.
- 9. Lelieveld, J. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale [Tekct] / J. Lelieveld, J.S. Evans, M. Fnais, D. Giannadaki, A. Pozzer // Nature. 2015. Vol. 525. P. 367-371.
- 10. Alexandrescu, L. Airborne nanoparticles filtration by means of cellulose nanofibril based materials [Текст] / L. Alexandrescu, K. Syverud, A. Nicosia, G. Santachiara, A. Fabrizi, F. Belosi // Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology. 2015. Vol. 7. P. 29-36.

- 11. Kim, S.J. The role of mesopores in achieving high efficiency airborne nanoparticle filtration using aerogel monoliths [Tekct] / S.J. Kim, G. Chase, S.C. Jana // Separation and Purification Technology. 2016. Vol. 166. P. 48-54.
- 12. Araji, M.T. Pilot-study on airborne PM2.5 filtration with particle accelerated [Текст] / М.Т. Araji, S.D. Ray, L. Leung // Sustainable Cities and Society. 2016. Vol. 28. P. 101-107.
- 13. Огородников, Б.И. Рост сопротивления фильтрующих материалов Петрянова при улавливании атмосферных аэрозолей близ ЧАЭС [Текст] / Б.И. Огородников, В.П. Ковальчук, В.Е. Хан // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2010. Вип. 13. С. 146–153.
- 14. Tan, D.H. Meltblown fibers: Influence of viscosity and elasticity on diameter distribution [Tekct] / D.H. Tan, C. Zhou, C.J. Ellison, S. Kumar, C.W. Macosko, F.S. Bates // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2009. Vol. 165. P. 892-900.
- 15. Wang, Q. A case study of simulating submicron aerosol filtration via lightweight spun-bonded filter media [Τεκcτ] / Q. Wang, B. Mazea, H.V. Tafreshia, B. Pourdeyhimi // Chemical Engineering Science. 2006. Vol. 61. P. 4871-4883.
- 16. Persano, L. Industrial upscaling of electrospinning and applications of polymer nanofibers: a review [Текст] / L. Persano, A. Camposeo, C. Tekmen, D. Pisignano // Macromolecular Material and Engineering. 2013. Vol. 298. P. 504-520.
- 17. Yun, K.M. Nanoparticle filtration by electrospun polymer fibers [Текст] / K.M. Yun, C.J. Hogan Jr., Y. Matsubayashi, M. Kawabe, F. Iskandar, K. Okuyama // Chemical Engineering Science. 2007. Vol. 62. P. 4751-4759.
- 18. Zhang, Q. Improvement in nanofiber filtration by multiple thin layers of nanofiber mats [Tekct] / Q. Zhang, J. Welch, H. Park, C. Wu, W. Sigmund, J.C.M. Marijnissen // Journal of Aerosol Science. 2009. Vol. 41. P. 230-236.
- 19. Leung, W.W.F. Effect of face velocity, nanofiber packing density and thickness on filtration performance of filters with nanofibers coated on a substrate [Текст] / W.W.F. Leung, C.H. Hung, P.T. Yuen // Separation and Purification Technology. 2010. Vol. 71. P. 30-37.

- 20. Guan, T. Use of carbon nanotube filter in removing bioaerosols [Текст] / Т. Guan, M. Yao // Journal of Aerosol Science. 2009. Vol. 41. Р. 611-620.
- 21. Патент на изобретение № 2492912 РФ. МПК D04H 1/56. Способ получения фильтрующего полимерного материала и фильтрующий материал / В.Г. Мамагулашвили, А.Е. Негин, К.И. Луканина, А.Д. Шепелев, Ю.М. Голуб, Г.Н. Ворожцов, О.Л. Калия. Дата подачи заявки 20.12.2011, опубл. 20.09.2013, Бюл. № 26.
- 22. Патент на изобретение № 2477644 РФ. МПК В01D 39/00. Фильтрующий материал, способ его получения и применение / Ю.Н. Филатов, Д.В. Перминов, И.В. Кириллова, И.Ю. Филатов, П.М. Щуров. Дата подачи заявки 07.11.2011, опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8.
- 23. Патент на изобретение № 2477165 РФ. МПК В01D 39/02. Фильтрующий материал, способ его получения и применение / Ю.Н. Филатов, И.Ю. Филатов, Ю.Н. Капустин. Дата подачи заявки 14.03.2012, опубл. 10.03.2013, Бюл. № 7.
- 24. Pan, H. Continuous aligned polymer fibers produced by a modified electrospinning method [Текст] / H. Pan, L. Li, L. Hu, X. Cui // Polymer. 2006. Vol. 47. P. 4901-4904.
- 25. Tong, H. A novel technique for the fabrication of 3D nanofibrous scaffolds using simultaneous positive voltage electrospinning and negative voltage electrospinning [Tekct] / H. Tong, M. Wang // Materials Letters. 2013. Vol. 94. P. 116-120.
- 26. Miyamoto, K. Creation of cross-linked electrospun isotypic-elastin fibers controlled cell-differentiation with new cross-linker [Τεκcτ] / K. Miyamoto, M. Atarashi, H. Kadozono // International Journal of Biological Macromolecules. 2009. Vol. 45. P. 33-41.
- 27. Morozov, V.N. Water-soluble polyvinylpyrrolidone nanofilters manufactured by electrospray-neutralization technique [Τεκcτ] / V.N. Morozov, A.Y. Mikheev // Journal of Membrane Science. 2012. Vol. 403-404. P. 110-120.
- 28. Tong, H. Negative voltage electrospinning and positive voltage electrospinning of tissue engineering scaffolds: a comparative study and charge

- retention on scaffolds [Tekct] / H. Tong, M. Wang // Nano LIFE. 2012. № 1. Vol. 2. P. 1250004-1-1250004-16.
- 29. Uecker, J.C. Ion-assisted collection of Nylon-4,6 electrospun nanofibers [Текст] / J.C. Uecker, G.C. Tepper, J. Rosell-Llompart // Polymer. 2010. Vol. 51. P. 5221-5228.
- 30. Дружинин, Э.А. Производство и свойства фильтрующих материалов Петрянова из ультратонких полимерных волокон / Э.А. Дружинин. М.: ИздАТ, 2007. 280 с.
- 31. Будыка, А.К. Атмосферный мониторинг и диагностика аэрозолей : д-ра физ-мат. наук: 02.00.04 / Будыка Александр Константинович. М., 2001. 219 с.
- 32. Kirsh, A.A. Theory of aerosol filtration with fibrous filters [Текст] / A.A. Kirsh, I.B. Stechkina // New York: Wiley. 1978. Р. 165-256.
- 33. Lee, K.W. Theoretical study of aerosol filtration by fibrous filters [Tekct] / K.W. Lee, B.Y.H. Liu // Aerosol Science and Technology. 1982. № 2. Vol. 1. P. 147-161.
- 34. Stechkina, I.B. Studies on Fibrous Aerosol Filters–IV Calculation of Aerosol Deposition in Model Filters in the Range of Maximum Penetration [Tekct] / .B. Stechkina, A.A. Kirsch, N.A. Fuchs // The Annals of Occupational Hygiene. -1969. No. 1. Vol. 12. P. 1-8.
- 35. Wang, C. Removal of nanoparticles from gas streams by fibrous filters: A review [Tekct] / C. Wang, Y. Otani // Industrial and Engineering Chemistry Research. 2012. № 1. Vol. 42. P. 5-17.
- 36. Kuvabara, S. The forces experienced by randomly distributed parallel cylinders or spheres in viscous flow at small Reynolds numbers [Tekct] / Kuvabara S. // Journal of the Physical Society of Japan. 1959. Vol. 14. P. 527-532.
- 37. Loffler, F. Problems and recent advances in aerosol filtration [Tekct] / Loffler F. // Separation Science and Technology. 1980. № 3. Vol. 15. P. 297-315.
- 38. Dharmanolla, S. Computer program for filter media design optimization [Tekct] / S. Dharmanolla, G.G. Chase // Journal of the Chinese Institute of Chemical. 2008. № 2. Vol. 39. P. 161-167.

- 39. Hung, C.H. Filtration of nano-aerosol using nanofiber filter under low Peclet number and transitional flow regime [Tekct] / C.H. Hung, W.W.F. Leung // Separation and purification technology. -2011. N = 1. Vol. 79. P. 34-42.
- 40. Филатов, Ю.Н. Электроформование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс) / Ю.Н. Филатов. М.: Нефть и Газ, 1997. 297 с.
- 41. Басманов, П.И. Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова / П.И. Басманов, В.Н. Кириченко, Ю.Н. Филатов, Ю.Л. Юров. М.: Наука, 2003. 271 с.
- 42. Deitzel, J.M. The effect of processing variables on the morphology of electrospun nanofibers and textiles [Teκcτ] / J.M. Deitzel, J. Kleinmeyer, D.E.A. Harris, N.C.B. Tan // Polymer. − 2001. − № 1. − Vol. 42. − P. 261-272.
- 43. Патент на изобретение № 2639702 РФ. МПК В01D 39/16, В82В 3/00. Объемный фильтр из нетканого самонесущего материала / Д.А. Трубицын, В.Н. Горев, И.А. Мик; заявитель и патентообладатель «ООО Тион Инжиниринг». Дата подачи заявки 24.02.2016, опубл. 21.12.2017, Бюл. № 36.
- 44. Giles, H.F.J. Extrusion: the definitive processing guide and handbook / H.F.J. Giles, J.R.J. Wagner, E.M. Mount. Norwich, NY: William Andrew Publishing, 2005.–542 p.
- 45. Бурков, В.В. Современные высокотемпературные тканые материалы для пылегазоочистки. (Porcher industries, Франция) / В.В. Бурков // Сборник трудов Второй Международной конференции «Пылегазоочистка-2009» 29-30 сентября 2009 г., г. Пенза. Пенза: ООО «ИНТЕХЭКО», 2009. С. 78-80.
- 46. Matulevicius, J. The comparative study of aerosol filtration by electrospun polyamide, polyvinyl acetate, polyacrylonitrile and cellulose acetate nanofiber media [Текст] / J. Matulevicius, L. Kliucininkas, T. Prasauskas, D. Buivydiene, D. Martuzevicius // Journal of Aerosol Science. 2016. Vol. 92. P. 27-37.
- 47. Wang, X. Electro-spinning/netting: A strategy for the fabrication of three-dimensional polymer nano-fiber/nets [Teκcτ] / X. Wang, B. Ding, G. Sun, M. Wang, J. Yu // Progress in Materials Science. 2013. Vol. 58. P. 1173-1243.

- 48. Matulevicius, J. Design and characterization of electrospun polyamide nanofiber media for air filtration applications [Teκcτ] / J. Matulevicius, L. Kliucininkas, D. Martuzevicius, E. Krugly, M. Tichonovas, J. Baltrusaitis // Journal of Nanomaterials. 2014. Vol. 2014. P. 1-13.
- 49. Ding, B. Label-free ultrasensitive colorimetric detection of copper(II) ions utilizing polyaniline/polyamide-6 nano-fiber/net sensor strips [Teκcτ] / B. Ding, Y. Si, X. Wang, J. Yu, L. Feng, G. Sun // Journal of Materials Chemistry. 2011. Vol. 21. P. 13345-13353.
- 50. Li, Y. Colorimetric sensor strips for lead (II) assay utilizing nanogold probes immobilized polyamide-6/nitrocellulose nano-fibers/nets [Текст] / Y. Li, Y. Si, X. Wang, B. Ding, G. Sun, G. Zheng, W. Luo // Biosensors and Bioelectronics. 2013. Vol. 48. P. 244-250.
- 51. Mikheev, A.Y. Filtering and optical properties of free standing electrospun nanomats from nylon-4,6 [Teκcτ] / A.Y. Mikheev, Y.M. Shlyapnikov, I.L. Kanev, A.V. Avseenko, V.N. Morozov // European Polymer Journal. 2016. Vol. 75. P. 317-328.
- 52. Nirmala, R. Recent progress on the fabrication of ultrafine polyamide-6 based nanofibers via electrospinning: a topical review [Текст] / R. Nirmala, R. Navamathavan, S.J. Park, H.Y. Kim // Nano-Micro Letters. 2014. Vol. 6. P. 89-107.
- 53. Shahrabi, S. Fabrication of electrospun polyamide-66 nanofiber layer for high-performance nanofiltration in clean room applications [Teκcτ] / S. Shahrabi, A.A. Gharehaghaji, M. Latifi // Journal of Industrial Textiles. 2014. Vol. 45. P. 1100-1114.
- 54. Sun, B. Advances in three-dimensional nanofibrous macrostructures via electrospinning [Teκcτ] / B. Sun, Y.Z. Long, H.D. Zhang, M.M. Li, J.L. Duvail, X.Y. Jiang, H.L. Yin // Progress in Polymer Science. 2014. Vol. 39. P. 862-890.
- 55. Wang, N. Tunable fabrication of three-dimensional polyamide-66 nanofiber/nets for high efficiency fine particulate filtration [Tekct] / N. Wang, X. Wang, B.

- Ding, J. Yu, G. Sun // Journal of Materials Chemistry. 2012. Vol. 22. P. 1445-1452.
- 56. Wang, N. Ultra-light 3d nanofibre-nets binary structured nylon 6–polyacrylonitrile membranes for efficient filtration of fine particulate matter [Τεκcτ] / N. Wang, Y. Yang, S.S. Al-Deyab, M. El-Newehy, J. Yu, B. Ding // Journal of Materials Chemistry. 2015. Vol. 3. P. 23946-23954.
- 57. Wu, Q. Synergistic effects of silicotungistic acid on intumescent flame-retardant polypropylene [Tekct] / Q. Wu, B. Qu // Polymer Degradation and Stability.  $2001. N_{\odot} 2. Vol. 74. P. 255-261.$
- 58. Guerrini, L.M. Electrospinning and characterization of polyamide 66 nanofibers with different molecular weights [Tekct] / L.M. Guerrini, M.C. Branciforti, T. Canova, R.E.S. Bretas // Materials Research. 2009. Vol. 12. P. 181-190.
- 59. Мик, И.А. Изучение динамики зарядки пористого диэлектрика при формовании высокоэффективных аэрозольных фильтров методом гибридного формования [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, М.И. Тырышкин, Д.А. Трубицын // Пластические массы. 2017. №7-8, С. 55–64.
- 60. Ефимов, А.А. Исследование эффективности фильтрации наноразмерных аэрозолей разной природы электретными волокнистыми фильтрами [Текст] / А.А. Ефимов, В.В. Иванов, И.А. Волков, И.Р. Субботина, Н.А. Першин // Российские нанотехнологии. 2013. Т. 8, № 11-12. С. 96–102.
- 61. Davies, C.N. Air filtration / C.N. Davies. London : Academic Press, 1986.–173 p.
- 62. Петрянов, И.В. Волокнистые фильтрующие материалы ФП [Текст] / И.В. Петрянов, В.И. Козлов, П.И. Басманов, Б.И. Огородников. М.: Знание, 1968. –78 с.
- 63. Кирш, А.А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП [Текст] / А.А. Кирш, А.К. Будыка, В.А Кирш // Российский химический журнал. 2008. №5. С. 97-102.

- 64. Podgorski, A. Application of nanofibers to improve the filtration efficiency of the most penetrating aerosol particles in fibrous filters [Teκcτ] / A. Podgorski, A. Balazy, L. Gradon // Chemical Engineering Science. 2006. Vol. 61. P. 6804-6815.
- 65. Barrett, L.W. Aerosol loading performance of electret filter media [Tekct] / L.W. Barrett, A.D. Rousseau // American Industrial Hygiene. 1998. № 8. Vol. 59. P. 532-539.
- 66. Gupta, A.. Effect of humidity and particle hygroscopicity on the mass loading capacity of high efficiency particulate air (HEPA) filters [Teκcτ] / A. Gupta, V.J. Novick, P. Biswas, P.R. Monson // Aerosol Science. − 1993. − № 1. − Vol. 1. − P. 94-107.
- 67. Novick, V.J. The effect of solid particle mass loading on the pressure drop of HEPA filters [Tekct] / V.J. Novick, P.R. Monson, P.E. Ellison // Journal of aerosol science. 1992. № 6. Vol. 23. P. 657-665.
- 68. Payet, S. Penetration and pressure drop of a HEPA filter during loading with submicron liquid particles [Tekct] / S. Payet, D. Boulaud, G. Madelaine, A. Renoux // Journal of Aerosol Science. − 1992. − № 7. − Vol. 23. − P. 723-735.
- 69. Penicot, P. Clogging of HEPA fibrous filters by solid and liquid aerosol particles: an experimental study [Tekct] / P. Penicot, D. Thomas, P. Contal, D. Leclerc // Filtration and separation. − 1999. − № 36. − Vol. 2. − P. 59-64.
- 70. Tennal, K.B. Effect of loading with AIM oil aerosol on the collection efficiency of an electret filter [Tekct] / K.B. Tennal , M.K. Mazumder , A. Siag, R.N. Reddy // Particulate Science and Technology. 1991. № 1-2. Vol. 9. P. 19-29.
- 71. Zhang, Z. Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup [Tekct] / Z. Zhang, X. Chen, S. Mazumdar, T. Zhang, Q. Chen // Building and Environment. 2009. № 1. Vol. 44. P. 85-94.
- 72. Zhu, X. Experimental and numerical study of flame kernel formation processes of propane-air mixture in a pressurized combustion vessel [Tekct] / X. Zhu, L. Sforza, T. Ranadive, A. Zhang, S.-Y. Lee, J. Naber, T. Lucchini, A. Onorati, M. Anbarasu, Y. Zeng // Journal of Engines. 2016. № 3. Vol. 9. P. 1494-1511.

- 73. Strain, I.N. Electrospinning of recycled PET to generate tough mesomorphic fibre membranes for smoke filtration [Текст] / I.N. Strain, Q. Wu, A.M. Pourrahimi, M.S. Hedenqvist, R.T. Olsson, R.L. Andersson // Journal of Materials Chemistry A. 2015. Vol. 3. P. 1632-1640.
- 74. Lackowski, M. Nanofabric nonwoven mat for filtration smoke and nanoparticles [Tekct] / M. Lackowski, A. Krupa, A. Jaworek // Polish Journal of Chemical Technology. 2013. № 2. Vol. 15. P. 48-52.
- 75. Carter, W.L. Fixation of tobacco smoke aerosols for size distribution studies [Tekct] / W.L. Carter, I. Hasegawa // Journal of Colloid and Interface Science. 1975. № 1. Vol. 53. P. 134-141.
- 76. Мик, И.А. Метод формования высокоэффективного самонесущего композитного фильтрующего материала из полимерных микро- и нановолокон [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, Д.А. Трубицын // Экология и промышленность России. 2017. Т. 21, № 4. С. 13–19.
- 77. Мик, И.А. Моделирование работы гибридного фильтрующего материала [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Ползуновский вестник. 2018. №1, С. 135–142.
- 78. Мик, И.А. Контролируемое изготовление композитного материала фильтра состоящего из несущей матрицы микро волокон и фильтрующих нано волокон для высоко эффективной фильтрации аэрозольных частиц [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Материалы международной научно-практической конференции «Современное состояние науки и техники». Сочи: Изд-во «Оптима». 2016. С. 107–110.
- 79. Мик, И.А. Разработка композитного материала фильтра состоящего из несущей матрицы микро волокон и фильтрующих нано волокон для высоко эффективной фильтрации аэрозольных частиц [Электронный ресурс] // Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии: Материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых. Томск: Изд-во ИОА СО РАН. 2016 С. 279–281.

- 80. Мик, И.А. Изготовление композитного материала фильтра состоящего из несущей матрицы микроволокон и фильтрующих нановолокон для высокоэффективной фильтрации аэрозольных частиц [Текст]. Труды XVII Всероссийской научно-технической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.». Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2016. Т.3. С. 259–262.
- 81. Лебедев, А.С. Изучение феномена снижения эффективности фильтрации волокнистых фильтрующих материалов при загрязнении капельным аэрозолем [Текст] / А.С. Лебедев, И.А. Мик // Материалы 55-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2017: Физика сплошных сред. Новосибирск: Изд-во издательско-полиграфический центр НГУ. 2017. С. 49.
- 82. Мик, И.А. Способ производства композитного самонесущего фильтрующего материала из микро- и нано- волокон [Электронный ресурс] / И.А. B.H. Мик, Горев Тезисы международной докладов конференции «Одиннадцатые Петряновские и Вторые Фуксовские чтения». – Москва. – 2017 – C. 30-32.
- 83. Мик, И.А. Экспериментальное изучение динамики зарядки пористого диэлектрика при получении толстослойного волокнистого материала [Электронный ресурс] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Тезисы докладов международной конференции «Одиннадцатые Петряновские и Вторые Фуксовские чтения». Москва. 2017 С. 32–34.
- 84. Мик, И.А. Исследование динамики зарядки пористого полимерного фильтра [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев // Труды XVIII Всероссийской научнотехнической конференции «Наука. Промышленность. Оборона.». –Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2017. Т.3. С. 259–261.
- 85. Мик, И.А. Метод производства энергоэффективного аналога НЕРА фильтра на основе гибридного фильтрующего наноматериала [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, Р.О. Колбаскин // Материалы 10-й Всероссийской научнопрактической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Технологии и оборудование химической,

биотехнологической и пищевой промышленности». –Бийск: Изд-во АлтГТУ – 2017. С. 105–107.

- 86. Мик, И.А. Измерение параметров зарядки пористого диэлектрика в процессе производства аэрозольных фильтров методом гибридного формования [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, А.С. Лебедев // Материалы 12-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (ИАМП-2017). –Бийск: Изд-во АлтГТУ 2017. С. 221–222.
- 87. Лебедев, А.С. Изучение феномена снижения эффективности фильтрации волокнистых фильтрующих материалов при загрязнении капельным аэрозолем [Текст] / А.С. Лебедев, К.В. Коновалов, И.А. Мик // Физика сплошных сред : Материалы 56-й Междунар. науч. студ. конф. / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск : ИПЦ НГУ. —2018. С. 15.
- 88. Коновалов, К.В. Автоматизация экспериментальной установки для получения функционально-градиентного фильтрующего материала, состоящего из каркасных волокон субмиллиметрового диаметра и фильтрующих волокон субмикронного диаметра [Текст] / К.В. Коновалов, А.С. Лебедев, И.А. Мик // Инструментальные методы и техника экспериментальной физики : Материалы 56-й Междунар. науч. студ. конф. / Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск : ИПЦ НГУ. 2018. С. 13.
- 89. Мик, И.А. Расчёт оптимального профиля фильтрующих нановолокон комбинированного материала [Текст] / И.А. Мик, В.Н. Горев, В.В. Ларичкин // Южно-Сибирский научный вестник. 2018. №3, С. 24–28.

# Приложение А. Анализ полимеров с помощью ИКФС

Для формования фильтрующих элементов использовались полимеры, устойчивые к содержанию в воздухе агрессивных веществ (кислот, щелочей): ПА 6.6. и ПП. Для того, чтобы убедиться в надёжности срока службы фильтрующего элемента с помощью анализа сырьевых материалов (гранул), был подтверждён химические состав полимеров, а значит их химическая стойкость к агрессивным средам. Химический состав использованных полимеров подтверждался с помощью ИКФС. Экспериментальные спектры полимеров (рис. А.1 и А.2) были получены на инфракрасном Фурье-спектрометре Varian 640 IR, ГР № 40223-08, No IR Зав. 1202M013. Характеристические полосы поглощения экспериментальных ИК спектров, полученных образцов материала, представлены в таблице А.

Таблица A – Характеристические полосы поглощения экспериментальных ИК спектров полимеров

Полимер	Волновое число, см <sup>-1</sup>	Характеристика
ПП (рис. А.1)	2835 - 2955	Валентные симметричные и антисимметричные колебания С–H в $\mathrm{CH}_2$ или $\mathrm{CH}_3$
	2342 - 2360	$\mathrm{CO}_2$ из воздуха
	1540	C-N валентные колебания и CO-N-H деформационные колебания
	1378 - 1459	Валентные C-N и деформационные N-H колебания
	975 - 1168	Валентные колебания СН <sub>2</sub> –СН(СН <sub>3</sub> )
	665 - 900	Деформационные колебания δ(С-Н)
ПА 6.6. (рис. А.2)	3088 - 3299	Валентные N-H колебания
	2860 - 2935	Валентные колебания С–Н
	2343 - 2360	СО2 из воздуха
	1637	Валентные колебания С = О
	1543	C-N валентные и CO-N-H деформационные
		колебания
	1201 - 1466	Валентные C-N и деформационные N-H колебания
	1110 - 1170	Валентные колебания СН <sub>2</sub> –СН(СН <sub>3</sub> )
	578 - 732	Деформационные колебания С–Н

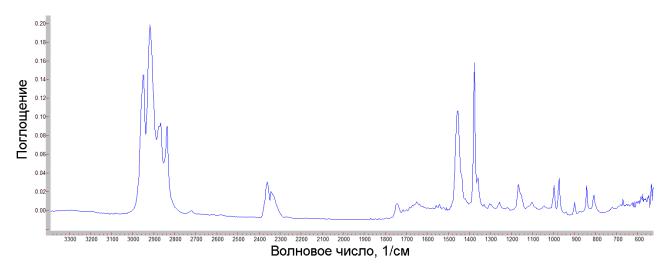


Рисунок А.1 – ИКФС спектр ПП

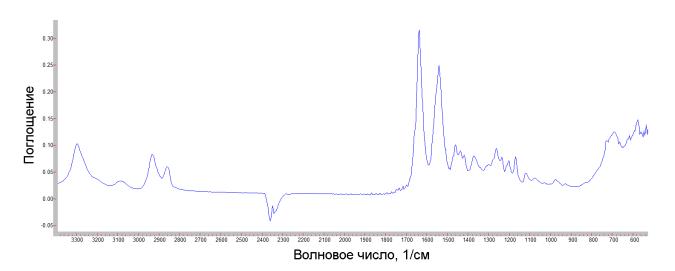


Рисунок A.2 – ИКФС спектр ПА 6.6.

## Приложение Б. Акт внедрения

TION.

Акционерное общество «Холдинговая компания Тион», группа компаний «Тион».

ИНН 5408276501, КПП 540801001, ОГРН 1095473011127, р/с 40702810111050012928. ФИЛИАЛ «НОВОСИБИРСКИЙ» АО «ГЛОБЭКСБАНК», БИК 045004747 к/с 30101810150040000747

Юр. и факт. адрес 630090, Г. Новосибирск, ул. Инженерная, 20, офис 128Д тел. +7 (383) 344-94-43

**УТВЕРЖДАЮ** 

Генеральный директор ХК Тион

Фольц В.А.

28» albapa 2019 1

#### AKT

о применении результатов диссертационной работы Мика И.А. «Фильтрующий элемент на основе нановолокнистого полимерного материала для повышения эффективности тонкой очистки воздуха»

г. Новосибирск

2019 г.

Результаты диссертационной работы аспиранта НГТУ Мика И.А. были использованы ХК Тион, АО и послужили основой опытной установки по производству воздушных фильтров. При личном участии и под контролем Мика И.А. подобран оптимальный технологический режим работы, при соблюдении которого обеспечивались проектные показатели изделий (фильтров). Сейчас, разработанные в диссертации рекомендации по конструированию производственных станков используются конструкторским бюро ХК Тион, АО для реконструкции ранее использованного типа станков (каретка, экструдер) до новой промышленной установки (каретка, экструдер, генератор фильтрующих волокон).

Реконструкция производственного станка позволит производить новый тип объёмного воздушного фильтрующего элемента, не уступающий ведущим аналогам.

Руководитель Отдела разработок ООО «Тион Инжиниринг»

Директор по производству ООО «Аэросервис»

Чубов А.С.

Лебедев А.А.

## Приложение В. Акт внедрения

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе НГТУ,
д.т.н., доцент
Брованов С.В.

2018\_г.

АКТ о внедрении результатов диссертационного исследования в учебный процесс

Результаты диссертационного исследования Мика Ивана Александровича по теме «Фильтрующий элемент на основе нановолокнистого полимерного материала для повышения эффективности тонкой очистки воздуха», выполненного на кафедре инженерных проблем экологии Новосибирского государственного технического университета, внедрены в учебный процесс на выпускающей кафедре инженерных проблем экологии на основании решения расширенного заседания кафедры (протокол №18-04 от 29 июня 2018 г.).

Указанные результаты включены в курс «Процессы и аппараты защиты атмосферного воздуха» направления подготовки 20.03.01 Техносферная безопасность, профиль/специализация: инженерная защита окружающей среды.

Начальник учебного управления НГТУ, к.т.н., доцент

/Никитин Ю.В.

« 29 » июня 2018 г.

Заведующий отделом подготовки кадров высшей квалификации НГТУ, д.т.н., доцент

Драгунов В.П. « 29 » июня 2018 г.