ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех)

На правах рукописи

Першин Николай Алексеевич

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАБОТЫ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРЕТНЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА ВЫСОКОГО КЛАССА ДЛЯ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

[1.3.17**] — «**Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества**»**

Диссертация
на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
член-корреспондент РАН,
доктор физико-математических наук
Профессор Иванов В.В.

Долгопрудный — 2026

Оглавление

Актуальность задачи 6

ГЛАВА 1. СВОЙСТВА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ФИЛЬТРАЦИИ 15

1.1 Классификация частиц по размеру 15

1.2 Классификация по проводимости материала частиц 17

1.3 Способы образования аэрозолей 18

1.4 Концентрация аэрозолей 20

1.5 Способы измерения аэрозолей 21

1.6 Физические свойства аэрозолей 23

1.7 Движение заряженной частицы в электрическом поле 30

1.8 Способ зарядки аэрозолей и количество зарядов на частице 30

1.9 Зарядка взвешенных частиц в воздухе при контакте с ионами 34

1.10 Коронный разряд как источник одноименно заряженных ионов .. 36

1.11 Улавливание аэрозолей фильтрами 44

1.12 Механизмы фильтрации аэрозолей 47

1.13 Электростатическое улавливание аэрозолей волокнистыми фильтрами 55

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ 67

2.1 Установка изготовления фильтров 67

2.2 Получение аэрозолей DEHS в генераторе Ласкина 69

2.3 Генерация аэрозолей NiO, Al_2O_3 в искровом разряде..... 70

2.4 Генерация гигроскопичных аэрозолей йодистого калия..... 72

2.5 Характеризация аэрозольных частиц при помощи анализатора дифференциальной электрической подвижности 73

2.6 Оптический счетчик счетчика частиц 75

2.7 Главный измерительный стенд 77

ГЛАВА 3. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРЕТНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ 81

3.1 Выполнение измерений однородности структурных параметров фильтра 81

3.2 Дополнительный прижим, как способ получения более тонких волокон 86

3.3 Влияние параметров изготовления волокнистых фильтров на их структурные характеристики 88

3.4 Влияние толщины фильтров на их эксплуатационные характеристики 91

3.5 Характер зависимости проскока от размера частиц 93

3.6 Влияние линейной скорости воздуха через фильтр на проскок и сопротивление фильтра 94

3.7 Влияние частоты вращения шпули на эксплуатационные характеристики фильтров 96

3.8 Влияние давления прикатки на эксплуатационные характеристики фильтров 97

3.9 Влияние диаметра выходного отверстия фильеры на параметры фильтра 100

3.10 Выводы к главе 3 102

ГЛАВА 4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ЭЛЕКТРЕТНЫХ ФИЛЬТРОВ..... 104

4.1 Механическая эффективность фильтра 104

4.2 Влияние полярности коронного разряда..... 107

4.3 Исследование влияния типа аэрозоля на эффективность фильтра 109

4.4 Влияние времени зарядки фильтра на эффективность фильтрации 113

4.5 Разработка методики измерения суммарного заряда всего фильтра 115

4.6 Методика измерения локального потенциала in-situ. 118

4.7 Исследование влияния конфигурации заземляющего электрода на локальный потенциал и суммарный заряд фильтра..... 119

4.8 Микроскопическое исследование поверхности фильтра после эксплуатации..... 126

4.9 Исследование зависимости эффективности фильтрации от конфигурации заземляющего электрода..... 130

4.10 Зависимость тока заземления от среднего размера частиц..... 134

4.11 Зависимость тока заземления и суммарного заряда от массового расхода аэрозолей 135

4.12 Исследование эффективности фильтра в зависимости от его поверхностной проводимости 142

4.13 Предлагаемые модели электрических свойств фильтров 145

4.14 Каскадный фильтр как способ избежания стока заряда 149

4.15 Выводы к главе 4 151

ЗАКЛЮЧЕНИЕ 153

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ 159

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 161

Актуальность задачи

В настоящее время во многих отраслях человеческой деятельности предъявляются повышенные требования к содержанию взвешенных частиц в воздухе, называемых аэрозолями. К таким отраслям относятся прежде всего микроэлектронные производства, фармацевтические производства, учреждения здравоохранения, а также любые производства, в технологии которых используются аэрозоли (порошковая металлургия)

Так, для микроэлектронных производств в работе [1] показано, что на дефект размером 1/100 литографического размера уже критически сказывается на доле пригодных к использованию полупроводниковых устройств. При размере 1 мкм дефект может быть вызван частицей размером 10 нм, в связи с чем необходимо оборудование чистых помещений с системой очистки воздуха и контроля взвешенных частиц в том числе и субмикронного размера.

В фармацевтическом производстве источником аэрозолей (в том числе и микробиологических) является персонал [2], поэтому создание чистых помещений с фильтрацией и контролем содержания аэрозолей необходимо во избежание микробиологического загрязнения препаратов.

Также высокие требования предъявляются к учреждениям здравоохранения, а именно операционным блокам, палатам интенсивной терапии и местам скопления людей, особенно со сниженным иммунитетом [3], поскольку люди являются источником патогенных аэрозолей различной природы. Более того в нормативных требованиях РФ, а именно в [4] есть прямое указание о необходимости применения фильтров тонкой очистки в инфекционных отделениях в системах как приточной, так и вытяжной вентиляции воздуха.

В общем правила для построения чистых помещений различного назначения устанавливаются [5]. Согласно этому документу, выделяют следующие зоны различного класса чистоты в зависимости от содержания взвешенных частиц.

Таблица 1.1 Классы помещений ISO

Класс ISO	≥0.1 мкм	≥0.2 мкм	≥0.3 мкм	≥0.5 мкм	≥1 мкм	≥5 мкм
ISO 1	10	2	–	–	–	–
ISO 2	100	24	10	4	–	–
ISO 3	1 000	237	102	35	8	–
ISO 4	10 000	2 370	1 020	352	83	–
ISO 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
ISO 7	–	–	–	352 000	83 200	2 930
ISO 8	–	–	–	3 520 000	832 000	29 300
ISO 9	–	–	–	35 200 000	8 320 000	293 000

Для того, чтобы поддерживать такие классы чистоты используют фильтрацию воздуха от аэрозолей. В документе [6] фильтры классифицированы в зависимости от эффективности улавливания аэрозолей за один проход по *наиболее проникающим частицам*:

Таблица 1.1 Классы фильтрации

Класс	Тип	Общая эффективность	Локальная эффективность
E10	EPA	≥ 85 %	—
E11	EPA	≥ 95 %	—
E12	EPA	≥ 99.5 %	—
H13	HEPA	≥ 99.95 %	≥ 99.75 %
H14	HEPA	≥ 99.995 %	≥ 99.975 %
U15	ULPA	≥ 99.9995 %	≥ 99.9975 %
U16	ULPA	≥ 99.99995 %	≥ 99.99975 %
U17	ULPA	≥ 99.999995 %	≥ 99.9999 %

Существуют высококлассные механические фильтры класса E11-U16, и они производятся в России [7, 8, 9]. Основным материалом для производства таких фильтров является фильтровальная бумага из стекловолокна (стеклобумага) [10].

Однако, как отмечено в [11] сам фильтровальный материал в России не производится. Также стоит отметить, что для таких отраслей как фармацевтические производства и медицина применяемые механические фильтры обладают важным недостатком: они улавливают микроорганизмы, однако не инактивируют их [12].

Таким образом наблюдается следующая проблематика:

1) На сегодняшний день в России нет собственного производства стекловолоконного фильтрующего материала, обеспечивающего потребности производств высокоэффективных фильтров
2) У производимых механических фильтров есть существенный недостаток для ряда отраслей, а именно невозможность инактивации уловленных биоаэрозолей

В настоящей работе рассматривается альтернативный способ фильтрации аэрозолей – не механический, а электростатический, с помощью возобновляемых электретных фильтров.

К преимуществам такого метода является использование доступных фильтровальных материалов, изготовленных по стандартной технологии раздува расплава.

Необходимо отметить, что за последние 10 лет время [13] количество работ по электретным фильтрам возросло значительно, что свидетельствует об интересе отрасли к данной технологии в целом.

Одним из способов получения фильтр-материалов из диэлектрических материалов является раздув расплава полипропилена с последующей намоткой на вращающуюся шпулю [14, 15, 16, 17]. Полипропилен является диэлектриком и может удерживать заряд (то есть является электретом). Для приобретения же заряда волокнами используется заряжение аэрозолей в поле коронного разряда перед их улавливанием на диэлектрический фильтр. Поэтому рассматриваемая система является возобновляемым электретным фильтром.

Целью данной работы является разработка научных основ работы возобновляемых электретных фильтров для создания систем очистки воздуха высокого класса для микроэлектронной промышленности и других областей техники

Данная цель достигается решением следующих задач:

1) Установление взаимосвязей между технологическими параметрами изготовления фильтров и структурными/геометрическими характеристиками изготавливаемых фильтров.
2) Проведение комплекса измерений параметров аэрозольных наночастиц в потоках воздуха с применением системы анализа дифференциальной электрической подвижности и диффузионного аэрозольного спектрометра для определения концентраций и распределений по размерам наночастиц;
3) Исследование эффективности улавливания аэрозольных наночастиц в волокнистой среде электретного фильтра в системе очистки воздуха в зависимости от их природы (проводящие, диэлектрические, гигроскопичные, гидрофобные)

4) Проведение измерений фильтров после первичной эксплуатации с помощью оптического и электронного микроскопов
5) Разработка методики измерения суммарного заряда всего фильтра.
6) Разработка методики in-situ измерения локального потенциала на поверхности фильтра
7) Исследование влияния суммарного заряда и локального потенциала фильтра на эффективность улавливания аэрозолей
8) Микроскопическое исследование зависимости количества осажденных частиц от локального потенциала на поверхности фильтра
9) Исследование влияния поверхностной проводимости фильтра на его способность удерживать заряд и эффективность фильтрации
10) Построение моделей электрических свойств фильтров, а именно моделей накопления электрических зарядов волокнами фильтра, возникновения электрического тока при захвате заряженных аэрозолей.

Научная новизна работы

1) Разработана методика вычисления диаметра волокон размера пор волокнистых нетканных фильтров с помощью обработки массива микрофотографий
2) Установлено влияние технологических параметров изготовления волокнистых цилиндрических фильтров на их свойства и эффективность улавливания наночастиц
3) Исследовано влияние микроструктуры различных фильтров на их суммарный заряд и проскок. По результатам исследований

обнаружено, что с увеличением площади поверхности волокон фильтра (путем варьирования параметров намотки и/или увеличением толщины) растет его суммарный заряд

4) Разработана методика измерения суммарного заряда и локального потенциала у поверхности фильтра. Проведены испытания и разработана теория по исследованию влияния этих параметров на эффективность фильтрации, в ходе которых установлено, что равномерное распределение локального потенциала по поверхности и высокое значение суммарного заряда фильтра способствует увеличению эффективности фильтрации.
5) Была разработана модель электрических свойств фильтра, в которой каждый участок волокна рассматривается в виде резистора с некоторым сопротивлением R. Исходя из этой модели, объясняется распределение зарядов и токов по фильтру. Важным выводом является то, что при увеличении проводимости поверхности фильтра вследствие его длительного запыления проводящими частицами, уменьшается ток через внутренние слои фильтра. Также, у запыленного фильтра потенциал внутренней области (внутренний корд) становится меньше, чем у внешней (внешний корд), так как большая часть потенциала теряется на сопротивлении участка между внешней и внутренней поверхностью.

На защиту выносятся положения

Положение 1. Система, состоящая из последовательно установленных зарядителя аэрозолей и диэлектрического волокнистого фильтра, проявляет свойства возобновляемого электретного фильтра. Эффективность улавливания частиц различной природы (диэлектрических, проводящих, гидрофобных и гигроскопичных) такими фильтрами с предварительной зарядкой аэрозоля в 40–80 раз выше, чем без зарядки.

Положение 2. Параметры изготовления фильтра оказывают существенное влияние на эффективность системы в целом. Эксплуатационные параметры фильтра (проскок, сопротивление, фактор качества) зависят от таких параметров как: толщина, пористость, диаметр волокна.

Положение 3. Для эффективного улавливания наночастиц из воздуха фильтр должен иметь высокий суммарный заряд, а потенциал должен быть равномерно распределён по его поверхности.

Положение 4. Для поддержания высокой эффективности фильтра в течение длительного времени необходимо, чтобы фильтр сохранял диэлектрические свойства и препятствовал стеканию приобретённого заряда.

Положение 5. Реализована конструкция каскадного электретного фильтра, позволяющая преодолеть проблемы стекания и перераспределения заряда. Такая конструкция позволила получить фильтрующую систему с проскоком не более 0,00248 %, соответствующую классу фильтрации H14.

Научная и практическая значимость работы

Результаты работы расширяют знания о свойствах возобновляемых электретных фильтрах и могут использоваться при разработке высокоэффективных систем очистки воздуха

- для микроэлектронных предприятий

- для фармацевтических предприятий

- для медицинских учреждений

Достоверность результатов обеспечивается:

- количеством проведенных измерений и вычислениями погрешностей результатов измерений;

- использованием нескольких методов измерений, имеющую качественную сопоставимость;

- согласованностью результатов экспериментов с теоретическими предсказаниями;

Основные материалы диссертации опубликованы соискателем в следующих работах:

1. Ефимов А. А., Иванов В. В., Волков И. А., Субботина И. Р., Першин Н. А. Исследование эффективности фильтрации наноразмерных аэрозолей разной природы электретными волокнистыми фильтрами // Российские нанотехнологии. — 2013. — Т. 8, № 11–12. — С. 96–102.

2. Pershin N. A., Efimov M. N., Sudin V. V., Ivanov V. V. Role of fabrication parameters in enhancing cylindrical electret polypropylene fiber-based filters for air purification // Chimica Techno Acta. 2025. Vol. 12, No. 4. Art. 8952.

3. Pershin N. A., Efimov M. N., Sudin V. V., Ivanov V. V. Efficiency of a Dielectric Fibrous Filter Under Unipolar Particle Charging: Effects of Surface Potential and

Grounding Probe Configuration // Russian Journal of Applied Chemistry. 2026. Vol. 99, No. 6. P. 299–315.

По теме диссертации получены следующие результаты интеллектуальной деятельности:

1. Патент RU 220312 U1 «Устройство очистки воздуха с электростатическим фильтром» / А. А. Першин, Н. А. Першин, Р. Р. Салимшин, Р. Р. Салимшин; патентообладатель ООО «Завод Аэролайф». Опубликован 06.09.2023.
2. Патент RU 2866220 C1 «Высокоэффективный каскадный электростатический фильтр» / Н. А. Першин, А. Н. Першин, А. А. Першин, В. В. Судьин, Д. В. Барсуков; патентообладатель ООО «Информационно-технологический институт». Приоритет 07.11.2025, зарегистрирован 15.07.2026.

Работа прошла апробацию на следующих научных конференциях и семинарах:

1. 34-я конференция АСИНКОМ, 2024, Першин Н. А., Судьин В. В., Першин А. Н. «Высокоэффективная фильтрация аэрозолей возобновляемыми электретными фильтрами»,
2. XXX Юбилейный Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Санкт-Петербург, 1–5 июля 2024 г. Першин Н. А. «Фильтрация наноразмерных проводящих аэрозолей возобновляемыми электретными фильтрами»,

Глава 1. Свойства аэрозольных частиц и особенности их фильтрации

Аэрозоли – это дисперсные системы, состоящие из взвешенных воздухе или ином газе частиц. [18] Природа частиц в аэрозолях многообразна: частицы могут быть жидкими, твердыми, смешанного типа, могут быть гидрофильными или гидрофобными. Также частицы иметь различную форму – от правильных шарообразных капель до случайных агломератов. Аэрозоли являются неустойчивой системой: частицы могут оседать (что характерно для частиц свыше1 мкм [19] или коагулировать (слипаться) друг с другом [18, 20]

1.1 Классификация частиц по размеру

Размеры частиц (r) простираются от 10^{-9} до 10^{-4} м. Размер частиц является одним из важнейших свойств, по которому атмосферные аэрозоли в настоящий момент классифицируются следующим образом [21]:

1) мелкодисперсные или наноразмерные (от 1 до 100 нм)

2) среднедисперсные, большие или субмикронные (от 100 нм до 1 мкм)

3) грубодисперсные, гигантские (более 1 мкм)

Взвешенные частицы с r>10 мкм, как правило, к аэрозолям не относят. Однако в природе при вулканических взрывах и песчаных бурях встречаются частицы до 100 мкм [22]. В технике есть примеры переноса взвешенных частиц размером до 15 мм с помощью пневмотранспорта [23]. Хотя в настоящей работе такие системы и не рассматриваются, стоит заметить, что применяемые в системах пневмотранспорта циклоны не задерживают частицы размером менее 1 мкм [24], следовательно может происходить загрязнение неуловленными вторичными субмикронными аэрозолями, образованными из

переносимых порошков путем истирания [25], которые оказывают негативное воздействие на оборудование [26, 27, 28] и окружающее население. [29, 30]. В связи с этим рассмотрение фильтрующих систем для аэрозолей такого рода в данной работе уместно.

Важно отметить, что определение размера частиц зависит от способа их изучения и их поведения. Поэтому, когда речь идет о диаметре частицы d_p эта величина совпадает с истинным диаметром только в том случае, если это сферическая частица, размер которой измерен при помощи микроскопа. Например, если частица несферическая (что типично для минеральных пылей или кристаллов, образовавшихся в результате нуклеации), то поведение ее будет, чем у сферы. В таких случаях говорят об эквивалентном диаметре.

Эквивалентный диаметр определяется как диаметр сферической частицы, обладающей тем же значением определённого физического свойства, что и рассматриваемая частица.

Например, аэродинамический эквивалентный диаметр — это диаметр сферы со стандартной плотностью 1000 кг/м³, которая при осаждении под действием силы тяжести имеет ту же установившуюся скорость осаждения, что и рассматриваемая частица.

Аэродинамический диаметр удобен для описания поведения частиц (обычно размером более 0,3–0,5 мкм) в дыхательных путях, а также в технических устройствах, таких как фильтры, циклоны и импакторы, где доминирует инерционное движение частиц.

Движение чрезвычайно малых частиц, размер которых составляет порядка нескольких нанометров, определяется уже не столько инерцией, сколько броуновским движением.

Для таких частиц аэродинамический диаметр как правило не применяют. Вместо него используется эквивалентный **диаметр по электрической подвижности**.

Эквивалентный диаметр по подвижности — это диаметр сферической частицы, имеющей такую же подвижность (определяемую как скорость частицы, возникающую под действием единичной внешней силы), как и рассматриваемая частица.

1.2 Классификация по проводимости материала частиц

Поскольку в настоящей работе мы изучаем фильтрацию аэрозолей на электретных фильтрах, то для нас важно учитывать такое свойство, как проводимость материала, из которого состоят взвешенные частицы:

1) Проводящие аэрозоли (сажа, металлические частицы)
2) Диэлектрические аэрозоли (масло, частицы полимерных материалов, оксиды металлов с большой шириной запрещенной зоны, такие как Al_2O_3)
3) Водорастворимые или гигроскопичные материалы, например соли (йодид калия)

С точки зрения водорастворимости, а точнее взаимодействия с водяным паром, в работе [21] ранее предлагалась такая классификация:

1) гигроскопические частицы, растворяющиеся в воде (гидрофильные);

2) смачиваемые, но не растворяющиеся частицы;

3) не вполне смачивающиеся частицы (гидрофобные)

Это связано с тем, что автор изучал явления, связанные с взвешенными частицами в атмосфере, где взаимодействие с водяным паром имеет колоссальное влияние. Для нас же важна способность частиц нести заряд, а также их дальнейшее влияние на свойства фильтра после улавливания. Поэтому мы провели ряд опытов для изучения улавливания аэрозолей

возобновляемыми электретными фильтрами различной природы именно с точки зрения проводимости частиц, а также с точки зрения их влияния на эффективность фильтрации при накоплении на поверхности фильтрующего материала. (Глава 5).

1.3 Способы образования аэрозолей

По способу образования частиц аэрозоли разделяют на следующие 2 категории [31]:

1) конденсационный – при котором частицы образуются при агрегации молекул
2) Дисперсионный – при котором частицы образуются при дроблении вещества

В нашей работе для синтеза тестовых аэрозольных систем использованы методы, основанные как на первом, так и на втором способе. Конденсационные методы удобны для получения ультра-тонких аэрозолей (менее 100 нм) с узким распределением по размерам. Так [31], рекомендует использовать в качестве испытательного аэрозоля серебряные частицы, полученные методом испарения–конденсации. [32, 33]

Серебряные частицы с диаметром электрической подвижности менее примерно 15 нм имеют практически сферическую форму, тогда как более крупные твердые частицы обладают фракталоподобной морфологией [34; 35 36].

Важно отметить, что взвешенные частицы появляются как в результате природных процессов (природные аэрозоли), так и в результате деятельности человека (антропогенные), причем согласно [37] 90% аэрозолей являются природными и образуются в результате вулканической деятельности, лесных пожаров, песчаных бурь и пр., в то время как доля антропогенных аэрозолей в

общей массе составляет 10% и образуются они в процессах сжигания твердого топлива, работы тяжелой дизельной техники, истирания покрышек автотранспорта, работы промышленных предприятий и так далее. Тем не менее, концентрация субмикронных взвешенных частиц (PM1) вне города составляет от 5-70 мкг/м3 в зависимости от местности и экологической обстановки [38] ,[39]. В черте города, как правило, концентрация выше, чем за городом [40] Зимой концентрация аэрозолей также, как правило, выше, чем летом [41]. Таким образом, необходимость очистки воздуха для чистых помещений продиктована как минимум наличием субмикронных взвешенных частиц в атмосферном воздухе.

С точки зрения химического состава в аэрозольных системы крупных городов представлены: сажа, органические соединения, неорганические ионы - SO_4^{2-}, NO_3^-, NH_4^+, CO_3^{2-} (в составе солей), оксиды металлов (Ca, Fe, Al, а также тяжелые Cd, Pb, As, Hg и цементная пыль [43], [44], [46]. Как можно видеть, в воздухе присутствуют частицы различной природы с точки зрения проводимости.

Другим источником аэрозолей в помещениях являются люди, находящиеся в них. В этом случае взвешенные частицы образуются в процессе истирания одежды при движении, от кожи и в процессе дыхания. Измерено [42], что количество частиц, выделяемых одним человеком, варьируется от 50 до 180 тысяч частиц в минуту, причем дыхание является основным источником как субмикронных, так и биоаэрозолей. Таким образом, в обитаемом помещении всегда образуются взвешенные частицы, причем зачастую они биологически активные, что накладывает дополнительные требования к фильтрующей системе, во избежание колонизации фильтров и вторичного биозагрязнения.

Важно отметить, что в чистых помещениях предприятий по производству микроэлектроники одним из источников взвешенных частиц являются реакции веществ, применяемых при травлении и фотолитографии. Так, в работе [45], показано, что характерной реакцией, приводящей к образованию частиц является реакция молекулы аммиака NH_3 с летучими кислотами (HCl, HF, HNO_3), например:

$$NH_3 \text{ (газ)} + HF \text{ (газ)} = NH_4F \text{ (тв.частица)}$$

При обнаруженных в зоне травления концентрациях аммиака и фтороводородной кислоты 7-10 ppb и 4-6 ppb соответственно концентрации частиц PM2,5 составили 17,52 and 18,23 мг/м3. Следует обратить внимание, что концентрации аэрозолей могут быть как счетные, так и массовые как в описанном выше случае. Это зависит от способа измерения концентрации аэрозолей или подсчета частиц, а также нахождения распределения частиц по размерам.

1.4 Концентрация аэрозолей

Под концентрацией аэрозолей подразумевается содержание частиц на единицу объема воздуха. В таких сферах как охрана окружающей среды и контроль промышленных выбросов, как правило используются массовые единицы - мг/м3 или мкг/м3. Измеряемая в таких единицах концентрация получается в результате гравиметрического измерения – измеряют массу частиц, уловленных фильтром, и относят к количеству воздуха прошедшему через фильтр за время отбора пробы. В токсикологических исследованиях важен такой параметр как «концентрация площади поверхности» то есть суммарная площадь поверхности частиц, находящихся в единице объема воздуха, м3/см-3 или м2/м3 [47, 48]. Интересующая нас и наиболее употребимая в области чистых помещений единица концентрация – это

счетная – 1/см-3 или 1/м-3. Именно в таких единицах измеряется концентрация частиц при помощи оптических и конденсационных счетчиков частиц. Далее в работе мы будем придерживаться именно такого определения концентрации аэрозолей.

1.5 Способы измерения аэрозолей

Под измерением аэрозолей подразумевается подсчет количества взвешенных частиц в воздухе, либо нахождение их массовых концентраций, а в общем случае нахождение распределения количества аэрозолей по размерам. Причем размер частиц, измеренный различными методами, может отличаться в зависимости от физических принципов измерения.

Выбор метода измерения основывается преимущественно на размере изучаемых взвешенный частиц. О размере частиц можно судить зачастую исходя из способа образования. Так, при истирании и/или механической обработке материалов, как правило, образуются крупная пыль (свыше 1 мкм). Термические и химические процессы (испарение и конденсация, нуклеация) как правило приводят к образованию субмикронных и нано-частиц [48]. В данной работе рассматриваются прежде всего субмикронные и нано-аэрозоли и методы их измерения.

Методы измерения подразделяют на две большие группы [48]: улавливание аэрозолей на субстрат (фильтр, чашка петри, циклон, импактор) и последующее их изучение и методы, дающие результат в режиме реального времени.

Первая группа включает в себя гравиметрические и микроскопические исследования. Гравиметрические применяются для оценки массовой концентрации аэрозолей. Простейшим вариантом является схема, изображенная на рисунке ниже (рис 1)



Рис 1. Гравиметрическая схема анализа частиц

В данной схеме известное количество воздуха прокачивается через заранее взвешенный фильтр, и взвешивается количество уловленных частиц. Такая схема не дает информации о дисперсности частиц. Однако в дальнейшем частицы могут быть подвергнуты химическому, биологическому или радиационному анализу. Так, например, анализируют содержание тяжелых металлов в воздухе [49]. Также важно отметить, что метод отбора на фильтр позволяет в дальнейшем проводить микроскопические исследования уловленных аэрозолей, в частности их размеров или характеристики вырастающих из частиц структур. Например, мы в своих работах показали, что таким образом при помощи растровой электронной микроскопии и можно изучать не только морфологию волокон фильтра [50], но и степень загрязнённости поверхности волокон фильтрующего материала уловленными частицами [51]. Результаты будут продемонстрированы в главах 3 и 4 настоящей работы.

Методы дающие результаты в реальном времени основаны на измерении свойств или поведения именно взвешенных (а не уловленных частиц). Наиболее популярным методом является оптический подсчет частиц, основанные на рассеянии света. Этот метод использован в настоящей работе. Более подробно принцип, их действия будет описан далее. Оптические

счетчики частиц имеют ограничение связанных с резким падением рассеивающей способности частиц с убыванием их размера, а именно

$$I_{\text{рассеяния}} \sim \frac{1}{r^6} \quad (1.1)$$

В связи с этим подсчет частиц с размером менее 50 нм технически затруднен [48]. Практически, частицы размером менее 100 нм таким методом не изучают. Это накладывает существенные ограничения на изучение нанометровых аэрозолей

Для преодоления вышеописанного ограничения используются так называемые конденсационные счетчики частиц. В таких счетчиках частицы проходят через камеру с пересыщенным паром (как правило, изобутанола), конденсируют на себе вещество увеличиваясь в размерах и затем могут быть измерены оптическим методом. Далее в Главе 2, эти методы будут описаны более подробно.

1.6 Физические свойства аэрозолей

Для понимания механизмов улавливания аэрозолей на фильтр необходимо рассмотреть поведение частиц в зависимости от их свойств и тех сил, которые на них действуют. Взвешенные частицы испытывают на себе [48]:

- Силу сопротивления среды
- Силу тяжести
- Силу Архимеда
- Электростатическую силу (если частица или волокно фильтра заряжены)
- Воздействие молекул газа, приводящее к броуновскому движению частиц
- Ван-дер-ваальсовы силы взаимодействия частиц друг с другом
- Ван-дер-ваальсовые силы взаимодействия частиц с материалом фильтра

Сила сопротивления (аэродинамическое сопротивление), — это сила, препятствующая относительному движению частицы в воздухе или газе. Сила сопротивления возникает вследствие движения частицы и действует в направлении, противоположном её движению. Она является функцией скорости частицы относительно окружающего её газа.

Силу сопротивления среды определяет закон Стокса:

$$F_{\text{drag}} = 3\pi\eta V d_p \quad (1.2)$$

Где

F- сила сопротивления, Н

η – динамическая вязкость, Па*с

V – скорость частицы относительно среды

d_p – диаметр частицы, м

Если частица имеет не сферическую форму, то вводится фактор формы χ и уравнение принимает вид

$$F = 3\pi\eta V \chi d_v \quad (1.3)$$

Где d_v – диаметр сферической частицы, состоящей из материала частицы с его объёмной (насыпной) плотностью, не содержащей пустот, но имеющей ту же массу, что и рассматриваемая частица.

Вышеописанные уравнения (1.1 и 1.2) справедливы , если среду считать непрерывной, что определяется безразмерным числом Кнудсена

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{r_p} = \frac{2\lambda}{d_p} \quad (1.4)$$

Где λ – длина свободного пробега молекул. При нормальных условиях (101350 Па, 298K) в воздухе – 0,0664 мкм. Если размер частиц много больше длины свободного пробега, то Kn<<1, и среду считают непрерывной. Если

0,4<Kn<20, то говорят о переходном режиме. Это соответствует интересующему нас диапазону размеров частиц от 5 нм и до 350 нм. При таких размерах необходимо учитывать коэффициент проскальзывания (или *поправку Каннигема*), который для воздуха при нормальных условиях рассчитывается по уравнению (1.5):

$$C_c = 1 + \mathrm{Kn}\left[\alpha + \beta \exp\left(-\frac{\gamma}{\mathrm{Kn}}\right)\right] \quad (1.5)$$

Где α, β и γ –коэффициенты, определяемые для частиц различной природы экспериментально. В работе [52] приводятся следующие значения коэффициентов для частиц масляного тумана в воздухе при нормальных условиях - 1,209, 0,441, 0,779 для α, β и γ соответственно. Несмотря на то, что публикуются различные экспериментальные значения данных коэффициентов, порядок этих значений коэффициентов не изменяется при переходе от частиц маслянного тумана к другим частицам [53].

С учетом данной поправки на скольжения закон Стокса принимает следующую форму (1.6):

$$F = \frac{3\pi\eta V \chi d_v}{C_c} \quad (1.6)$$

Таблица 1.1 ниже показывает, что для субмикронных аэрозолей данная поправка существенна.

Таблица 1.1 Значения поправки на скольжение

d_p, **нм**	**10**	**20**	**50**	**100**	**200**	**500**	**1000**
$Kn = 2\lambda/d_p$	13,2	6,6	2,64	1,32	0,66	0,264	0,132
C_c	16,3	9,2	4,5	2,8	1,85	1,34	1,17

Закон Стокса справедлив в режимах течения с Re < 0,1. Re – число Рейнольдса, рассчитываемое по уравнению,

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_g U d}{\eta} \quad (1.7)$$

Где ρ_g– плотность газа, кг/м3

U – скорость газа относительно частицы, м/с

d – диаметр частицы

Число Рейнольдса указывает на соотношение силы инерции и сил вязкого трения в потоке. При более высоких значениях Re инерционные силы начинают преобладать и сила сопротивления среды, действующая на частицу становится выше, чем предсказывает закон Стокса, а именно:

$$F = \frac{\pi}{8} C_d \rho_g V^2 d_p^2 \quad (1.8)$$

Где C_d – безразмерный коэффициент, показывающий отношение реальной силы действующей на частицу к динамическому давлению потока воздуха.

Оседание частиц

Гравитационное оседание частиц может быть выражено через плотность частиц и их объем, причем силой Архимеда в случае воздушных аэрозолей пренебрегают в связи с тем, что плотность частиц много больше плотности воздуха:

$$F_{\mathrm{grav}} = \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_p g \quad (1.9)$$

При уравнивании силы воздушного сопротивления (в стоксовском режиме при Re < 0,1) и силы тяжести, следует что скорость гравитационного осаждения (или скорость витания) частиц можно рассчитать по следующей формуле:

$$V_{\text{grav}} = V_{\text{ts}} = \frac{\rho_p d_p^2 g C_c}{18\eta} \quad (1.10)$$

Ниже в таблице 1.2 приведены скорости осаждения, рассчитанные для частиц DEHS с плотностью 912 кг/м3 в воздухе при нормальных условиях:

Таблица 1.2. Скорость витания частиц

d, мкм	v, м/с
0,1	2,7E-07
0,5	6,8E-06
1	2,7E-05
5	6,8E-04
10	2,7E-03
25	1,7E-02
100	2,7E-01

Для сравнения – типичные скорости движения воздуха в вентиляционных системах промышленных предприятий, в том числе и микроэлектронных составляют около 5 м/с [54]. Отсюда следует, что гравитационным осаждением субмикронных частиц на воздуховодах можно пренебречь, а в помещении субмикронные аэрозоли могут находиться чрезвычайно долго, если не предпринимать таких специальных мер, как фильтрация воздуха.

Диффузия частиц и диффузионный захват

Важной характеристикой является подвижность частиц B ($м*с^{-1}*Н^{-1}$), показывающая соотношение приложенной силы к скорости частицы

$$B = \frac{C_c}{3\pi\eta d_p} \quad (1.11)$$

Взвешенные частицы испытывают столкновения с молекулами газа, в результате чего диффундируют. Коэффициент диффузии частицы рассчитывается по уравнению

$$D = \frac{kTC_c}{3\pi\eta d_p} = kTB \quad (1.12)$$

Где k – константа Больцмана ($1{,}38*10^{-23}$ Н*м/К), B – вышеупомянутая механическая подвижность.

Полезной характеристикой для наноаэрозолей является среднеквадратичное смещение частицы, выражаемое формулой.

$$x_{\mathrm{rms}} = \sqrt{2Dt} \quad (1.13)$$

Оно позволяет оценить как далеко частица переместится за счет броуновского движения за время t (с).

Благодаря диффузионному движению частиц они могут быть уловлены волокном фильтра. Для оценки возможности такого улавливания используется безразмерное число Пекле (Pe)

$$\mathrm{Pe} = \frac{Ud_f}{D} \quad (1.13)$$

Оно показывает отношение времени диффузии на расстояние равное диаметру волокна ко времени прохождения потоком воздуха этого расстояния. Возможны различные сценарии захвата частицы в зависимости от значения Pe:

- $\mathrm{Pe} << 1$ - Частица активно перемещается между линиями тока воздуха, поэтому вероятность попадания на волокно велика.
- $\mathrm{Pe} \sim 1$: конвективный перенос частицы с потоком воздуха и диффузия сопоставимы.

- Pe ≫ 1: поток проносит частицу мимо волокна; за время обтекания она диффундирует лишь на небольшое расстояние, вероятность диффузионного захвата невелика

Инерционное движение частиц и импакция

Во время прохождения через фильтр воздух обтекает волокна, то есть изменяет направления движения. Однако движение частицы может отклоняться от линий тока воздуха в результате инерции. Из второго закона Ньютона очевидно, чем тяжелее частица, тем она инертнее и тем меньше влияния оказывает сила сопротивления воздушного потока на траекторию частицы (или вызывает меньшее ускорение частицы). Для количественной оценки вводится так называемое время релаксации частицы

$$\tau = \frac{\rho_p d_p^2 C_c}{18\eta} \quad (1.14)$$

Оно показывает, за какое время частица изменит свою скорость при воздействии внешних сил в (1-1/e) раз или как быстро частица подстроится под внешнюю силу. С понятием времени релаксации связан тормозной путь частицы - $S = V_0\tau$

V_0 – это скорость сообщенная частице в начальный момент времени, а S – расстояние которое пролетит частица до тех пор, пока ее скорость не сравняется со скоростью окружающего воздуха. С точки зрения фильтрации аэрозолей интересным является случай, когда частица движется вместе с потоком воздуха, а затем поток меняет свое направление. В таком случае возможен захват частицы волокном фильтра за счет импакции (столкновения с поверхностью волокна). Для оценки такого захвата используется безразмерное число Стокса.

$$\mathrm{Stk} = \frac{S}{d} = \frac{V_0\tau}{d} = \frac{V_0\rho_p d_p^2 C_c}{18\eta d} \quad (1.15)$$

Где d – характерный размер препятствия (в нашем случае волокна фильтра).

- При $\mathrm{Stk} \ll 1$ частица огибает волокно фильтра вместе с линиями тока.
- При $\mathrm{Stk} \sim 0.1 - 1$ траектория частицы заметно отклоняется от линий тока и имеет место импакционный захват.
- При $\mathrm{Stk} \gg 1$ частица почти не изменяет направление и сталкивается с передней поверхностью волокна

1.7 Движение заряженной частицы в электрическом поле

Если взвешенная частица несет n элементарных зарядов e = 1,6*10^{-19} Кл, то в электрическом поле напряженностью E на нее будет действовать сила:

$$F_{elec} = neE \quad (1.16)$$

При уравнивании электростатической силы и силы сопротивления воздуха постоянная скорость дрейфа частицы будет описываться 1.17:

$$V_{\mathrm{elec}} = \frac{neEC_c}{3\pi\eta d_p} \quad (1.17)$$

Можно заметить, что в данном уравнении присутствует подвижность B (см уравнение 1.11), поэтому уравнение 1.17 часто представляют в виде

$$V_{\mathrm{elec}} = neEB \quad (1.18)$$

При расчете электростатических осадителей также применяют такой термин как электрическая подвижность Z = neB, тогда скорость описывается уравнением

$$V_{\mathrm{elec}} = ZE \quad (1.19)$$

1.8 Способ зарядки аэрозолей и количество зарядов на частице

Особое внимание необходимо уделить способам образования электрического заряда у взвешенных частиц. Частицы могут приобрести заряд

в результате взаимодействия с ионами, с заряженными волокнами, в результате взаимодействия с ионизирующим излучением (фотоны или бета-излучение) или в результате трения друг об друга (трибоэлектрический эффект).

Разделение зарядов при распылении масла и трении масляных капель друг об друга) использовался в опыте Милликена по определению элементарного заряда [55, 18]

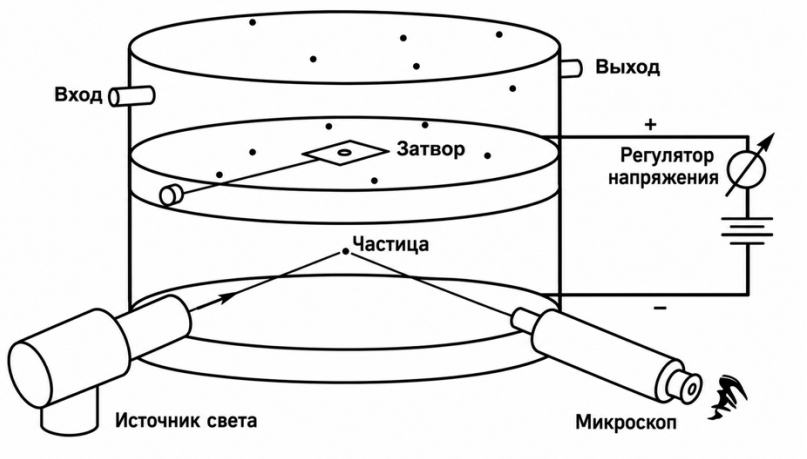


Рис 1.2 Опыт Милликена

Сферическую частицу субмикронного размера — каплю масла — помещали между двумя горизонтальными параллельными пластинами. Разность потенциалов между пластинами регулировали с высокой точностью. На частицу направляли пучок света и наблюдали за ней через горизонтально расположенный микроскоп, оптическая ось которого перпендикулярна световому пучку. Освещённая частица выглядит как светлая точка на тёмном фоне.

При отсутствии напряжения между пластинами диаметр масляной капли определяли по измеренной скорости её осаждения согласно уравнению (1.10).

В результате распыления и трения капли несут один или несколько избыточных электронов (в опыте Милликена наблюдали преимущественно за отрицательно заряженными частицами для удобства, а верхняя пластина была положительно заряжена). Регулируя напряжение на верхней пластине, добивались, чтобы направленная вверх электростатическая сила уравновесила силу тяжести, и частица оставалась неподвижной. Находили заряд n*e согласно уравнению:

$$neE = \frac{\rho_p \pi d_p^3 g}{6} (1.20)$$

В результате большого количества экспериментов обнаружили, что определяемые таким образом заряды частиц всегда кратны целому числу, а именно – произведению целого числа n на элементарный заряд e = $1{,}6*10^{-19}$ Кл.

В настоящий момент эффект самопроизвольной зарядки аэрозолей в результате распыления в технике практически не применяется. В пневмотранспорте он оказывает негативное влияние из-за возникающей пожарной опасности. [56]

Также самопроизвольная зарядка аэрозолей при распылении может влиять на измерители электрической подвижности аэрозолей. Для прецизионных измерений размеров частиц в анализаторах электрической подвижности, наоборот, производят предварительную нейтрализацию частиц при помощи радиации [57]. Источник ионизирующего, излучения создает положительно и отрицательно заряженные ионы, которые в результате взаимодействия с заряженным аэрозолем делают его суммарный заряд близким нулю.

В противоположность самопроизвольному приобретению заряда частицами принудительная зарядка аэрозолей нашла широкое применение в

технике. Зарядка аэрозолей и распыление для обеззараживания поверхностей была предложена еще в работах Н.А.Фукса [18] на основе явления саморасширения облака униполярно заряженного аэрозоля: если такое облако ограничено поверхностями, то при его расширении частицы садятся на все поверхности, а не оседают вниз за счет гравитации.

Рассмотрим различные способы сообщения заряда взвешенным частицам.

Формирование капель из жидкости на конце капилляра под действием сильного электростатического поля [58]

При высокой напряженности электростатического поля капля жидкости начинает вытягиваться и изменять свою со форму сферической на коническую (т.н. конус Тейлора).



Рис 1.3 Конус Тейлора

Это явление обусловлено действием сил поверхностного натяжения, стремящегося сохранить сферическую форму капли, и сил электростатического притяжения заряженной поверхности, стремящихся

вытянуть каплю. Этот эффект на сегодняшний день активно применяется в следующих сферах:

- Масс-спектрометрический анализ белков и природных молекул. Используется электроспрей-методика при которой раствор изучаемых белков (или иных молекул) заряжается и распыляется, далее происходит испарение растворителя в результате чего размер частиц уменьшается при сохранении заряда до тех пор, пока из-за высокой плотности заряда на поверхности частица не распадается на отдельные заряженные белки или агрегаты. [59]
- Электроспиннинг или электроформирование волокон [60]. В случае распыления растворов высокомолекулярных соединений (полимеров) сформированный конус не распадается на капли вследствие вязкости образовавшихся при испарении растворителя цепочек, поэтому образуются тонкие волокна. Это явление нашло свое применение при изготовлении фильтрующих материалов.

1.9 Зарядка взвешенных частиц в воздухе при контакте с ионами

Наиболее часто используемым в технике способом заряда аэрозолей является зарядка при помощи ионов. При столкновении иона с частицей он «прилипает» к ней, и частица приобретает его заряд. Частицы, смешанные с униполярными ионами одного знака, заряжаются в результате случайных столкновений между ионами и частицами [55]. Этот процесс называется *диффузионной зарядкой*, поскольку столкновения обусловлены броуновским движением ионов и частиц. Важно отметить, что для этого механизма не обязательно внешнее электрическое поле. По мере накопления заряда создаваемое им поле начинает отталкивать дополнительные ионы, снижая скорость зарядки. Ионы, находящиеся в тепловом равновесии с молекулами газа, имеют распределение скоростей Больцмана. По мере увеличения заряда

частицы всё меньше ионов обладают скоростью, достаточной для преодоления силы электростатического отталкивания, поэтому скорость зарядки постепенно стремится к нулю. Заряд n приобретаемый частицей размера d_p за время t выражается уравнением

$$n(t) = \frac{d_p kT}{2K_E e^2} \ln\left[+\frac{\pi K_E d_p \bar{c}_i e^2 N_i t}{2kT}\right] (1.21)$$

Где,

e - элементарный заряд $1{,}6 \times 10^{-19}$ Кл

C – средняя тепловая скорость ионов, 240 м/с

N_i – концентрация ионов в воздухе,

а K_E:

$$K_E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9.0 \times 10^9 \text{ Н м}^2/\text{Кл}^2 \ (1.22)$$

Если взвешенная частица находится в сильном электростатическом поле, то возможна так называемая *полевая зарядка*. Незаряженная частица искажает силовые линии поля, причем степень искажения зависит от диэлектрической проницаемости материала частицы (ε) и от заряда частицы. Ионы, перемещаясь вдоль силовых линий сталкиваются с частицей и придают ей заряд. По мере накопления ионов на поверхности частицы новые ионы перестают к ней «прилипать» в результате чего происходит насыщение и в дальнейшем заряд частиц не растет. Важную роль здесь играет площадь поверхности частицы, поэтому максимальный заряд пропорционален квадрату ее d_p, а сам заряд частицы с течением времени изменяется согласно уравнению (1.23):

$$n(t) = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2}\right)\left(\frac{E d_p^2}{4K_E e}\right)\left(\frac{\pi K_E e Z_i N_i t}{1 + \pi K_E e Z_i N_i t}\right) \ (1.23)$$

Где, Z - электрическая подвижность, $м^2/В*с$

Третий множитель уравнения (1.23) отвечает за скорость роста заряда частицы, и она зависит от подвижности частиц и концентрации ионов. Очевидно, при достаточно большом времени последний множитель обращается в единицу и выражение для максимального заряда частицы приобретает вид:

$$n(t) = \left(\frac{3\varepsilon}{\varepsilon + 2}\right)\left(\frac{E d_p^2}{4K_E e}\right) \quad (1.24)$$

Максимальный заряд в случае полевой зарядки зависит от напряженности поля и диэлектрической проницаемости материала частицы. Если сравнить уравнение (1.21) и (1.23), можно заметить, что в первом случае заряд частицы линейно зависит от d_p, а во втором – пропорционален квадрату d_p. В связи с этим для частиц свыше 1 мкм главную роль играет полевая зарядка, а для частиц менее 0,1 мкм – преимущественно диффузионная даже в присутствии сильного электрического поля. А в случае $0,1 < d_p < 1$ мкм имеют место оба механизма.

1.10 Коронный разряд как источник одноименно заряженных ионов

Для униполярной зарядки аэрозолей необходима высокая концентрация одноименно заряженных ионов. Однако в виду их взаимного отталкивания и высокой подвижности ионы обладают малым временем существования, поэтому генерация ионов должна происходить непрерывно. Ионы в воздухе могут образовываться под действием радиоактивного излучения, ультрафиолетового излучения, пламени и коронного разряда. Практически же в технике применяется именно коронный разряд [55]

Для его возникновения необходимо создать сильное электростатическое поле, например между соосно расположенными проволокой и обечайкой. Воздух и другие газы в обычных условиях являются изоляторами, но в области с достаточно высокой напряжённостью электрического поля происходит электрический пробой воздуха, вследствие чего он начинает обладать ионной проводимостью.

В зависимости от геометрии поля пробой может происходить в форме дугового или коронного разряда. В системе «проволока — обечайка» поле неоднородное и напряжённость, достаточная для пробоя, существует только в тонком слое у поверхности проволоки. Стоит отметить, что неоднородность поля чрезвычайно важна, потому как, если бы генерацию аэрозолей проводили в системе из плоско - параллельных пластин разноименного знака, то пробой бы наблюдался во всем объеме между пластинами и вместо коронного разряда наблюдался бы дуговой.

Для оценки напряжённости поля, необходимой для пробоя в системе «проволока-обечайка» используют следующую эмпирическую формулу (формула Пика) [55]:

$$E_c = 30\left(1 + \frac{0{,}426}{\sqrt{d_{w,\text{см}}}}\right) \text{ кВ/см} \quad (1.25)$$

Где d_w – диаметр проволоки в см.

Рассчитать напряженность поля E(r) в зависимости от удаления r от проволоки в такой системе можно по уравнению:

$$E(r) = \frac{U}{r \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad (1.26)$$

Где U – напряжение на проволоке, кВ

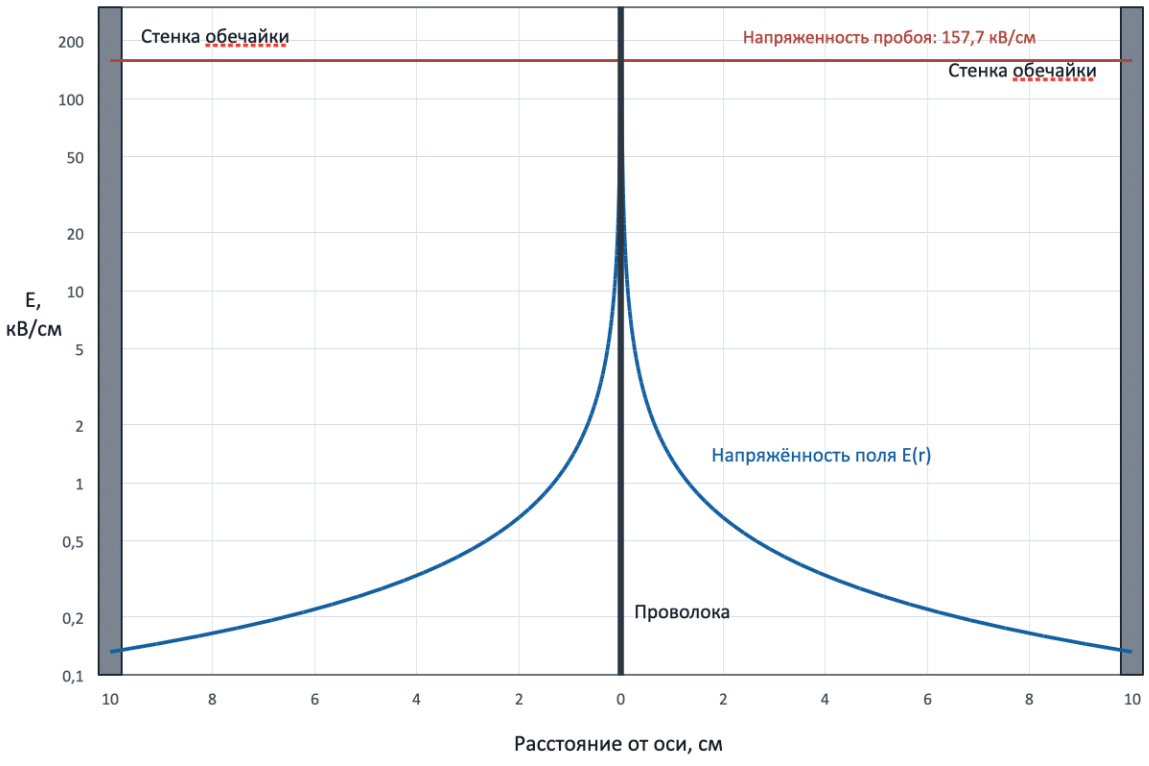
b – диаметр обечайки, см

a - радиус проволоки, см

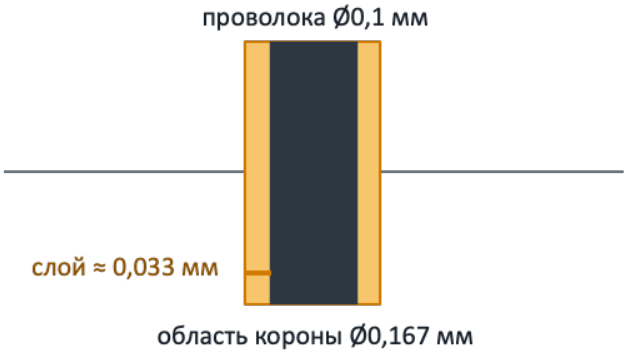
Для того чтобы оптимально подобрать конструкцию блока коронного разряда для зарядки аэрозолей необходимо убедиться в том, что:

1) Напряженность электрического поля у проволоки превышает напряжение пробоя и коронный разряд в принципе возможен
2) Поле неоднородно и убывает таким образом, что образование дугового разряда исключено

Ниже на рисунке приведен результат расчета для проволоки толщиной 0,01 см и цилиндрической обечайки ф10 см при напряжении на проволоке 10 кВ.



а)



б)

Рис. 1.4 а) Зависимость напряженности поля на удалении R от оси системы «проволока-цилиндрическая обечайка», б) схематическое увеличенное изображение области коронного разряда

Как можно видеть из рисунка 1.4а напряженность убывает от оси к обечайке и довольно быстро становится ниже напряженности пробоя, вместе с тем (рис 1.4б) существует довольно узкая область коронного разряда. В области коронного разряда электроны ускоряются до скорости, достаточной для того, чтобы при столкновении выбить электрон из молекулы воздуха и тем самым образовать положительный ион и свободный электрон. Если проволока имеет положительный потенциал относительно обечайки, электроны быстро движутся к проволоке, а положительные ионы направляются от неё к трубке в виде униполярного «ионного ветра». Если проволока заряжена отрицательно, положительные ионы движутся к ней, а электроны отталкиваются в направлении обечайки. При наличии электроотрицательного газа, например кислорода, электроны присоединяются к молекулам воздуха и образуют отрицательные ионы, которые движутся к обечайке. Такая система позволяет поддерживать концентрацию ионов $10^{12} – 10^{15}$ шт/м^3 [61] Набор из подобных ячеек используется в нашей работе для ионизации и униполярной зарядки аэрозолей и более подробно описан в Главе 2.

Энергии электронов в области коронного разряда достаточно для образования озона из кислорода. Отрицательная корона образует приблизительно в десять раз больше озона, чем положительная [62]. По этой причине в электростатических осадителях, предназначенных для помещений и систем рециркуляции воздуха, используют положительный коронный разряд. Мы в своей работе использовали в основном положительный коронный разряд, но проводили сравнение эффективности работы системы зарядка – электретный фильтр как с положительной, так и с отрицательной короной (Глава 4).

Для оценки возможности электростатического осаждения частицы необходимо рассчитать максимальное количество зарядов, приобретаемых частицей в ходе зарядки. Количества зарядов можно рассчитать по уравнениям (1.21) и (1.23) Такие данные приводились в работах [63] и [55] и приведены в таблице ниже

Таблица 1.3 Заряд частицы в зависимости от ее размера

Диаметр частицы, мкм	Диффузионная зарядка, n_d	Полевая зарядка, n_f	Сумма $n_d + n_f$	Преобладающий механизм
0,01	0,10	0,02	0,12	диффузионный
0,04	0,79	0,26	1,05	диффузионный
0,10	2,73	1,63	4,36	преимущественно диффузионный
0,40	15,7	26,1	41,8	оба механизма
1,0	47,1	163	210	преимущественно полевой
4,0	237	2 609	2 846	полевой
10	673	16 304	16 977	полевой
40	3 179	260 860	264 039	полевой

Дробное число зарядов означает усредненное по всему ансамблю частиц. Как видно из таблицы 1.4, по мере увеличения размеров частицы диффузионный механизм сменяется полевым. Зная заряд частицы, можно оценить возможность улавливания заряженной частицы в постоянном равномерном электрическом поле пластинчатого осадителя. Предположим, что заряженная частица с dp влетает со скоростью V= 1 м/с посередине в пространство между пластинами расположенными на расстоянии 2 см друг от друга с разностью потенциалов 5 кВ как изображено на рисунке 1.5 ниже

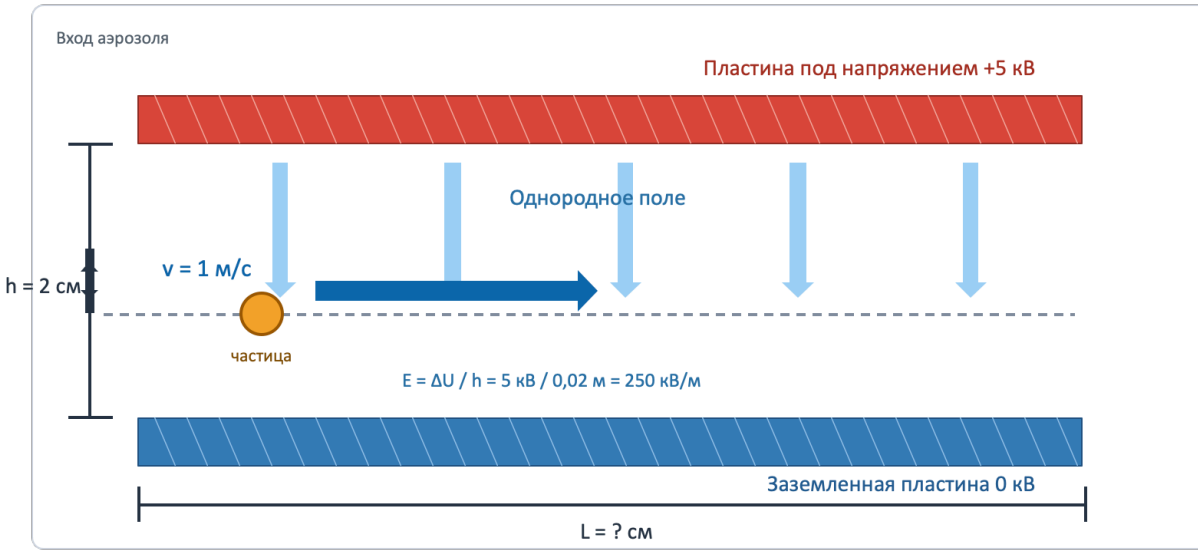


Рис 1.5 Схема электростатического осадителя

Рассчитаем теоретическую длину L осадителя необходимую для улавливания частиц разного размера. Предположим, что отскок отсутствует, и при касании пластины частица считается уловленной. Тогда время дрейфа частицы должно быть меньше, чем, время за которое влетевшая частица покинет пространство осадителя.

Время пребывания частицы в пространстве осадителя

$$t = L/v \quad (1.25)$$

а время дрейфа

$\tau = h/2V_{elec}$ (1.26)

где V_{elec} – скорость дрейфа частиц согласно уравнению (1.17)

Следовательно,

$$\mathrm{L} = \frac{Vh}{2V_{\mathrm{elec}}} = \frac{VH}{2\left(\frac{neEC_c}{3\pi\eta d_p}\right)} = \frac{3\pi\eta d_p VH}{2neEC_c} \quad (1.27)$$

На рисунке 1.6 показано как изменяется теоретическая необходимая длина осадителя в ламинарном потоке в зависимости от размера частицы

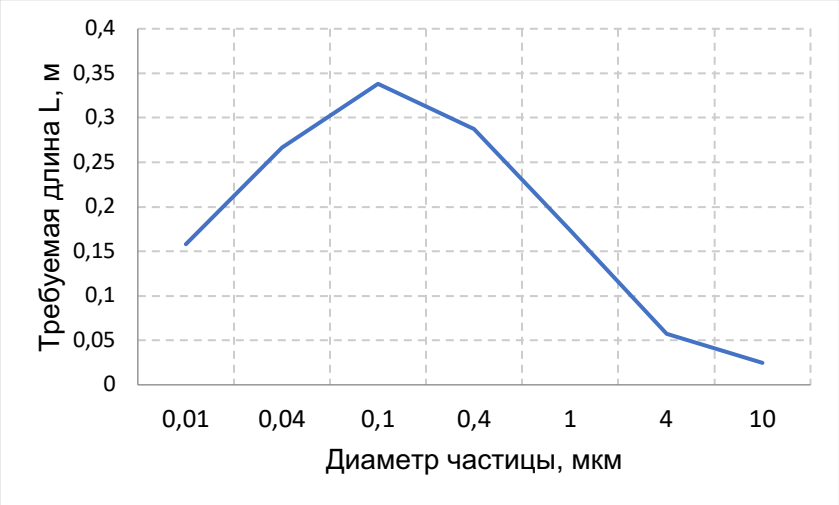


Рис 1.6 Теоретическое длина осадителя с ламинарным потоком воздуха

Как можно видеть, теоретически осадитель обладает небольшой длиной. Если бы течение воздуха через осадитель было бы ламинарным, то такой осадитель такой длины обладал бы 100% эффективностью. Однако на практике такого никогда не наблюдается, поток перемешивается, частицы движутся турбулентно относительно осадителя, и более точно эффективность

улавливания, выраженная долей уловленных частиц, задается уравнением Дойча-Андерсона [55]:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{V_{elec}A}{Q}\right) \text{ (1.28)}$$

где,

Q - поток воздуха м3/с

A – площадь поверхности осадителя, м^2

Пусть осадитель имеет высоту ширину пластины b, тогда площадь сечения такого аппарата будет bh, следовательно площадь осадителя и поток воздуха будут вычисляться следующим образом:

$$A = 2bL, \qquad Q = hbV. \text{ (1.29)}$$

Тогда уравнение Дойча-Андерсона преобразуется в следующее:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{2V_{elec}L}{hV}\right) \text{ (1.29)}$$

На рисунке можно обратить внимание, что кривая зависимости теоретической длины осадителя от диаметра частицы имеет максимум в области 0,1 мкм. Расчет по (1.29) показывает, что при L=0,35 м эффективность улавливания таких частиц составит всего 63,2 %. Это свидетельствует о том, что для реального применения нужны осадители существенно большего размера. Например, высокоэффективный фильтры, очищающие воздух по классу H13 имеют эффективность 99,95%, то есть $\eta = 0{,}9995$. Преобразовывая (1.29), получаем расчет необходимой длины осадителя:

$$L = \frac{Vh}{2V_{elec}} \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right) \text{ (1.30)}$$

В таком случае осадитель будет иметь длину не менее L=2,5 м. Если такие осадители будут иметь h =0,5 м и будут иметь набор из 25 пластин с попеременно чередующейся полярностью с зазором 2 см, то такое устройство

будет очищать поток воздуха 900 $м^3$/ч. При этом если пластины изготовлены из стали толщиной 1 мм, то общий вес конструкции как будет составлять не менее 243 кг (произведение количества пластин, площади одной пластины, толщины одной пластины и плотности стали 7800 кг/$м^3$).

Для сравнения стандартный HEPA H13 фильтр на такую производительность выбирается исходя из скорости набегающего потока 0,45 м/с и имеет сечение 0,7*0,7 м и длину не более 200 мм. [64], а вес его вместе с обечайкой и креплением к воздуховодам не превышает пары десятков килограммов.

Очевидно, что для задач тонкой очистки воздуха от субмикронных аэрозолей метод электростатического осаждения не подходит, особенно если речь идет о доочистке после предварительной очистки на грубых фильтрах. Тем не менее, он обладает рядом преимуществ, а именно:

- чрезвычайно низкое сопротивление воздушному потоку (практически нулевое)
- при наличии механизмов удаления пыли с осадителей – неограниченная пылеемкость

Поэтому применяется для очистки воздушных потоках при массовой концентрации порядка десятков г/$м^3$. [65]

1.11 Улавливание аэрозолей фильтрами

На сегодняшний день наиболее популярным методом улавливания аэрозолей для задач очистки воздуха, а также отбора проб аэрозолей является фильтрация. В качестве фильтров применяются либо волокнистые фильтры, либо пористые мембранные фильтры. Важнейшей характеристикой фильтра является эффективность, которая может определяться либо по массе, либо по количеству уловленных частиц:

$$E = \frac{N_{\text{in}} - N_{\text{out}}}{N_{\text{in}}} \text{ (1.31)}$$

$$E_m = \frac{C_{\text{in}} - C_{\text{out}}}{C_{\text{in}}} \text{ (1.32)}$$

Где

C_{in}, C_{out} – массовая концентрация частиц до и после фильтра (мг/м3)

N_{in}, N_{out} – счетная концентрация частиц до и после фильтра (1/м3 или 1/см3)

В настоящей работе используется счетная концентрация, поскольку именно по счетной концентрации производится оценка качества воздуха в чистых помещениях [5]

Наряду с эффективностью часто используется обратная величина – проскок, определяемая как:

$$P = \frac{N_{\text{out}}}{N_{\text{in}}} = 1 - E \text{ (1.33)}$$

Данная величина является более информативной при сравнении различных фильтров: например, два разных фильтра с эффективностью 99 и 99,9 % отличаются по проскоку в 10 раз, а по эффективности -на 0,9%.

Материал, из которого изготовлен фильтр характеризуется плотностью упаковки α или обратной ей величиной – пористостью ε, которые находятся в следующих соотношениях

$$\alpha = \frac{V_{\text{волокон}}}{V_{\text{фильтра}}} = 1 - \varepsilon \text{ (1.34)}$$

$V_{\text{фильтра}}$, и $V_{\text{волокон}}$ – объемы, занимаемые фильтром целиком и его волокнами соответственно.

Для волокнистых фильтров величина пористости как правило лежит в диапазоне от 70% до свыше 99% . У мембранных она как правило меньше – от 50 до 90 %

Структура фильтра создаёт сопротивление проходящему через него воздушному потоку, которое характеризуется **перепадом давления** Δp.

При постоянной скорости фильтрации (или скорости набегающего потока на фильтр) перепад давления на фильтре прямо пропорционален его толщине. Так, удвоение толщины с точки зрения сопротивления воздушного потока равносильно последовательной установке двух одинаковых фильтров и потому сопротивление такого фильтра удваивается. Перепад давления влияет на энергопотребление и на электрическую мощность необходимую для прокачивания воздуха через фильтр [66]:

$$N_{\text{эл}} = \frac{\Delta p\, Q}{\eta_{\text{вент}}} \quad (1.35)$$

где:

- $N_{\text{эл}}$— потребляемая электрическая мощность вентилятора, Вт;
- Δp—перепад давления на фильтре, Па;
- Q— объёмный расход воздуха, $\text{м}^3/\text{с}$;
- $\eta_{\text{вент}}$— КПД вентилятора в долях единицы (произведение механического кпд вентилятора и кпд электродвигателя)

Из формулы следует, что затрачиваемая энергия, а следовательно, и операционные расходы на вентиляцию и очистку воздуха прямо пропорциональны перепаду давления, поэтому при расчете и проектировании фильтрующих систем стараются его минимизировать, однако при этом необходимо обеспечивать требуемую эффективность

Полезной характеристикой позволяющей оценить как эффективность, так и перепад давления является *качество фильтра* q_F [55]:

$$q_F = \frac{\ln(1/P)}{\Delta p} \quad (1.36)$$

1.12 Механизмы фильтрации аэрозолей

Выделяют следующие механизмы фильтрации аэрозолей:

1) Импакция
2) Перехват
3) Диффузия
4) Седиментация (гравитационное осаждение)
5) Электростатический механизм

Первые 4 механизма относятся к так называемой механической фильтрацией. Ранее мы показывали, что седиментацией для субмикронных частиц можно пренебречь, поэтому эффективность одиночного волокна для гравитационного осаждения E_G мы рассматривать не будем. Малые частицы преимущественно улавливаются диффузией, крупные - перехватом и импакцией, поэтому между этими областями возникает минимум эффективности.

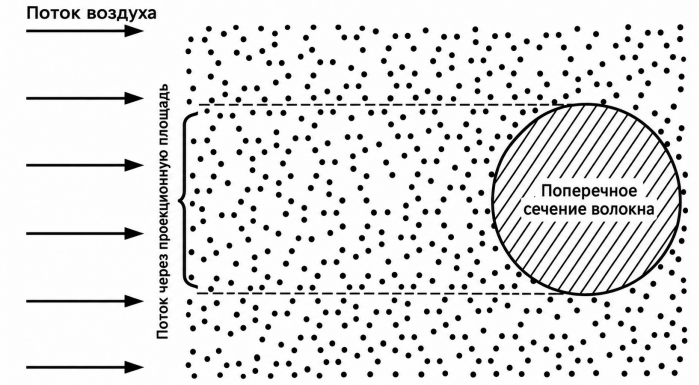


Рис 1.7 Модель одиночного волокна

При изучении вышеперечисленных механизмов улавливания аэрозолей рассматривают модель одиночного волокна (рис 1.7), то есть как частицы улавливаются ячейкой пространства с одним волокном.

Эффективность одиночного волокна EΣ - отношение числа частиц, осевших на единице длины волокна, к числу частиц, которые геометрически пересекли бы проекцию этого волокна.

Эффективность единичного волокна связана с проскоком фильтра следующей формулой [55]:

$$P = 1 - E = \exp(-\frac{4\alpha E_{\Sigma} t}{\pi d_f}) \quad (1.37)$$

Где

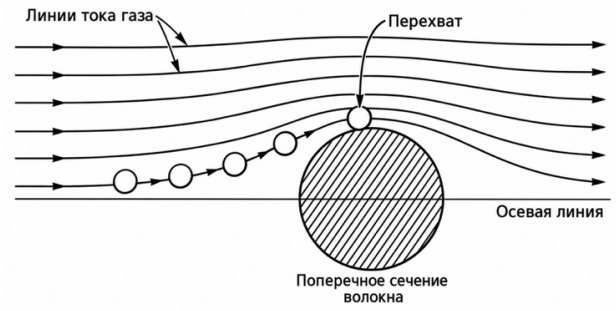
d_f - диаметр волокна,

t - толщина фильтра

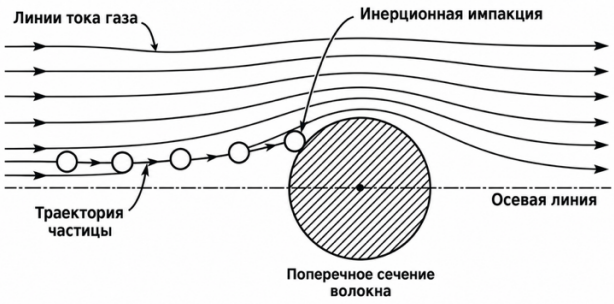
Формула показывает, что увеличение толщины и плотности упаковки снижает проскок, а влияние каждого механизма обуславливается EΣ.

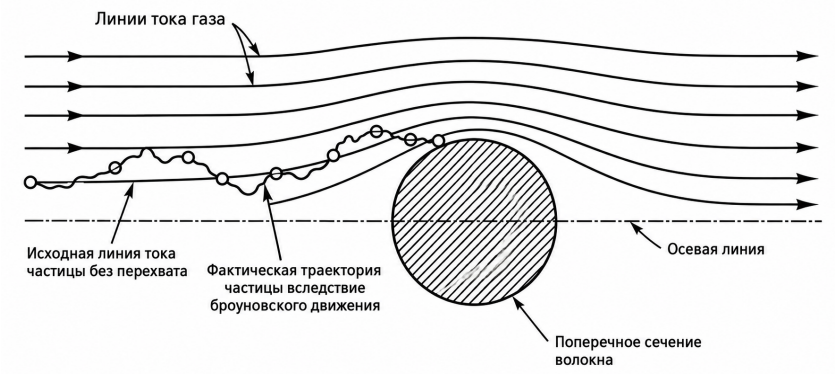
Механические способы улавливания частицы волокном схематически изображены на рисунке 1.8

а



б





в

Рис 1.8 Схематическое изображение механизмов улавливания частиц. а) перехват; б) импакция; в) диффузия

Перехват

При перехвате центр частицы следует линии тока, но конечный радиус частицы приводит к касанию волокна (рис 1.8а).

Это единственный из пяти механизмов, который согласно модели не требует отклонения частицы от исходной линии тока и не зависит от набегающей скорости. Вклад механизма перехвата в эффективность улавливания определяется величиной R [55].

$$R = \frac{d_p}{d_f}, (1.38)$$

А сама эффективность может быть оценена по уравнению ниже:

$$E_R = \frac{(1-\alpha)R^2}{\mathrm{Ku}(1+R)} (1.39)$$

Где Ku – гидродинамический фактор (или фактор Кувабары) определяющий влияние соседних волокон на течение воздушного потока:

$$\mathrm{Ku} = -\frac{\ln \alpha}{2} - \frac{3}{4} + \alpha - \frac{\alpha^2}{4} (1.40)$$

Эффективность перехвата возрастает с R, то есть при увеличении частицы или уменьшении диаметра волокна.

Инерционный захват или импакция

Частица с заметной инерцией не успевает огибать волокно вместе с резко искривляющимися линиями тока, пересекает их и ударяется о поверхность (рис 1.8б)

Вклад этого механизма определяется числом Стокса.

$$E_I = \frac{\mathrm{Stk}\, J}{2\mathrm{Ku}^2} \quad (1.41)$$

Где J – коэффициент, зависящий от α и R, при R<0,4 согласно [67]

$$J = (29.6 - 28\alpha^{0.62})R^2 - 27.5R^{2.8}, \quad R < 0.4 \quad (1.42)$$

Для R > 0,4 в [55] предлагается в приближенном расчете принимать J ≈ 2.

Диффузионный захват частиц

Броуновского движения мелких частиц достаточно для существенного повышения вероятности их столкновения с волокном при движении мимо него вдоль линии тока, которая сама по себе не приводит к касанию. Траектория одной такой частицы показана на рисунке 1.8в

Эффективность одиночного волокна при диффузионном улавливании E_D является функцией числа Пекле:

$$E_D = 2\mathrm{Pe}^{-2/3} \quad (1.43)$$

Помимо чисто диффузного улавливания также выделяют механизм перехвата за счет диффузии и вклад его в эффективность одиночного волокна можно оценить следующим образом:

$$E_{DR} = \frac{1.24R^{2/3}}{(\mathrm{Ku}\,\mathrm{Pe})^{1/2}} \quad (1.44)$$

Чем меньше Pe, тем эффективнее диффузионное осаждение. Поэтому диффузия - единственный из рассмотренных механизмов, эффективность которого возрастает при уменьшении диаметра частицы.

Совместное действие механизмов

Если механизмы действуют независимо и каждая частная эффективность меньше единицы, механические составляющие объединяют вероятностно [55]:

$$E_{\Sigma} = 1 - (1 - E_R)(1 - E_I)(1 - E_D)(1 - E_{DR})(1 - E_G) \quad (1.45)$$

В реальном фильтре волокна неодинаковы по размерам и расположены не только перпендикулярно направлению потока, пористость также неравномерна. Тем не менее оценка E_{Σ} и P по уравнению в случае механического улавливания для частиц различного размера полезна, и мы далее воспользуемся ею в Главе 4 для оценки механической эффективности полипропиленовых фильтров, применяемых в настоящей работе.

Ниже приведен расчет вклада каждого механизма и общая эффективность улавливания частиц в диапазоне 0,01 до 10 мкм для стеклобумажного фильтровального материала согласно работе [55]

Таблица 1.4 Расчет вкладов различных механизмов

d_p мкм	E_R	E_I	E_D	E_{DR}	E_G	E_Σ	Общая эффективность фильтра, %
0,01	0,000	0,000	0,840	0,020	0,000	0,861	100,0
0,02	0,000	0,000	0,339	0,016	0,000	0,356	100,0
0,05	0,001	0,000	0,106	0,013	0,000	0,119	97,7
0,10	0,003	0,000	0,046	0,011	0,000	0,059	84,9
0,20	**0,010**	**0,002**	**0,021**	**0,010**	**0,000**	**0,043**	**74,3**
0,50	0,055	0,034	0,009	0,009	0,000	0,108	96,8
1,00	0,183	0,238	0,005	0,010	0,001	0,437	100,0
2,00	0,550	0,887	0,003	0,011	0,003	1,454	100,0
5,00	1,965	3,500	0,002	0,012	0,027	3,500	100,0
10,00	4,585	6,000	0,001	0,014	0,183	6,000	100,0

Как можно видеть из приведенного расчета вклад таких составляющих как импакция EI и перехват ER растет с ростом размера частиц, а вклад диффузионного ED захвата наоборот – падает с ростом размера частиц, при этом вклад совместного механизма $\mathbf{E_{DR}}$ проходит через минимум. Общая эффективность фильтра имеет минимум в области 0,2 мкм. Частицы, для которых наблюдается минимум эффективности называются наиболее проникающими или MPPS (most-penetrating-partice-size). Согласно [6] эффективность фильтра или фильтрующего материала необходимо оценивать именно по таким частицам.

Современные коммерчески доступные стекловолоконные материалы позволяют добиваться высоких эффективностей, однако обладают существенным сопротивлением воздушному потоку, ниже продемонстрированы типичные значения Эффективности, перепада давления

и рассчитанные исходя из этого факторы качества для коммерчески доступных фильтровальных материалов [68]

Таблица 1.5 Эксплуатационные характеристики фильтров из стеклобумаги

Показатель	Guangzhou Clean Link (Guangzhou, 2022)	Hebei Amusen (Hebei Amusen, 2022)	Shandong Renfeng (Shandong Renfeng, 2022)	Hebei Fangyu (Hebei Fangyu, 2022)	CHMLAB (CHMLAB Group, 2022)
Эффективность при скорости 5,3 см/с, %	99,993	99,995	99,998	99,995	99,995
Аэродинамическое сопротивление при скорости 5,3 см/с, Па	380	390	372	420	450
Аэродинамическое сопротивление при скорости 1 см/с, Па	71	74	70	79	85
Толщина, мм	0,50	0,35	0,40	0,33	0,35
Проскок P, %	0,007	0,005	0,002	0,005	0,005
Фактор качества qF, $Па^{-1}$	0,0252	0,0254	0,0291	0,0236	0,0220

Как можно видеть из таблицы, из-за высокого сопротивления фактор качества лежит в диапазоне от 0,022 до 0,0291, и это при скорости 5,3 см/с. Поскольку скорость в воздуховоде составляет 2-7 м/с (то есть на 2 порядка больше), для того чтобы HEPA фильтры обладали приемлемым сопротивлением и сам корпус фильтра был сравнимых с воздуховодов габаритов, фильтровальный материал гофрируют с образованием многочисленных складок (рис 1.9), так чтобы набегающая скорость на материал была около значений, приведенных в таблице.

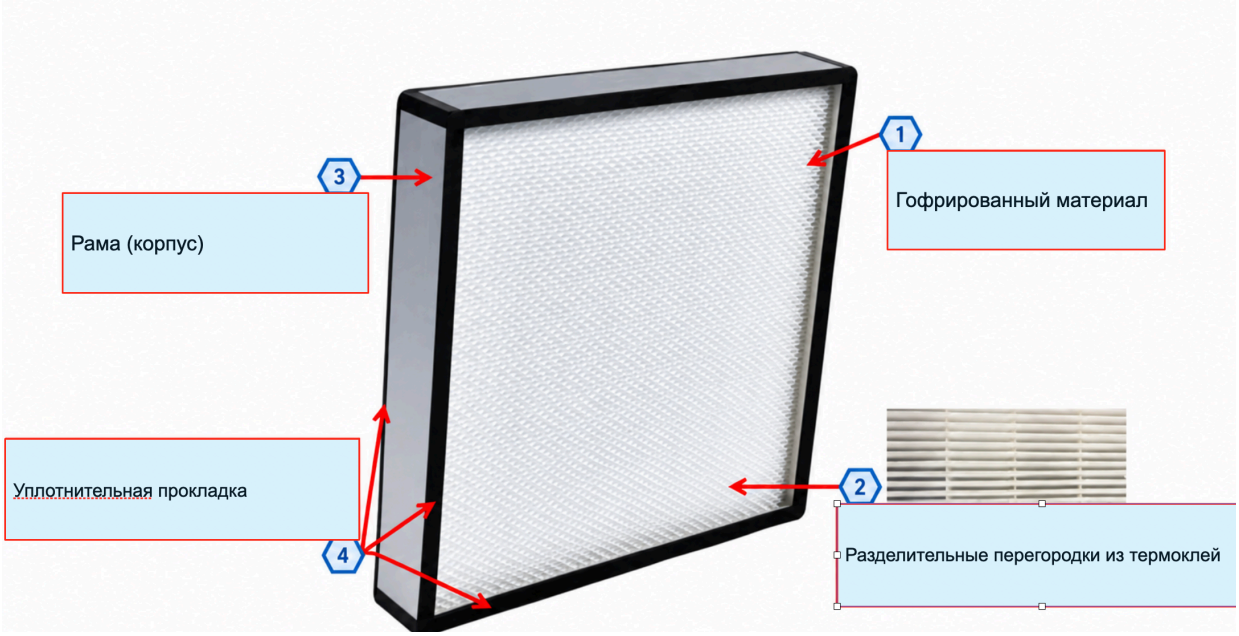


Рис 1.9 HEPA-фильтр

Ранее мы оценивали воздействие электростатических сил на частицу. Помимо промышленных электростатических осадителей такие силы находят свое применение и в волокнистых фильтрах.

Сопротивление фильтрующего материала Δp линейно зависит от скорости набегающего потока U_0 [55]:

$$\Delta p = \frac{\eta U_0 f(\alpha)}{d_f^2}, \qquad (1.46)$$

и

$$f(\alpha) = 64\alpha^{1.5}(1 + 56\alpha^3), \qquad 0.006 < \alpha < 0.3 \quad (1.47)$$

Поэтому зачастую рассматривают величину сопротивления, приведенную к скорости потока, так в таблице 1.7 выше мы привели также сопротивление материала, приведенное к 1 см/с.

Ранее мы оценивали воздействие электростатических сил на частицу, и нашли что они могут быть значительными. Помимо применения в промышленных электростатических осадителях они могут оказывать

существенное влияние на эффективность фильтрации в волокнистых фильтрах.

1.13 Электростатическое улавливание аэрозолей волокнистыми фильтрами

В 1930 годы при попытке генерации аэрозоля из заряженного раствора нитрата целлюлозы группа советских ученых (И.В. Петрянов, Н.Д. Розенблюм и Н.А. Фукс) лаборатории аэрозолей НИФХИ им. Л.Я. Карпова получила тонкие волокна. Это положило начало внедрению и производству фильтров по технологии электроформования, более известных как фильтры Петрянова (ФП) [69], [70]. Волокнистые фильтры Петрянова в Советском Союзе нашли свое применение в средствах индивидуальной защиты органов дыхания («лепесток»), в фильтрах для отбора проб аэрозолей, в качестве материала для установок очистки воздуха в горно-шахтной отрасли, в атомной промышленности, в медицинских учреждениях. [71]

Важно отметить, что электроформование служит прежде всего для получения тонких волокон из полимерных материалов. Однако его побочным эффектном является то, что волокна в процессе изготовления приобретают заряд, в результате чего электростатические силы взаимодействия заряженного волокна и незаряженной частицы имеют место быть. Заряд, удерживаемый волокнами, зависит от материала волокна. Так в работе [72] изучали улавливание шахтной пыли уранового рудника и короткоживущих продуктов распада радона при помощи волокнистых фильтров ФП изготовленных из перхлорвинила, ацетилцелюллозы и полистирола (ФПП, ФПА и ФПС соответсвенно). Волокна этих фильтров имели сравнимые диаметры (1,5 – 2,5 мкм), их испытывали при одинаковых условиях, однако волокна в ФПС и ФПП были несмачиваемы, а ФПА – смачиваемые,. ФПА

быстро терял заряд после формования, а ФПС и ФПП могли оставаться долго в заряженном состоянии. Прямое сравнение разряженного ФПА и свежеизготовленного ФПП показало, что в одинаковых условиях (U_0 = 2 см/с) фильтр ФПП давал эффективность 99,9 %, в то время как ФПА только 50%. При этом структурно фильтры были идентичны (d_f=1,45 и 1,5 мкм для ФПА и ФПП соответственно) и имели при испытательной скорости равное сопротивление в 0,4 мм вод ст или 4 Па. То есть благодаря электростатическим силам многократно повышалась эффективность фильтрации при неизменном сопротивлении воздушного потока. В [73] приводятся следующие показатели эффективности, к которым мы добавили расчет коэффициента качества:

Таблица 1.6 Требования к фильтрам ФП при заводской приемке

Материал	Проскок начальный	Эффективность, %	Перепад давления при 1 см/с	Рассчитанный QF, $Па^{-1}$
ФПП-15-1,5	≤0,01%	≥99,99%	около 14,7 Па	≥0,63
ФПП-15-1,0	≤0,08%	≥99,92%	около 9,8 Па	≥0,73
ФПП-15-0,8	≤0,30%	≥99,70%	около 7,8 Па	≥0,74
ФПП-15-0,6	≤0,50%	≥99,50%	около 5,9 Па	≥0,90

Из рассчитанного QF видно, что для ФП эта величина на порядок превосходит ту, которую мы ранее рассчитали для HEPA-фильтров.

Тем не менее, необходимо отметить, что в ранних работах эффективность определяли нефелометрически (по рассеянию света лампы в видимой области), а распределение частиц по размерам изучали заранее, проводя седиментацию на предметное стекло и оптическое

микроскопирование. То есть, область нанометровых аэрозолей эти измерения не охватывали.

В зарубежной литературе фильтры, обладающие зарядом, называют *электретными*. В работе [74] проводили прямое сравнение HEPA- и электретных фильтров. Важно отметить, что в данной работе использовали современное аналитическое оборудование, например классификатор частиц по подвижности с конденсационным счетчиком частиц TSI 8160 позволяющий измерять частицы в диапазоне от 15 до 400 нм. Проводя эксперименты на аэрозоле NaCl, авторы обнаружили что HEPA и электретные фильтры имеют разные размеры наиболее проникающих частиц (MPPS), причем для электретных фильтров наиболее проникающие частицы обладают меньшим размером.

Таблица 1.7 Сравнение HEPA и электретных фильтров

Фильтрующий материал	Тип материала	MPPS, нм	Эфф-ть при MPPS η, %	Сопротивление, Па	QF_{MPPS}, $\mathrm{Па^{-1}}$
Fiberglass HD-2583	Незаряженное стекловолокно	≈162	≈93,5	110,8	≈0,0247
Electret 1	Полипропиленовый электрет, заряд ≈ 118 мкКл/м²	≈48,5	≈95,5	20,6	≈0,151
Electret 2	Полипропиленовый электрет, заряд ≈ 25 мкКл/м²	≈48,5	≈87	20,6	≈0,0990

Расчет фактора качества по MPPS QF_{MPPS} (таблица 1.7) показывает, что электретные фильтры обладают лучшими характеристиками, причем заряд оказывает существенное влияние на эффективность.

Несмотря на выдающиеся показатели QF электретные фильтры обладают существенным недостатком – волокна фильтра с течением времени утрачивают заряд, а эффективность падает. Это отмечалось как для отечественных фильтров ФП [69], так и для электретных фильтров зарубежными исследователями [75], [76], [77], [78].

Сообщалось, что снижению эффективности способствует обработка каплями органических растворителей [79], выдерживание в изопропаноле [80, 81] улавливание частиц неполярных жидкостей (масла) [82], а также выдерживание в условиях высокой температуры (120°C) и влажности (>90%) [83].

Стоит отметить, что улавливание частиц может не только уменьшать эффективность, но и увеличивать ее. Так в работе [82] приводится пример, что при улавливании частиц масла электретными фильтрами эффективность падает, по заявлению авторов из-за растекания капель масла по волокнам и ослаблении электрического поля волокна. В то же время при улавливании частиц железистых квасцов эффективность со временем начинает расти, что авторы связывают с увеличением вклада механизма перехвата в виду образовавшихся на волокнах агрегатов уловленных частиц.

Примечательно, что влияние влажности на фактор качества в случае эксплуатации при комнатной температуре сильно зависит от материала, из которого сделан электретный фильтр. Так, в работе [76] было показано, что для фильтров, изготовленных из полиакрилонитрила PAN и PVDF выдерживание во влажном воздухе существенно снижает фактор качества, в то время как фильтры, изготовленные из полипропилена (PP), практически не изменяются (рисунок 1.10)

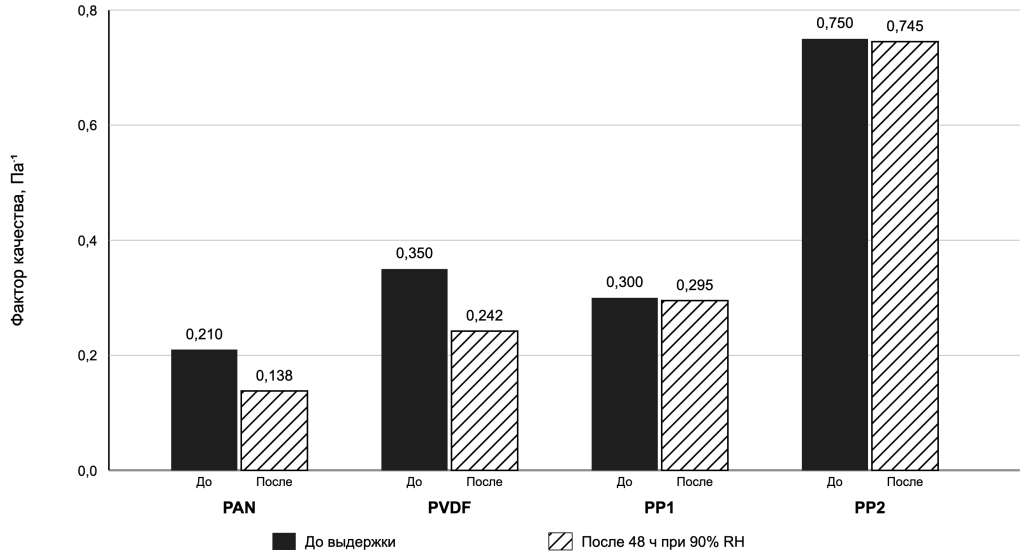


Рис 1.10 Влияние обработки высокой температурой и влажностью электретных волокон из различных материалов

Необходимо отметить, что согласно [76] снижение эффективности коррелирует с падением потенциала на фильтре, что не может не говорить о превалирующем действии электростатических сил на эффективность улавливания аэрозолей такого рода фильтрами. Мы в своей работе используем именно полипропилен в качестве материала для изготовления фильтров.

В работе [79] изучали как изменяется способность электретного фильтра улавливать нанометровые аэрозоли NaCl в зависимости от предварительной обработки аэрозолем водноспиртовой смесью с различной концентрацией этанола. При этом контролировали потенциал фильтра при помощи электростатического киловольтметра. Для измерения потенциала использовался бесконтактный зонд, устанавливавшийся на расстоянии 2 см от фильтра. Поверхностный потенциал необработанного фильтра составлял около −2,7 кВ. С увеличением концентрации этанола он последовательно уменьшался; после воздействия капель 100%-го этанола — до −0,23 кВ. Таким

образом, модуль потенциала снизился приблизительно на 91,5%. При быстром высушивании обработанного фильтра наблюдалось ещё более полное разряжение: от −2,62 до −0,11 кВ. Как можно видеть на рисунке 1.11, после обработки этанолом эффективность также снизилась

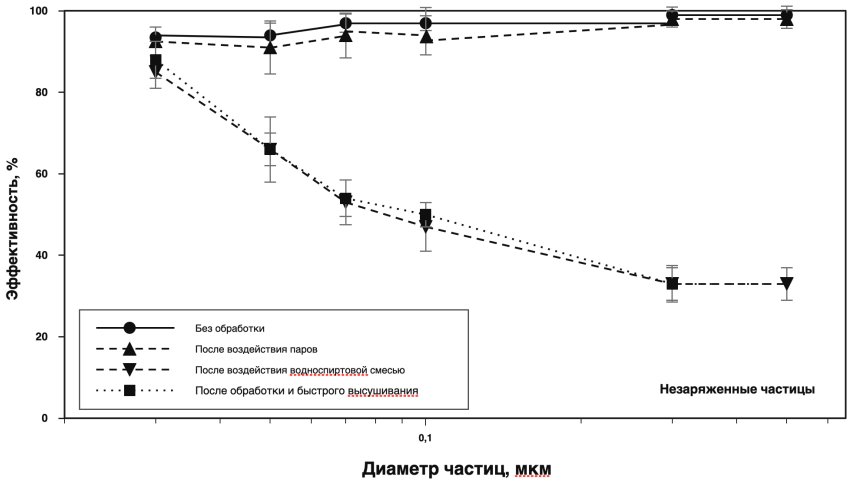


Рис 1.11 Влияние обработки каплями водноспиртовой смеси и парами этанола на эффективность электретных фильтров

MPPS сместился в сторону более крупных частиц: от 80-100 нм у исходного и слабо обработанного электретного материала до диапазона 100-200 нм, то есть в область типичную для волоконных механических фильтров. Необходимо отметить, что обработка фильтра аэрозолем водноспиртовой смеси не повлияла на его аэродинамическое сопротивление.

В работе [80] также изучали влияние заряда фильтра на проскок частиц ДОФ (диоктилфталата) на примере фильтрующих электретных материалов для защиты органов дыхания. Показано, что при снятии заряда с фильтра при помощи обработки жидкого изопропанола существенно растет проскок частиц с менее 10% до более 40%, также на графике (рис 1.12) можно наблюдать, что в случае заряженных фильтров максимум проскока наблюдается в области 0,08 мкм, а в случае разряженных -0,25-03 мкм.

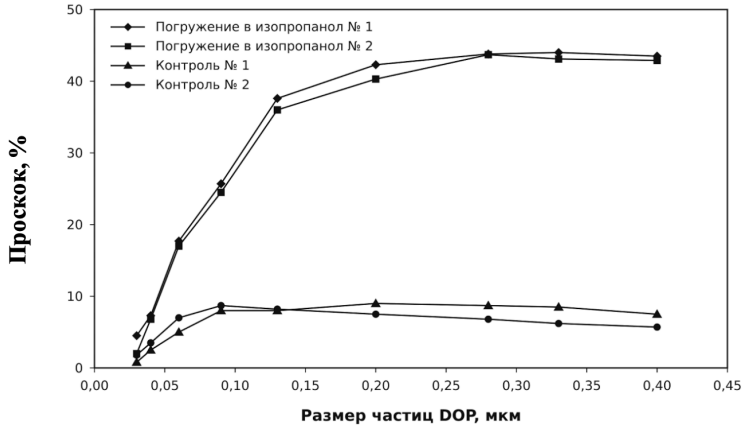


Рис 1.12 Влияние обработки изопропанола на эффективность

В работе [84] также подтверждается смещение MPPS при улавливании частиц KCl или Al_2O_3. Авторы наблюдали, что сперва эффективность падала и MPPS рос с 34 до 305 нм, а при дальнейшем нагружения фильтра частицами вновь происходил небольшой рост эффективности, что авторы связывают с образованием дендритных структур на поверхности фильтра. Важным открытием в этой работ является то, что увеличения эффективности за счет роста дендритов в случае аэрозоля KCl не происходило при влажности воздуха свыше 70%, в то время как прирост эффективности на аэрозоле Al_2O_3 наблюдался во всем диапазоне влажности. То есть гигроскопичность аэрозолей играет важную роль в фильтрах такого рода.

В нашей стране проводили длительные промышленные испытания, где сравнивались фильтрующие установки на основе ФП и стекловолоконные HEPA фильтры. [85]. Было отмечено, что несмотря на высокую изначальную эффективность у обоих фильтров, спустя 1,5 года фильтры ФП сильно снизили свою эффективность относительно HEPA-фильтров.

Вышеописанные примеры показывают, что использование электростатических сил в случае однократно заряженного волокна при электроформовке возможно в случае, если не требуется долгий срок службы фильтрующего материала или не ожидается длительная нагрузка аэрозолями, но при этом требуется высокая эффективность при минимальном перепаде давления. Поэтому такие материалы нашли широкое применение в средствах индивидуальной защиты, в то время как в фильтрующих системах в вентиляции фильтрующие материалы на основе волокон, проявляющих электретные свойства применяются, но прежде всего как механические фильтры.

Сообщение заряда волокну при электроформовке – не единственный способ вовлечения электростатических сил в механизм фильтрации.

Таблица 1.8 Зависимость силы взаимодействия от расстояния для разных механизмов

Механизм	**Зависимость силы от расстояния**
Заряженная частица – заряженное волокно	$F \sim r^{-1}$
Поляризация частицы заряженным волокном	$F \sim r^{-3}$
Взаимодействие заряженной частицы с незаряженным волокном*	$F \sim x^{-2}$
Ван-дер-Ваальсово взаимодействие между частицей и волокном*	$F \sim x^{-4}$

* x – расстояние от заряженной частицы до «плоскости» волокна, поскольку рассматривается волокно диаметром много больше размера частицы

Так, наш соотечественник [86] в одной из ранних работ, посвящённой модельному взаимодействию частицы и цилиндра, показал, что при различных

сценариях взаимодействия частицы и волокна, сила действующая на частицу и отклоняющая ее от линий тока воздуха по разному зависит от расстояния r (или *x*) от частицы до волокна (таблица 1.8).

Для нас с практической точки важно отметить, что если к заряженному волокну подлетает частица, несущая заряд, то такое взаимодействие имеет наиболее дальний порядок, а следовательно, выше шанс, что частица отклонится от линии тока воздуха и будет уловлена фильтрующей системой.

Экспериментальное подтверждение этому предположению было сделано в работе [87]. Были протестированы на предмет проскока наноаэрозолей NaCl электретные материалы в заряженном состоянии, в состоянии со снятым зарядом, а также в случае одноименно заряженного и незаряженного аэрозоля. На рисунке 1.13 показано, что система, состоящая из заряженного волокна и заряженного аэрозоля, продемонстрировала наименьший проскок.

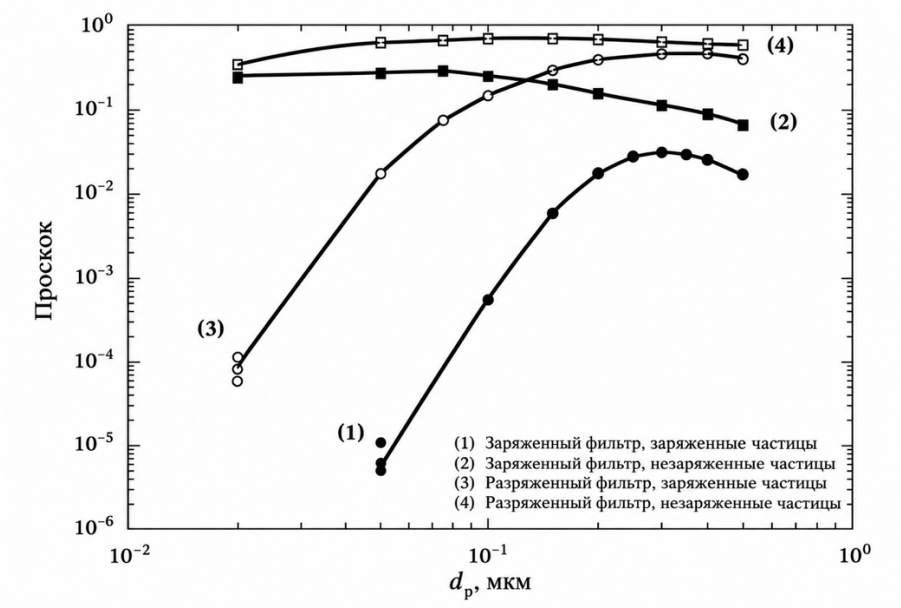


Рис 1.13 Зависимость проскока от размера частиц в зависимости зарядового состояния частиц и волокна

Примечательно, что кривые 2 и 3 пересекаются, то есть существует область размеров частиц, где взаимодействие заряженной частицы с волокном оказывается сильнее, чем взаимодействии при поляризации волокном частицы. Авторы сообщают что доподлинно распределение зарядов на заряженном фильтре неизвестно, однако указывают, что у фильтров присутствуют как положительно, так и отрицательно заряженные участки. В статье предполагается, что взаимодействие частицы и волокна сводится к притяжению заряженной частицы к участку волокна противоположного знака. Также, авторы не уточняют каким знаком именно были заряжены частицы и самое главное, не указывают как изменяется заряд фильтра с течением времени при улавливании предварительно униполярно заряженных частиц.

Как мы показали в своих работах [51] накопление заряженных частиц может критическим образом влиять на их проскок. В работе [88] также изучалось влияние запыленности электретных фильтров на эффективность улавливания аэрозолей NaCl в зависимости от размера частиц. Примечательно что эта зависимость и для униполярно заряженных и для нейтральных аэрозолей проходила через минимум. Авторы связывают это с первичным экранированием поля волокна, в результате чего эффективность падала и с дальнейшим ростом дендритов из осажденных частиц, приводившим к росту эффективности. Важно отметить, что для униполярно заряженных аэрозолей минимальная эффективность во всем диапазоне размеров частиц была выше, чем для нейтральных (Таблица 1.9)

Таблица 1.9 Повышение эффективности при улавливании заряженных частиц относительно эффективности по незаряженным

Диаметр частиц, нм	Повышение минимальной эффективности, % от изначальной
50	31,4
80	27,1
100	26,5
200	22,2
300	18,2
500	11,9

Важно отметить, что вопрос накопления и стока заряда с фильтра в данной статье не рассматривался, хотя с точки зрения техники он весьма важен. Ранее мы упоминали, что напряжение пробоя в воздухе составляет величину порядка $1{,}57*10^7$ В/м (157 кВ/см). По расчетным оценкам [87] величина напряженности поля на поверхности волокна электретного фильтра составляет величину порядка 10^5 В/м. Далее в главе 4 будут подробно описаны результаты нашей работы по измерению локального потенциала фильтра и общего заряда фильтра и влиянию этих величин на эксплуатационные характеристики фильтра.

В целом можно сказать, что целый ряд работ в последнее время посвящен предварительной униполярной зарядке как способу уменьшению падения эффективности элетретных фильтров по мере запыления [89, 90, 91, 92]. В работе [90] изучалась комбинированая система, состоящая из предварительной униполярной зарядки и электретного фильтра. Причем сток заряда был организован с помощью металлической сетки, расположенной за фильтром по ходу движения воздуха. В качестве фильтра использовался гофрированный полипропиленовый нетканный материал, скрученный в рулон. Интересно, что авторы наблюдали высокую эффективность по

нанометровому аэрозолю, NaCl как на исходном, заряженном при изготовлении электрете, так и на разряженном, если частицы предварительно были заряжены. Более того авторы сообщали, что разряженный фильтр приобретает заряд в ходе улавливания частицы. Это хорошо согласуется с данными из наших работ [51, 50].

Вместе с тем стоит отметить, что в современной литературе недостаточно освящены такие вопросы, как связь проскока с суммарным зарядом фильтра и распределением локального потенциала, что на наш взгляд является ключевым для понимания механизмов работы такого рода фильтрации аэрозолей и дает возможность сконструировать более совершенные пылеулавливающие аппараты. Помимо этого, в виду практической работы мы посвятили большую часть исследований технологическим особенностям изготовления полипропиленовых диэлектрических фильтров и связи технологических и эксплуатационных характеристик фильтров.

Глава 2. Экспериментальные стенды и методы измерения

2.1 Установка изготовления фильтров

В качестве фильтров использовались цилиндрические фильтры, изготовленные из полипропилена методом раздува расплава (melt-blow). Этот метод применяется давно: первые работы относятся к середине 1950-х годов годы [93] и в 1970-х он был запатентован и в промышленность, и к настоящему моменту широко распространен для производства нетканых фильтров. Суть метода заключается в расплавлении полипропилена и раздува расплава сжатым горячим воздухом с последующей намоткой на коллектор, который в нашем случае выполняет вращающаяся шпуля. На рисунке 2.1 изображены фотографии станка для изготовления фильтров:

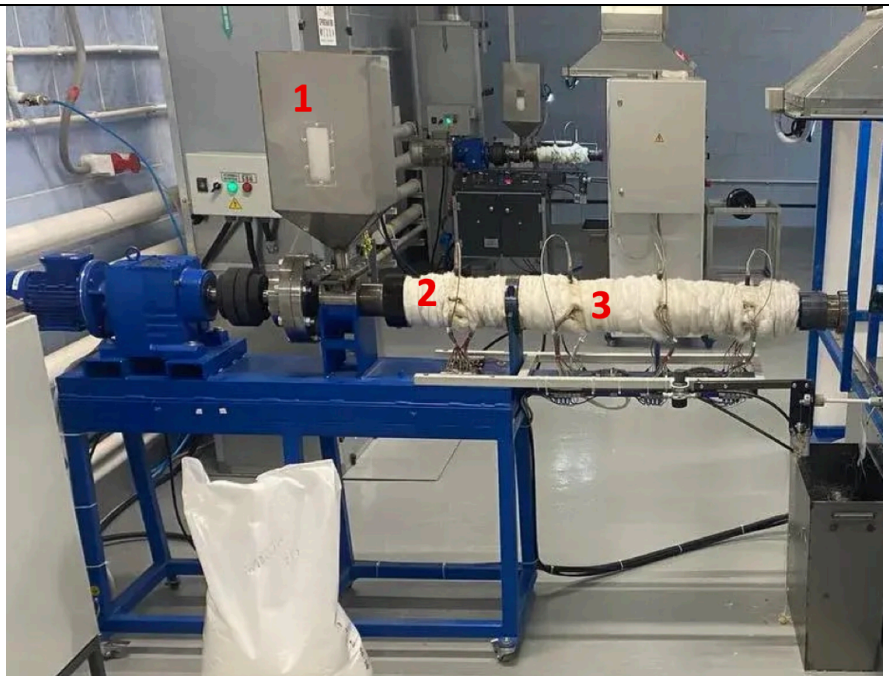


Рисунок 2.1 а) Бункер (1), шнек экструдера (2), Зона нагрева (3),

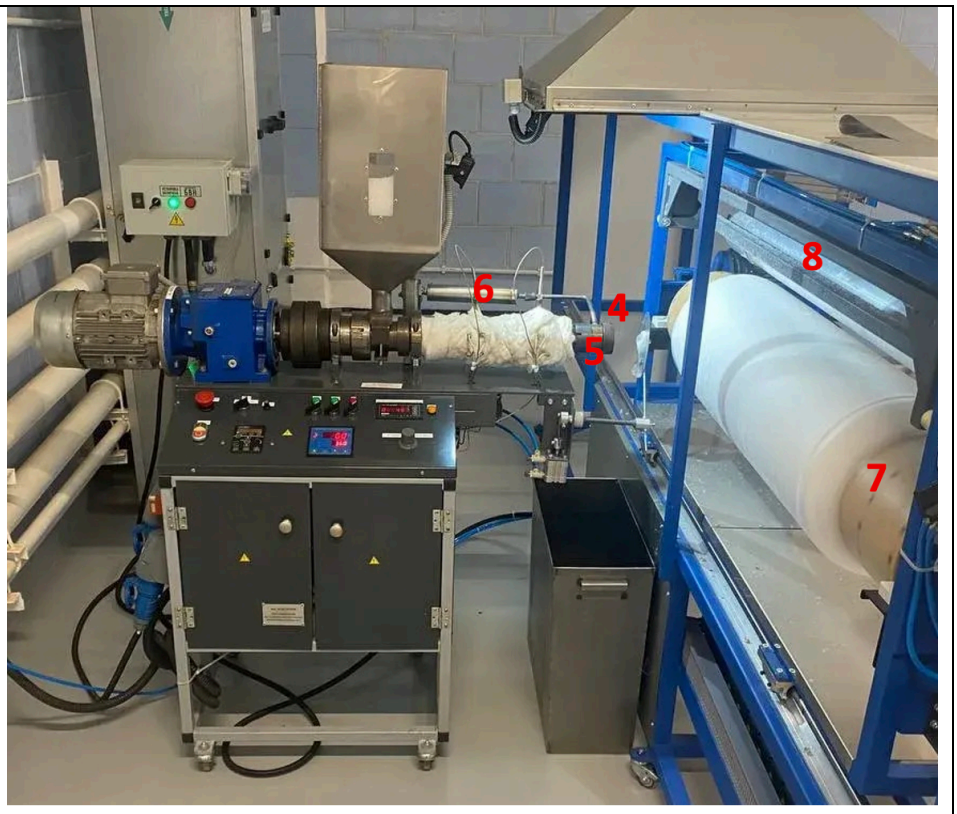


Рисунок 2.1. б) Фильера (4), Зона раздува расплава (5), Нагреватель сжатого воздуха (6), Шпуля (7), Вал прикатки (8)

Гранулы полипропилена поступают из бункера 1 на шнек экструдера 2. Далее гранулы проходят зону нагрева, плавятся и жидкий полипропилен поступает через фильеру 4 в зону раздува расплава 5. Одновременно с этим в зону раздува расплава поступает сжатый воздух предварительно нагретый в нагревателе 6. Далее полипропиленовое волокно переносится ограждающим воздухом на вращающуюся шпулю 7 установленную на каретке 10. Шпуля совершает вращательное движение вокруг своей оси, а также возвратно-поступательное движение относительно экструдера. При необходимости волокна фильтра могут быть дополнительно прижаты валом прикатки 8, при этом усилие прижатия задается пневмоцилиндром (на фотографии не показан).

Намотка происходит до определенной толщины фильтра, после чего срезаются торцы фильтра, шпуля удаляется и фильтр снимается со шпули.

Также во время изготовления фильтра может быть намотан на него заземляющий электрод, представляющий собой стальную проволоку. В настоящей работе изучено влияние глубины намотки, а также частота (или длина электрода) на эффективность улавливания аэрозолей и электрические свойства фильтров.

В качестве контролируемых параметров намоточной установки выбраны следующие:

– частота вращения шпули n (25−100 об/мин);

– расход ограждающего воздуха Qa (70−105 л/мин);

– давление прикатки Рприкат (0,1−0,75 бар);

– выходной диаметр фильеры D_{nozzle} (0,3; 0,6 и 0,8 мм).

Значения данных параметров измерялись с помощью тахометра RGK ТМ-10, поплавкового расходомера F-MBC-V-S-A-100-LM (A-flow, Франция) и манометра M043-P01 (Camozzi, Италия), соответственно. При этом, массовый расход полипропилена mp=50 г/мин, температура полипропилена Tp=345 °C, температура ограждающего воздуха Ta=270 °C, рабочее расстояние от фильеры до шпули ld=47 см и скорость перемещения шпули v=75 мм/с в процессе намотки фильтров оставались постоянными.

2.2 Получение аэрозолей DEHS в генераторе Ласкина

Стандартным «опорным жидкофазным аэрозолем для испытания эффективности бумажных HEPA фильтров является аэрозоль диэтилгексилсебацината (DEHS) [111]. Удобным устройством для получения

аэрозоля является генератор Ласкина. Схематическое изображение его приведено на рисунке 2.

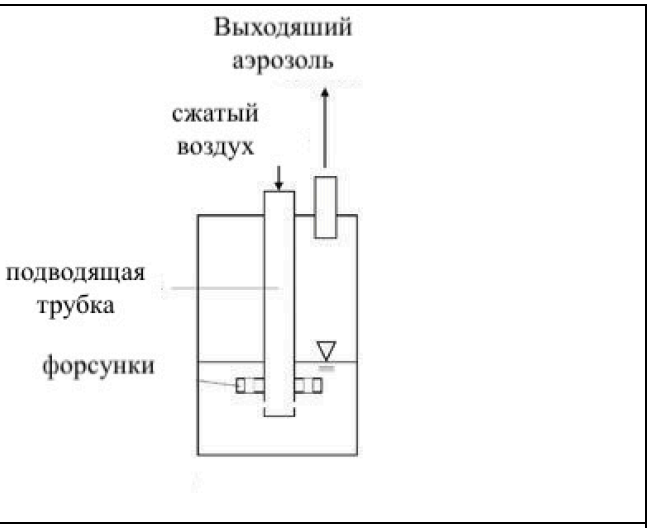


Рис. 2.2 Схематическое изображение генератора Ласкина

Сжатый воздух подается в трубку с четырьмя радиальными отверстиями, представляющие собой распыляющие форсунки. Сжатый воздух выходит из форсунок с высокой скоростью и увлекает распыляемую жидкость в результате чего образуются пузырьки с каплями этой жидкости внутри. Затем пузырьки всплывают на поверхность и лопаются, в результате чего образуется аэрозоль субмикронные капельки распыляемой жидкости в воздухе. В нашем случае жидкостью является DEHS.

2.3 Генерация аэрозолей NiO, Al_2O_3 в искровом разряде

Поскольку в настоящей работе важно изучить эффективность фильтров применительно к аэрозолям различной химической природы, одним из методов получения аэрозолей был выбран метод генерации в искровом разряде при помощи импульсного многозазорного газоразрядного генератора. [94] преимущество метода заключается в возможности получать частицы из разнообразных материалов. В частности, в нашей работе мы использовали его

для получения диэлектрических частиц Al_2O_3 и проводящих частиц Ni, а также частиц сажи. Ниже приведена принципиальная схема генератора.

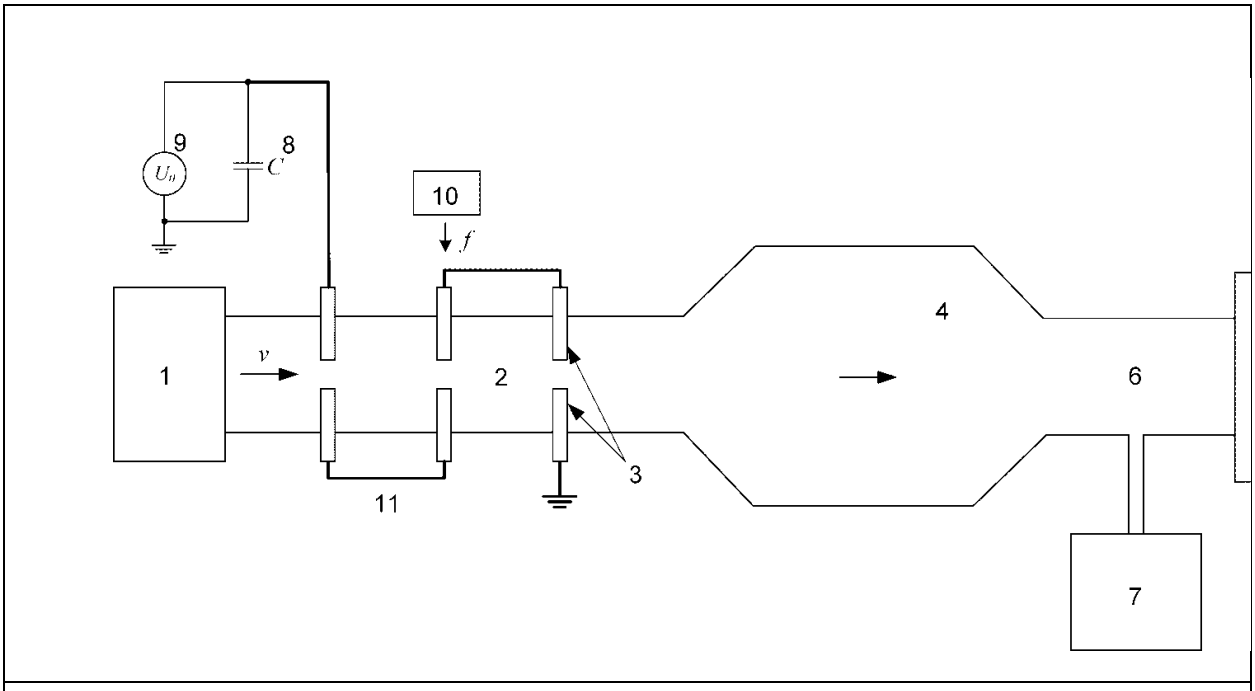


Рис. 2.3. Принципиальная схема импульсного многозазорного газоразрядного генератора аэрозольных наночастиц: 1 – устройство формирования потока чистого сухого воздуха, 2 – разрядная камера, 3 – разрядные электроды, 4 – камера гомогенизации потока аэрозолей, 5 – выход из генератора, 6 – емкостной накопитель энергии, 7 – зарядное устройство, 8 – блок управляющего импульса

Суть метода заключается в следующем: в трубчатую разрядную камеру ф25 мм (2) подавался газ носитель (аргон) из источника (1), перпендикулярно оси трубки на расстоянии 50 мм друг от друга последовательно располагались 3 пары электродов (3) из требуемого материала (Ni, Al), расстояние между электродами варьировалось от 0,5 до 1,5 мм. При управляемом включении разряда емкостного накопителя энергии (6) генератора импульсных токов через последовательно включенные межэлектродные промежутки в них формируется импульсный газовый разряд длительностью порядка 7-40 мкс. Амплитуда импульса по напряжению составляла 4 кВ.

Импульсное выделение энергии в разрядных промежутках в электродных зонах вблизи электрода приводит к эрозионному испарению электродного материала с последующим формированием наночастиц. Генератор импульсных токов обеспечивал работу в импульсно-периодическом режиме с частотой разрядных импульсов, регулируемой до значения f = 10 Гц с помощью блока управляющего импульса (8). Зарядка емкостного накопителя энергии до заданного напряжения U0 осуществлялась с помощью зарядного устройства (7). Поток наночастиц из разрядной камеры поступал в камеру гомогенизации (4), объем которой превышал более чем на 2 порядка объем разрядной камеры. Это необходимо для сглаживания пульсаций. Сформированный аэрозоль поступал на выход из генератора и подавался в стенд испытания электретных фильтров.

2.4 Генерация гигроскопичных аэрозолей йодистого калия

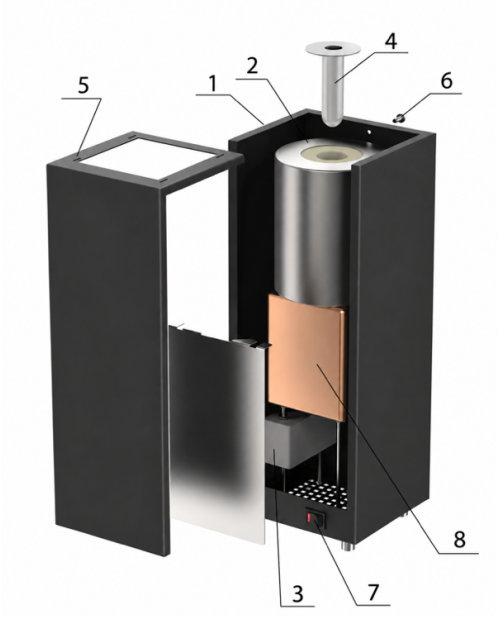


Рис. 2.4 Схематическое изображение генератора аэрозоля йодистого калия. Прибор состоит из корпуса (1), термостат (2), блок управления (3), Тигель с KI (4), крышка (5), выключатель (7), трансформатор (8),

Генератор аэрозоля йодида калия (KI) представляет собой термостат с управляемым нагревом, в который помещен тигель с солью KI. Аэрозоль образуется в результате конденсации в потоке продуваемого воздуха паров соли, образованных над расплавом

Генератор устанавливался непосредственно в потоке воздуха, подаваемого на фильтрующую систему.

2.5 Характеризация аэрозольных частиц при помощи анализатора дифференциальной электрической подвижности

Для измерения распределения частиц по размерам, а также их концентрации использовался анализатор дифференциальной электрической подвижности SMPS 3936. Метод анализа дифференциальной электрической подвижности является основным методом изучения наноаэрозолей. [19, 100]. Данный метод основан на разделении заряженных частиц разного размера при прохождении их через электрическое поле. Изменение их траектории зависит от их размера, скорости потока аэрозоля и напряженности электрического поля. Анализатор состоит из коаксиального конденсатора, внешний цилиндрический электрод которого заземлен, а на внутренний подается высокое напряжение. В пространство между электродами подается ограждающий поток сухого воздуха. Поток частиц подается в пространство между электродами. Будучи заряженными частицы начинают отклоняться от линий потока воздуха. В зависимости от полярности частиц и внутреннего электрода, частицы либо притягиваются к нему, либо отталкиваются от него. Как правило, используется положительная зарядка частиц и отрицательный потенциал на внутреннем электроде [95]. Дистанция на электроде куда притянутся частицы от места ввода аэрозолей зависит от их электрической подвижности Z_p ранее фигурировавшая в уравнении 1.19.

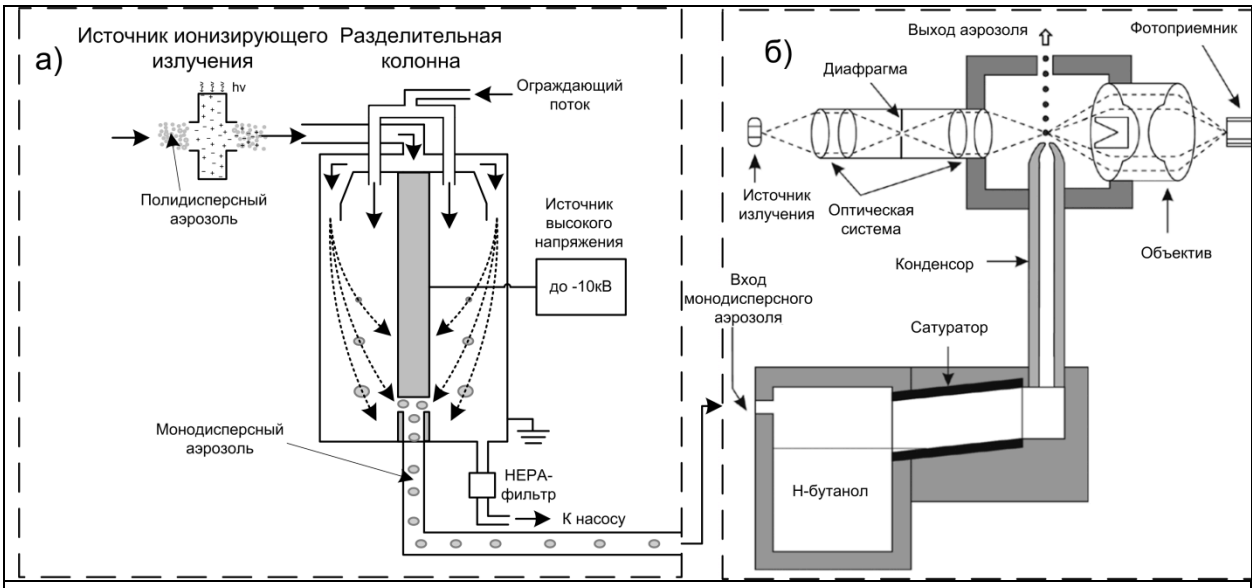


Рисунок 2.5 Схема работы анализатора дифференциальной электрической подвижности (а) и конденсационного счетчика частиц (б)

В нижней части внутреннего электрода имеется щелевой зазор. Регулировка напряжения позволяет добиться того, чтобы в зазор попадали частицы лишь определенного размера. Таким образом, устройство позволяет получать из полидисперсного аэрозоля на входе монодисперсный на выходе.

Далее монодисперсный аэрозоль поступает в конденсационный счетчик частиц для подсчета их концентрации.

Суть метода заключается в подсчете импульсов света, рассеянного на предварительно укрупненных частицах. Входящий поток аэрозоля проходит сперва через камеру насыщения (сатуратор), где аэрозоль насыщается паром н-бутанола, затем попадает в камеру конденсации, где происходит охлаждение паров и их конденсациях на частицах, в результате чего частицы укрупняются до микронных капель. Увеличенные капли попадают в оптический детектор, где определяется их счетная концентрация по числу импульсов рассеяния света и объему прокачиваемого воздуха.

Вместе анализатор дифференциальной электрической подвижности и конденсационный счетчик частиц позволяют построить распределение

количества частиц по размерам. Причем, наличие конденсационного укрупнителя частиц позволяет анализировать частицы с диаметром начиная от 13 нм. Для сравнения оптические счетчики частиц могут измерить [112] позволяют надежно работать от диапазона 0,25-0,3 мкм, а лучше образцы счетчиков с меньшей длиной волны позволяют расчетным образом подсчитывать частицы от 0,1 мкм.

Тем не менее, оптические счетчики частиц весьма широко распространены для решения задач, связанных с оценкой эффективности фильтров и чистоты помещений. Более того они охватывают диапазон MPPS для механических фильтров (0,2-0,3 мкм), в этом же диапазоне находится максимум распределения DEHS, поэтому для оценки эффективности наших систем они также подходят.

2.6 Оптический счетчик счетчика частиц

В ряде экспериментов использовался оптический счетчик частиц Lighthouse Solair 3100. Оптический счетчик частиц является стандартно принятым метод измерения концентрации аэрозольных частиц по [96] и стандартным методом для оценки количества взвешенных частиц для чистых помещений по [97]. Счетчик отбирает известный объём воздуха и определяет сколько частиц прошло и какого они размера. На рисунке принципиальная схема работы прибора.

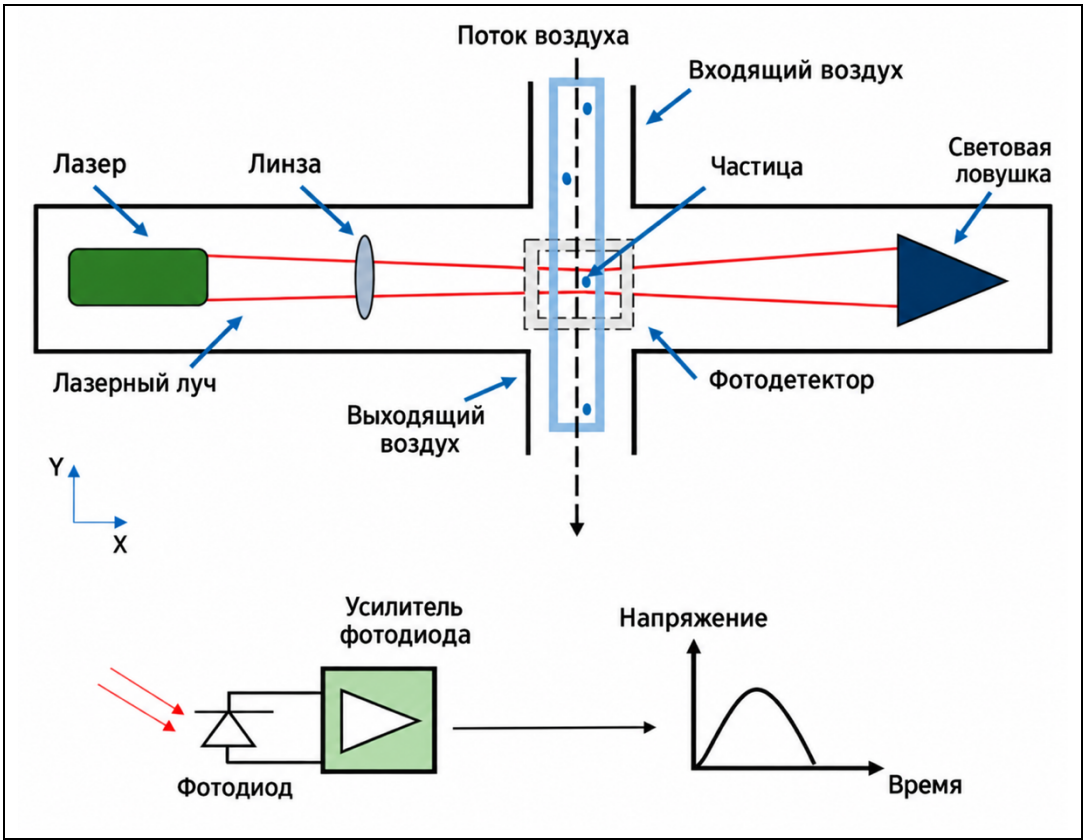


Рисунок 2.6 Схема работы оптического счетчика частиц

Последовательность его работы следующая:

1) Отбор проб воздуха. Встроенный насос прокачивает воздух через прибор с фиксированным расходом, 1 CFM или 28,3 л/мин.

При этом концентрация частиц

$$C = N/(Q*t) \quad (2.1)$$

где N — число обнаруженных частиц, Q — расход воздуха, t — время отбора.

2) Формирование узкого потока. Воздух проходит канал, который освещается лазерным излучением под углом 90 градусов к направлению потока. Канал сделан узким для того, чтобы сигналы рассеянного света от большого количества частиц не накладывались друг на друга

3) Сбор рассеянного излучение и регистрация импульса.
4) Оценка размера частицы. Оценка размера происходит по амплитуде импульса. Низкая амлитуда – частицы около 0,3 мкм, средняя – 0,5-1 мкм, высокая – свыше 1 мкм
5) Получение результата в виде счетного количества частиц по размерам. Диапазон измерения по размеру частиц 0,3-10 мкм. Верхний предел счетной концентрации – $3{,}55*10^7$ шт/м^3 при ошибке, связанной с наложением сигнала от двух частиц одновременно в 10%. При больших концентрациях необходимо применять разбавитель потока

2.7 Главный измерительный стенд

Поскольку наша работа имеет практическую направленность, то главными искомыми параметрами фильтра являются эффективность (или проскок) и перепад давления на фильтре, которые вместе составляют фактор качества фильтрующей системы. В работах [98, 50, 51] нами использовался стенд, схематическое описание которого приведено на рисунке 2.7.

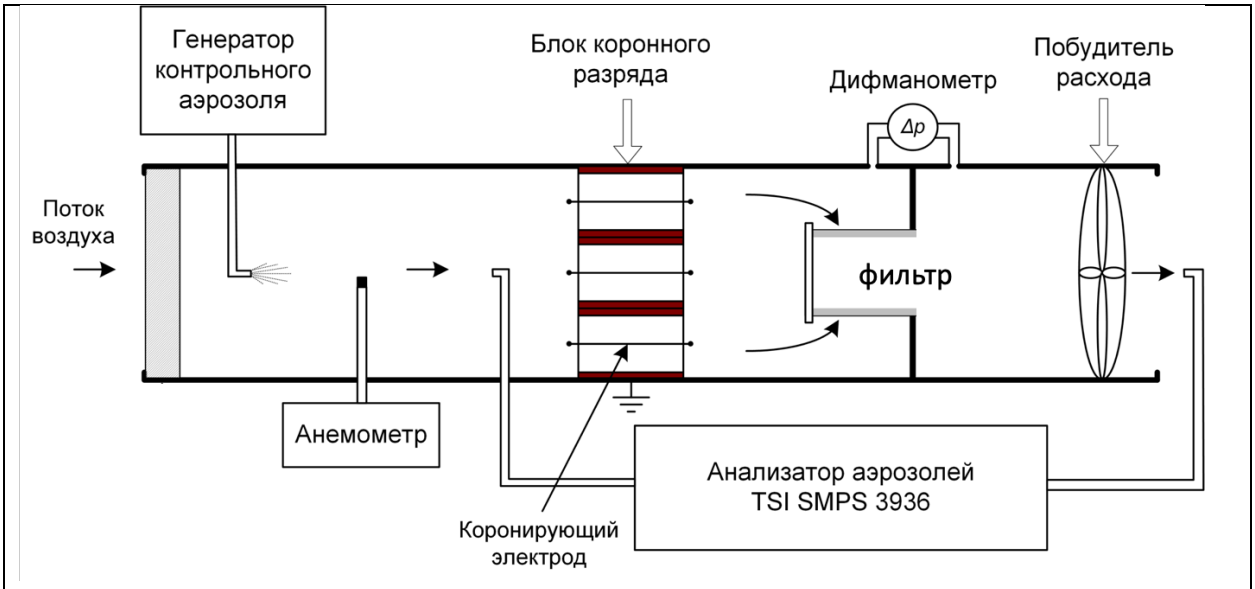


Рисунок 2.7 Схематическое изображение главного измерительного стенда

Предварительно отфильтрованный по классу H14 при помощи механического фильтра воздух поступает на вход стенда (слева направо), на прямом участке производится замер скорости потока воздуха. Контрольный аэрозоль подается через трубку от генератора, либо путем установки генератора непосредственно в потоке (как в случае с KI). После перемешивания измеряется концентрация и распределение частиц до входа в зону блока коронного разряда. Затем аэрозоль проходит через блок коронного разряда (далее изображен на рисунке 2.8) и попадает на цилиндрический фильтр, у которого заглушен торец со стороны набегающего потока воздуха. Воздух входит в фильтр через внешние цилиндрические стенки нормально поверхности фильтра, выходит через внутренние и устремляется через торец на выход. Расход воздуха задается вентилятором, установленным на выходе. Перепад давления на фильтре измерялся дифференциальным манометром Testo 510. Скорость потока воздуха измеряли анемометром Testo 440.

Расчет интегральной эффективности (проскока) и эффективности по размерам

Расчеты производили по методике, примененной нами в работе [98]. При помощи анализатора дифференциальной электрической подвижности или счетчика частиц получали распределение частиц по размерам на входе и на выходе (см глава 4.4), рис, а также общее число частиц на входе и на выходе и рассчитывали эффективность (уравнение 2.3) или проскок (уравнение 2.2) по каждому размеру частиц отдельно или интегральную эффективность (уравнение 2.5) или проскок (уравнение 2.4).

$$P(d) = \frac{n_{\text{out}}(d)}{n_{\text{in}}(d)} \quad (2.2)$$

$$E(d) = \left(1 - \frac{n_{\text{out}}(d)}{n_{\text{in}}(d)}\right) \cdot 100\% \quad (2.3)$$

$$P_{\text{int}} = \frac{\sum_i N_{\text{out},i}}{\sum_i N_{\text{in},i}} \quad (2.4)$$

$$P_{\text{int}} = \frac{\sum_i N_{\text{out},i}}{\sum_i N_{\text{in},i}} \quad (2.5)$$

Ниже приведен чертеж блока зарядки аэрозолей. Он представляет собой блок из сот-обечаек из нержавеющей стали, по центру каждой из которых натянута вольфрамовая проволока диаметром ф 0,1 мм, на которую подается напряжение +10 кВ или -13 кВ.

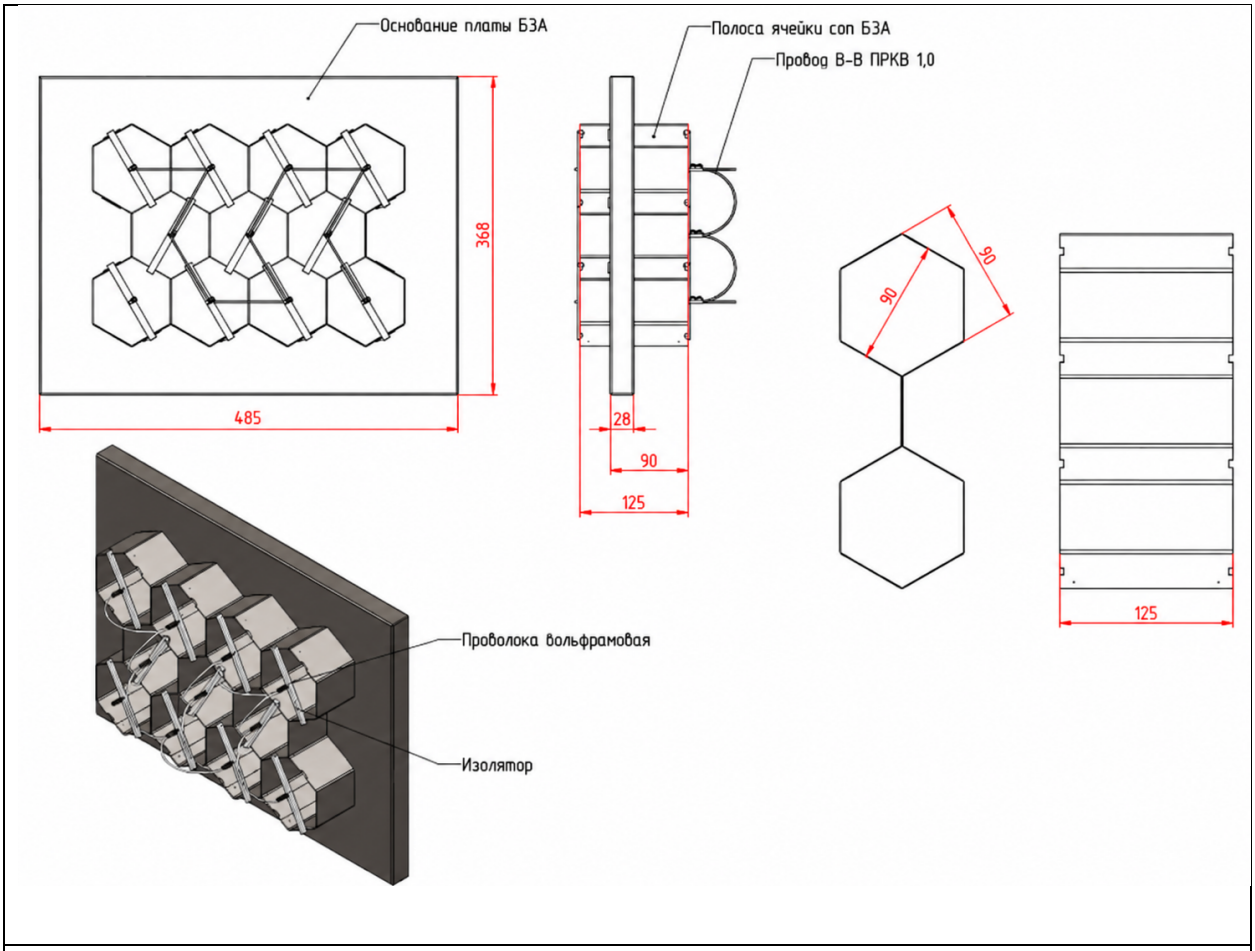


Рисунок 2.7 чертеж блока зарядки аэрозолей

Такая конструкция зарядных ячеек удовлетворяет основным требованиям, сформулированным в Главе 1: проволока создает сильную напряженность поля, способствующую образованию коронного разряда, вместе с тем поле в такой пространственной конфигурации неравномерное и не приводит к образованию дуги.

Эффективность удаления озона каскадным фильтром определялась путем сравнения входной и выходной концентрации, которая измерялась при помощи хемилюминесцентного анализатора ОПТЭК 3.02 П-А.

Глава 3. Влияние технологических и структурных параметров возобновляемых электретных фильтров на их эксплуатационные характеристики

3.1 Выполнение измерений однородности структурных параметров фильтра

Перед изучением влияния технологических параметров намотки фильтров на их структурные параметры мы исследовали однородность этих параметров в различных точках одного фильтра. Был выбран фильтр со следующими параметрами намотки:

– Расход ограждающего воздуха Q_a=75 л/мин;

– Давление прикатки $P_{прикат}$=0,5 бар;

– Уставка частотного преобразователя двигателя вращения шпули n=41 Гц;

– Выходной диаметр фильеры D_{nozzle}=0,8 мм.

На рисунке 3.1 представлено схематичное изображение образца фильтра и его областей, которые были исследованы на однородность структурных параметров.

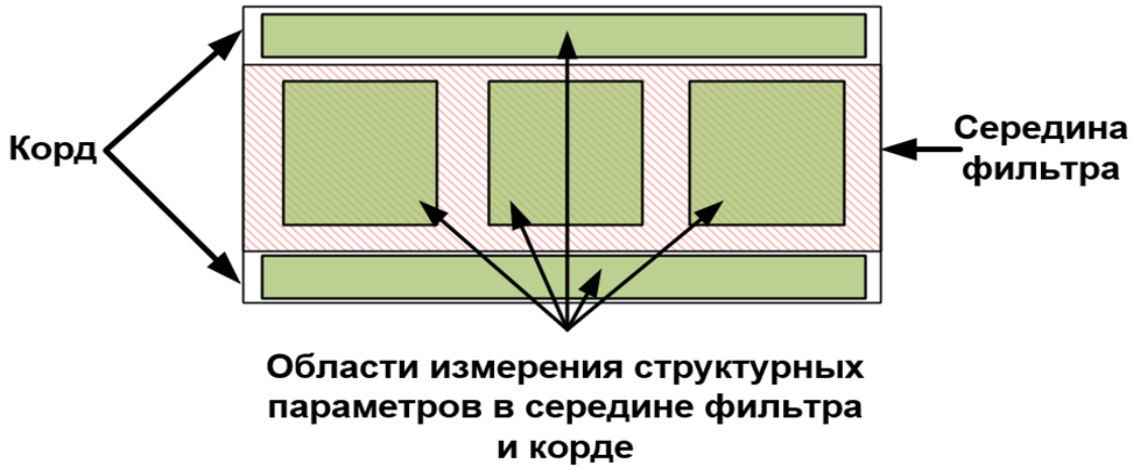


Рисунок 3.1 Схематичное изображение образца фильтра и его областей, которые были исследованы на однородность структурных параметров

Кордами называется внутренняя и внешняя части цилиндрического фильтра, толщина корда 2-3 мм. Характерная особенность – при формировании корда не задействована прикатка. Это технологическая особенность связана с удобством съема фильтра со шпули (внутренний корд), а также удобством дальшей траспортировки и обращению с фильтром (внешний корд). Середина же фильтра изготавливается с использованием прикатки.

Изучение проводили по следующей методике:

1) От фильтра отрезался кусок в виде параллелепипеда с примерными размерами 20x10x5 мм (в дальнейшем «образец»);

2) Образец помещался в силиконовую форму, заливался эпоксидной смолой и помещался в эксикатор, в котором происходил процесс дегазации эпоксидной смолы путем вакуумирования;

3) Образец в затвердевшей эпоксидной смоле шлифовался на шлифовально-полировальном станке абразивами с зернистостью в следующем порядке: 54 мкм, 18 мкм, 6 мкм, 3 мкм, 1 мкм;

4) На оптическом микроскопе получали массив снимков структуры отшлифованного образца в эпоксидной смоле;

5) Снимки обрабатывались компьютерным кодом в результате чего получали следующие данные: диаметр волокна d_f, пористость ε, расстояние между волокнами, удельная площадь поверхности фильтра $S_{уд}$

Общую площадь поверхности фильтра рассчитывали исходя из объема фильтра и удельной площади волокна

$$S_f = S_{\text{удельная пл.}} \times V_{\text{фильтра}} \quad (3.1)$$

где S_f – площадь поверхности волокон, $S_{\text{удельная пл.}}$ – удельная поверхность фильтра, $V_{\text{фильтра}}$ – объем фильтра.

На рисунке 3.2 представлены характерные снимки фильтра с оптического микроскопа в области середины фильтра (подверженной прикатки на намоточной установке) и корда.

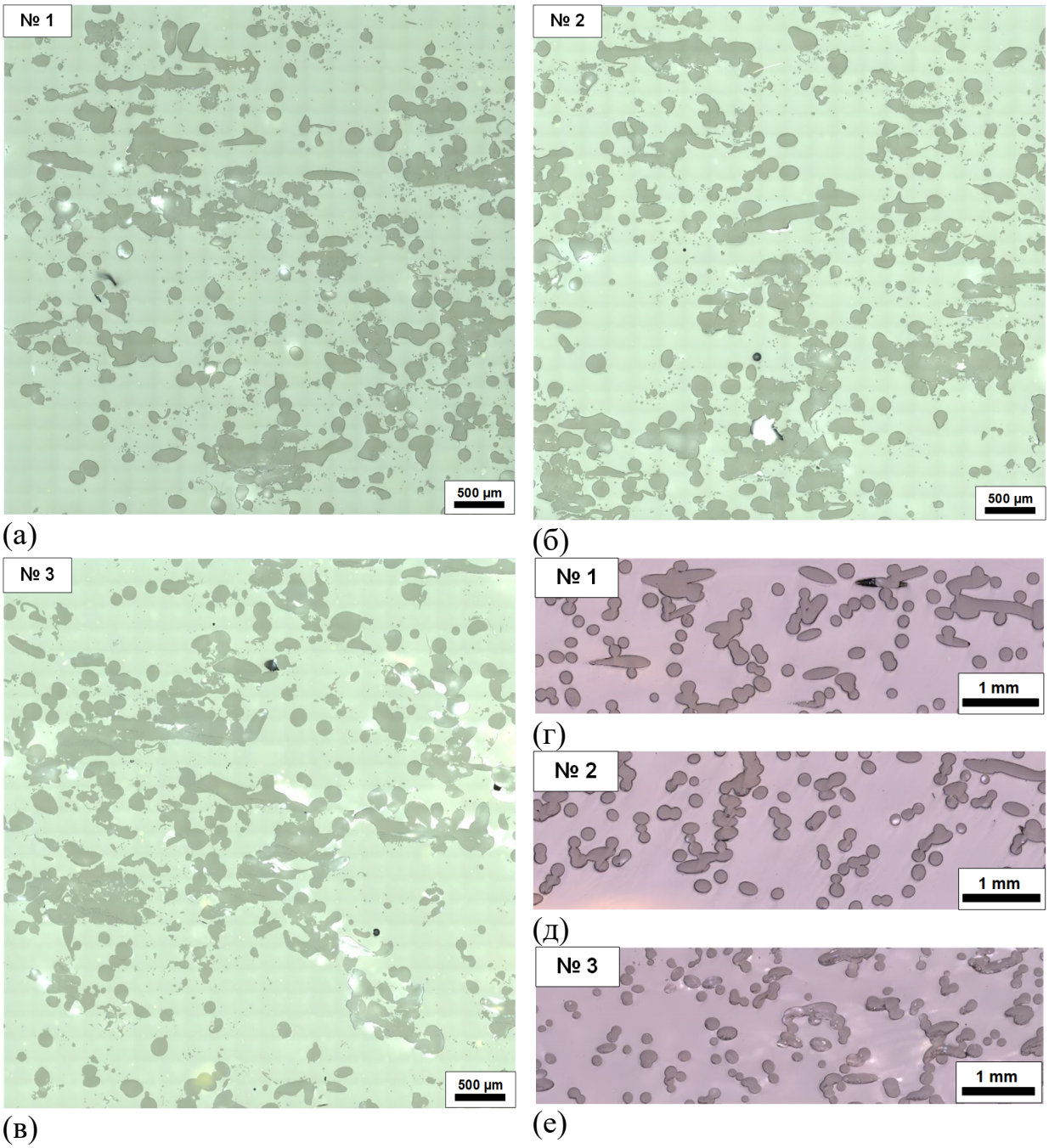


Рисунок 3.2 – Снимки с оптического микроскопа в области (а, б, в) середины фильтра (подверженной прикатке на намоточной установке) и (г, д, е) корда

По полученным снимкам с оптического микроскопа выполнялись измерения следующих структурных параметров и их однородности: диаметр волокон d_f, пористость ε, диаметр мелких волокон d_v (размер которых меньше

250 мкм) и общая площадь поверхности волокон S_f. В таблицах 3.1 и 3.2 представлены измеренные структурные параметры в области середины фильтра и области корда, соответственно, и их однородность.

Таблица 3.1. Структурные параметры в области середины фильтра и их однородность.

№ области	Структурные параметры в области середины фильтра			
	Диаметр волокон d_f, мкм	Пористость ε, %	Диаметр мелких (<250 мкм) волокон d_v, мкм	Общая площадь поверхности волокон Sf, м2
1	386	73	146	20,0
2	370	69	153	21,6
3	338	64	156	21,5
	365±24	69±4	152±4	21,0±0,8

Таблица 3.2. Структурные параметры фильтра в области корда и их однородность.

№ области	Структурные параметры фильтра в области корда		
	Диаметр волокон d_f, мкм	ε α, %	Диаметр мелких (<250 мкм) волокон d_v, мкм
1	359	76	195
2	390	75	196
3	348	71	186
	367±22	74±3	192±5

По результатам измерений однородности структурных параметров фильтра (диаметр волокон df, пористость ε, диаметр мелких волокон dv и общая площадь поверхности волокон S_f) определено, что измеряемые значения параметров фильтра в области корда и середины фильтра у разных

образцов отличаются не более чем на 7%. Таким образом, для дальнейших измерений различных образов фильтров такие сравнения не проводились.

3.2 Дополнительный прижим, как способ получения более тонких волокон

Ниже приведены микрофотографии корда (рис 3.3 а) и середины (рис 3.4) фильтра сделанные при помощи оптического микроскопа

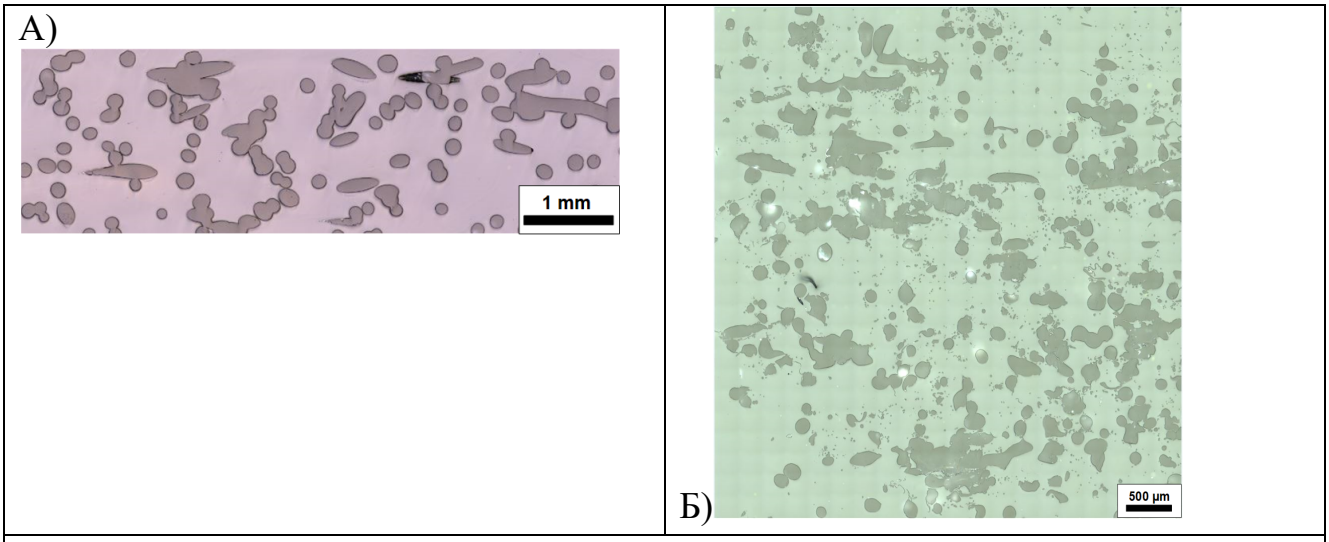


Рис. 3.3 Оптические микрофотографии а) Волокна корда, б) волокна середины фильтра

Можно видеть, что в середине фильтра (б) волокна будто бы деформированы, в то время как в зонах корда (а) волокна сохраняют круглое сечение. Это говорит о том, что прикатка как бы раздавливает полипропиленовые волокна, в результате чего формируются более тонкие нити. Данное предположение мы проверили при помощи растровой электронной микроскопии (РЭМ):

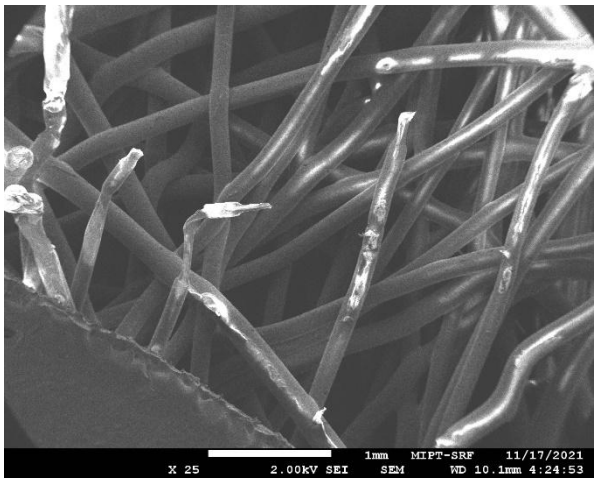
1) От фильтра отрезался тонкий слой в области корда/середины фильтра;

2) Тонкий слой фильтра, обклеенный проводящим скотчем (для уменьшения скопления зарядов на поверхности), исследовался на РЭМ;

3) Полученные на РЭМ снимки обрабатывались вручную с целью определения среднего диаметра волокон df.

На рисунке 3.4 представлены характерные снимки фильтров в области корда и середины фильтра (подверженной прикатке на намоточной установке), полученных на РЭМ.

А)



Б)

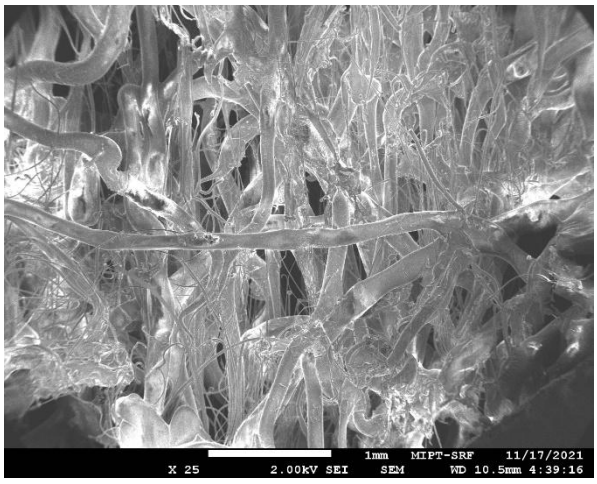


Рис. 3.4 Оптические микрофотографии а) Волокна корда, б) волокна середины фильтра

На рисунке 3.4а видно изображение фильтра, полученного без давления прикатки. При использовании дополнительного цилиндра, прижимающего наматываемые волокна к шпуле, полипропилен в горячем состоянии прилипает к поверхности прижимного цилиндра и вытягивается с последующим образованием более тонких волокон. Как видно из, давление прикатки позволяет получать дополнительные более тонкие волокна (менее 250 мкм).

3.3 Влияние параметров изготовления волокнистых фильтров на их структурные характеристики

Изменение параметров изготовления волокнистых фильтров приводит к изменению их геометрических и структурных характеристик. Так, изменение частоты вращения шпули при формировании цилиндра приводит к изменению толщины его стенки. В таблице 1 приведены основные структурные и геометрические характеристики полученных образцов фильтров. Полученные данные показывают, что с увеличением скорости намотки полимерных волокон наблюдается небольшое уменьшение толщины стенки фильтра. Так, увеличение скорости вращения шпули с 100 до 250 об/мин приводит к уменьшению толщины стенки с 21,3 до 18,6 мм. Учитывая также снижение пористости фильтра при увеличении скорости намотки, это можно объяснить более плотной упаковкой волокон, образующихся при вытягивании расплавленного полимера из фильеры.

Помимо геометрических характеристик, параметры изготовления цилиндрического фильтра влияют и на его структурные особенности. В частности, важно отметить, что характеристики волокон, из которых состоит фильтр, играют важную роль в его эффективности [99]. Как видно из таблицы 3.3, увеличение скорости вращения шпули приводит к увеличению среднего диаметра волокон. Так, увеличение скорости намотки с 100 до 250 об/мин приводит к изменению диаметра волокон с 305 до 342 мкм. При этом максимальный средний диаметр волокон — 431 мкм — достигается при скорости намотки 190 об/мин.

Таблица 3.3. Влияние частоты вращения шпули на структурные параметры фильтров

Скорость вращения шпули (об/мин)	Толщина (мм)	Диаметр волокна (мкм)	ε (%)	Площадь поверхности волокон ($м^2$)
100	21.3	305	81.4	27.6
130	19.8	288	79.4	24.6
160	19	349	77.3	25.6
190	18.6	431	75.4	27.4
220	18.6	356	74.6	28.3
250	18.6	342	75.3	31.0

Кроме того, изменение частоты вращения шпули, приводящее к изменению характеристик волокон, также влияет на пористость фильтра. Данные, представленные в таблице 3.3, показывают, что пористость фильтра уменьшается с 81,4 до 75,3 % при увеличении скорости намотки волокон. Этот эффект, с учетом уменьшения толщины стенки цилиндрического фильтра, можно объяснить более плотной упаковкой волокон.

Исследование влияния давления прикатки на структурные и геометрические характеристики фильтра показало, что пористость незначительно увеличивается с ростом давления. Так, увеличение давления с 15 до 45 кПа приводит к увеличению пористости с 69,3 до 73,1 %, что объясняется уплотнением полимерных волокон (таблица 3.4).

Это явление можно объяснить тем, что в процессе намотки с прижимом (прикатки на формируемый цилиндрический фильтр) еще не затвердевшие расплавленные полипропиленовые волокна прилипают к поверхности прижимного цилиндра и при отрыве образуют тонкие волокна (что хорошо видно на рис. 3.4(б). В результате за счет образования большего количества тонких волокон формируется более пористая структура фильтра. Увеличение

давления прикатки усиливает этот эффект, вследствие чего пористость фильтра возрастает с 69,3 до 73,1 %.

Таблица 3.4. Влияние частоты вращения шпули на структурные параметры фильтров

Давление прикатки, (kPa)	Толщина (мм)	Диаметр волокна (мкм)	ε (%)	Площадь поверхности волокон ($м^2$)
15	14.9	404	69.3	25.8
25	14.8	363	72.2	26.9
35	15.1	383	73.1	26.6
45	15.3	526	73.1	24.6

Исследование расхода ограждающего воздуха показало (таблица 3.5), что при увеличении расхода воздуха уменьшаются значения таких параметров, как толщина фильтра, пористость и площадь поверхности волокон, в то время как диаметр волокна растет. Стоит отметить, что уменьшение расхода ограждающего воздуха ниже 70 л/мин было невозможно по технологическим причинам – волокно «не долетало» до шпули, в связи с чем данный способ увеличения пористости или площади поверхности не представляется возможным.

Таблица. 3.5 Влияние расхода ограждающего воздуха на структурные параметры фильтров

Расход ограждающего воздуха, л/мин	Толщина (мм)	Диаметр волокна (мкм)	ε (%)	Площадь поверхности волокон ($м^2$)
70	14,0	370	70,5	26,6
75	14,2	365	68,7	28,4
80	13,8	594	65,6	26,0
90	13,9	590	65,4	30,7
100	13,1	653	64,8	29,1

Также было исследовано влияние диаметра выходного отверстия фильеры на структурные характеристики фильтра в области, где фильтр не подвергался воздействию давления прикатки. Было показано, что диаметры волокон составляют 220, 292 и 301 мкм при использовании фильер диаметром 0,3; 0,6 и 0,8 мм соответственно.

3.4 Влияние толщины фильтров на их эксплуатационные характеристики

Наиболее распространённым способом повышения эффективности фильтра является увеличение его толщины, что обеспечивает более вероятное взаимодействие между поверхностью фильтра и загрязняющими частицами. В таблице 3.6 приведены характеристики фильтров, изготовленных с различной толщиной стенки. Этот параметр изменяли в диапазоне от 14,9 до 23,0 мм.

Это привело к почти двукратному увеличению массы фильтра — с 593,3 до 1138,2 г — и уменьшению пористости с 78,1 до 74,2 %. Одновременно перепад давления линейно возрастал с 94 до 190 Па при расходе воздуха 215 $м^3$/ч. При меньшем расходе воздуха перепад давления также уменьшался примерно в два раза.

Испытания фильтров различной толщины показали зависимость проскока (П, %) аэрозольных частиц от толщины фильтра. На рис. 5 представлены экспериментальные кривые, полученные при испытаниях эффективности фильтрации. Как видно из рисунка, проникновение аэрозольных частиц уменьшается с увеличением толщины фильтра. Так, при увеличении толщины фильтра с 14,9 до 23,0 мм значение проникновения уменьшается примерно в 5 раз — с 1,1 до 0,2 % соответственно.

Таблица 3.6 Влияние толщины фильтра на его сопротивление и проскок								
Толщина фильтра, мм	**ΔP при 215 м³/ч, Па**	**ΔP при 79 м³/ч, Па**	**Длина фильтра, мм**	**Вес, г**	**ε, %**	**Проскок, %**	**QF при 215 м³/ч, Па⁻¹**	**QF при 79 м³/ч, Па⁻¹**
14,9	94	40	437	593,3	78,1	1,1	**0,04798**	**0,11275**
16,1	110	48	438	686,8	76,8	0,7	**0,04511**	**0,10337**
18,6	134	57	439	866,8	75,1	0,5	**0,03954**	**0,09295**
20,1	156	67	438	954,7	74,8	0,3	**0,03724**	**0,08670**
23,0	190	81	437	1138,2	74,2	0,2	**0,03271**	**0,07672**

На рисунке 3.5 приведены полученные зависимости эксплуатационных характеристик фильтров различной толщины. Видно, что с увеличением толщины стенки цилиндрического фильтра перепад давления линейно возрастает почти в два раза. Тем не менее эффективность фильтрации значительно увеличивается.

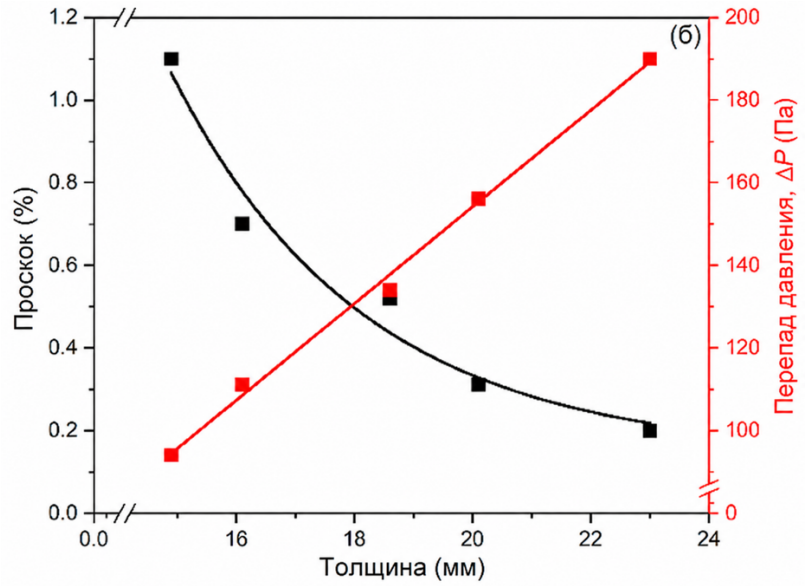


Рисунок 3.5. зависимость интегрального проскока и перепада давления от толщины фильтра. Фильтры были изготовлены при скорости вращения шпули 120 об/мин и давлении прикатки 25 кПа и испытаны при расходе воздуха 215 м³/ч и напряжении коронного разряда +9 кВ.

.

Таким образом, увеличивая толщину фильтра, можно предсказуемо снизить проникновение аэрозольных частиц, не превышая при этом максимально допустимый перепад давления на фильтре.

3.5 Характер зависимости проскока от размера частиц

Внимательно рассмотрим кривые зависимости проскока от размера частиц (рисунок 3.6).

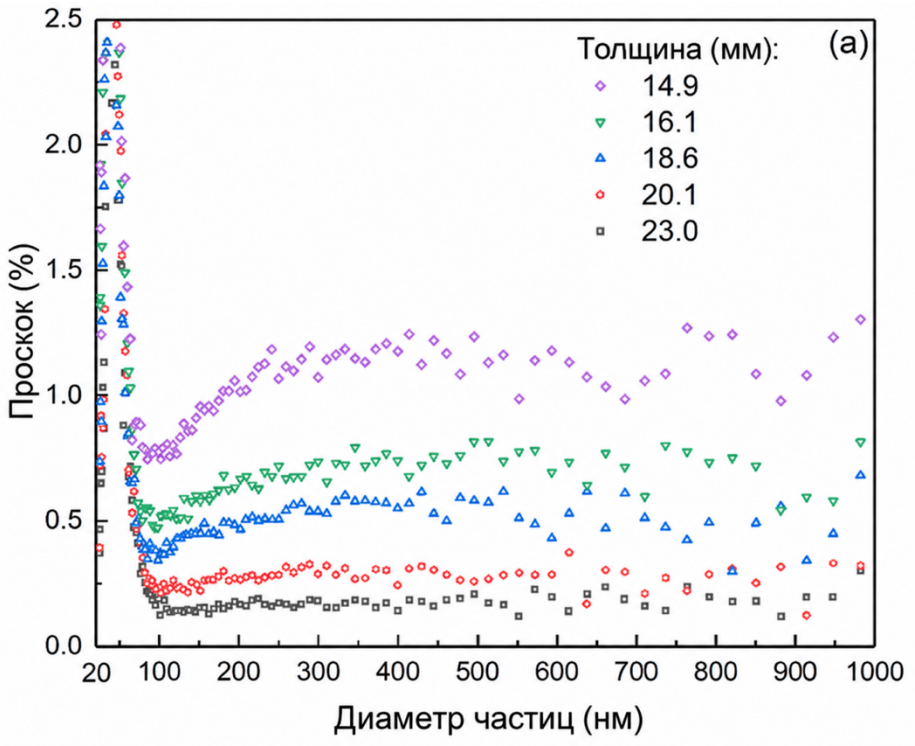


Рисунок 3.6. Зависимость проскока от размера частиц

Можно обратить внимание, что система имеет максимум проскока в области 30–40 нм. Далее с ростом размера частиц наблюдается минимум проскока и последующий выход на плато после ~250 нм. С одной стороны, максимум проскока в области менее 100 нм – типичное свойство электретных фильтров, о котором ранее сообщалось в работах [74, 80, 84]. С другой стороны, в приведенных работах этот максимум наблюдался в области 80–100 нм, в то время как у нас он заметно ниже. Но в приведенных работах типичная толщина волокна составляла единицы микрометров, в то время как наши

фильтры состоят из волокон толщиной 150–300 мкм. Тогда этому явлению можно найти следующее объяснение: при росте диаметра волокна d_f растет число Pe по уравнению 1.13, а также R по выражению 1.38, при этом вклад диффузии E_D и перехвата за счет диффузии E_{DR} падают согласно уравнениям 1.43 и 1.44 соответственно. Отсюда можно сделать вывод, что в вышеперечисленных работах в области 30-40 нм хорошо работает диффузионный и диффузионно-перехватный механизм улавливания, в то время как у нас он работает существенно хуже, и у наших фильтров MPPS смещается в область более мелких частиц. В таком случае добавление в систему существенно более мелких волокон позволило бы уменьшить проскок в этой области.

3.6 Влияние линейной скорости воздуха через фильтр на проскок и сопротивление фильтра

Важной характеристикой фильтра является его способность работать с большими объемами воздуха при очистке помещений, а также функционировать при различных скоростях воздушного потока. Кроме того, большой перепад давления приводит к значительным энергетическим потерям, как мы ранее писали в Главе 1.

В ходе испытаний фильтров при различных расходах воздуха было установлено, что проникновение частиц сильно зависит от скорости воздушного потока. Так, при увеличении расхода воздуха с 79 до 119, 192 и 215 м³/ч коэффициент проникновения частиц резко возрастает соответственно с 0,03 до 0,10, 0,35 и 0,95 %.

На рисунке 3.7 показана зависимость проникновения частиц от их размера при различных расходах воздуха. Перед испытаниями фильтры

заряжались в течение 90 минут путем пропускания через них заряженных частиц аэрозоля DEHS.

Как мы писали в Главе 1, единственный механизм улавливания аэрозолей благодаря которому эффективность растет с ростом скорости потока воздуха – это импакция (уравнения 1.15 и 1.19) Однако, как мы упоминали, этот механизм практически не оказывает влияния на эффективность улавливания субмикронных и нанометровых аэрозолей. Поэтому с ростом линейной скорости проскок через наши фильтры субмикронных аэрозолей DEHS также рос.

Также следует отметить, что с увеличением расхода воздуха перепад давления на фильтре, как и ожидалось, линейно возрастает (рис 3.7 б.), а фактор качества такой системы падает (см таблицу 3.7).

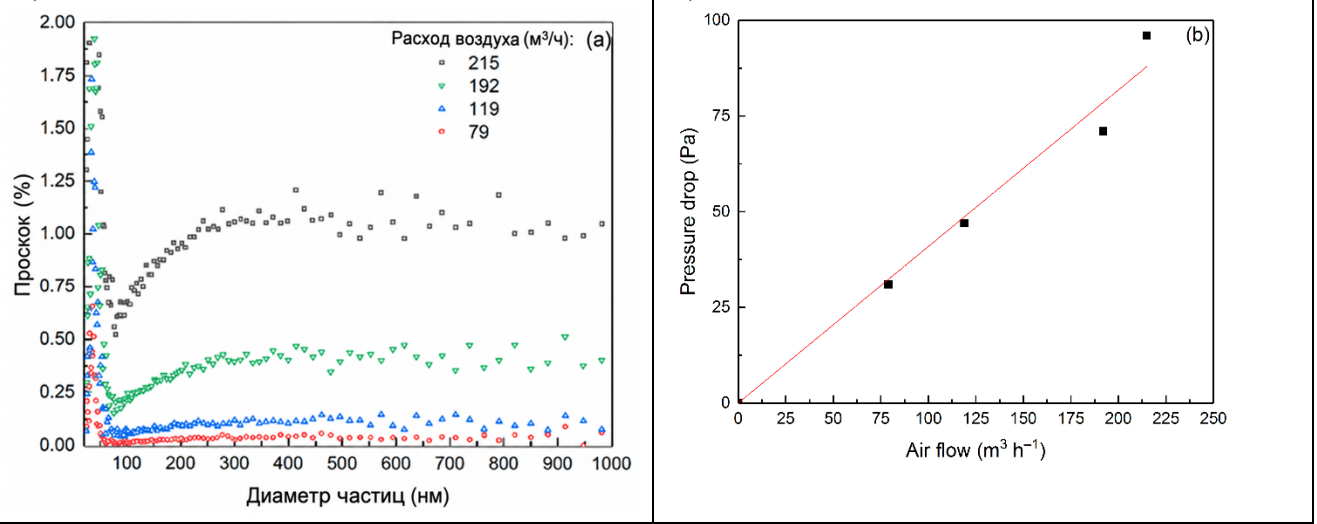


Рисунок 3.7 Влияние расхода воздуха: а) на проникновение аэрозольных частиц и б) на перепад давления на фильтре. Фильтр имел внешний ф160 мм и длину 440 мм

Таблица 3.7. Влияние расхода воздуха на сопротивление и проскок				
Поток воздуха, м³/ч	**Сопротивление, Па**	**Проскок, %**	**Линейная скорость на внешней стенке фильтра, м/с**	**Фактор качества QF, Па⁻¹**
79	31	0,03	**0,0980**	**0,2617**
119	47	0,10	**0,1476**	**0,1470**
192	71	0,35	**0,2382**	**0,0796**
215	96	0,95	**0,2667**	**0,0485**

3.7 Влияние частоты вращения шпули на эксплуатационные характеристики фильтров

Оценим эффективность фильтров по частицам разного размера при различных условиях изготовления, а именно при различной частоте вращения шпули. Частота вращения шпули влияет на геометрические и структурные характеристики полученного фильтра. Вследствие этого изменяются и его фильтрационные свойства.

Результаты показывают долю частиц, проникающих через фильтр, в диапазоне размеров 20–1000 нм.

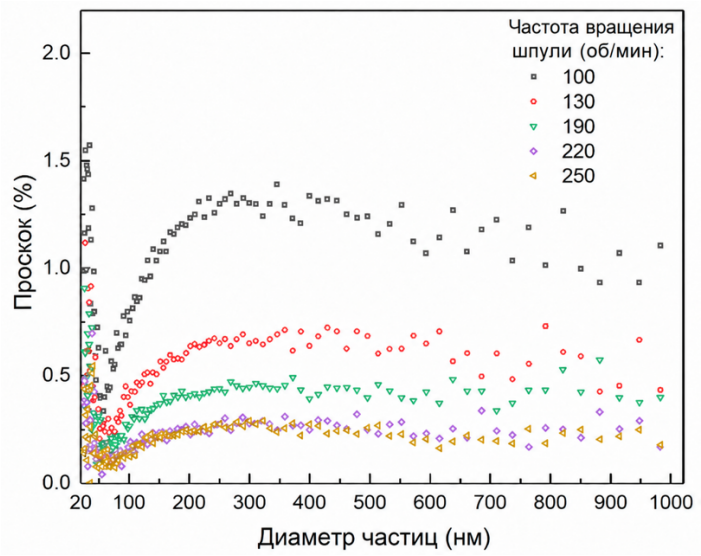


Рисунок 3.8 Зависимость проскока от размера частиц для фильтров, намотанных при различной скорости вращения шпули от 100 до 250 об/мин.

Фильтры были изготовлены при шести значениях скорости вращения шпули в диапазоне от 100 до 250 об/мин. На рисунке 3.8 представлена зависимость проскока от размера частиц для фильтров, изготовленных при различных скоростях вращения шпули.

Таблица 3.8 Характеристики фильтров, изготовленных при различных скоростях вращения шпули.

n, об/мин	**Δp 215 м³/ч, Па**	**Δp 79 м³/ч, Па**	**t, мм**	**L, мм**	**m, г**	**ε, %**	**Проскок, %**	**QF при 215 м³/ч, Па⁻¹**	**QF при 79 м³/ч, Па⁻¹**
100	101	43	21,3	432	756,1	81,1	1,13	**0,04439**	**0,10425**
130	125	54	19,8	433	764,3	79,3	0,53	**0,04192**	**0,09704**
190	172	74	18,6	435	771,7	77,6	0,39	**0,03225**	**0,07496**
220	177	76	18,6	435	768,8	77,7	0,24	**0,03408**	**0,07937**
250	202	87	18,8	435	776,4	77,8	0,23	**0,03007**	**0,06983**

Видно, что величина проскока с увеличением оборотов вращения шпули падает, при этом толщина уменьшилась, масса фильтра выросла, а пористость ε упала, то есть плотность упаковки волокон выросла. Это хорошо согласуется с уравнением (1.37), согласно которому с ростом плотности упаковки проскок и должен падать. Но растет и сопротивление, в итоге коэффициент качества несколько падает. С практической точки зрения надо заметить, что частота вращения шпули влияет на износ установок изготовления фильтров, поэтому увеличение частоты свыше 220 об/мин может привести к необоснованным затратам на ремонт изнашиваемых узлов.

3.8 Влияние давления прикатки на эксплуатационные характеристики фильтров

Как было отмечено выше, при изготовлении фильтра в процессе намотки полимерных волокон использовался параллельный металлический цилиндр, который прижимал формируемый цилиндрический фильтр с различным

давлением (прикатка). Исследование влияния давления прикатки показало наличие его оптимального значения.

Были исследованы две серии образцов, полученных при различных давлениях прикатки и различных скоростях вращения шпули в процессе формирования фильтра. На рисунке 3.9 представлены полученные экспериментальные данные. Как видно с увеличением давления прикатки в процессе изготовления свойства фильтра улучшаются.

Первая серия фильтров была получена при скорости вращения намотки 190 об/мин. При этом фильтры, изготовленные без прикатки и при минимальном давлении 5 кПа, практически не отличались по эффективности: коэффициент проникновения частиц для них составил соответственно 2,1 и 2,2 %. Увеличение давления прикатки до 25 кПа приводит к двукратному снижению коэффициента проскока — до 1,1 %.

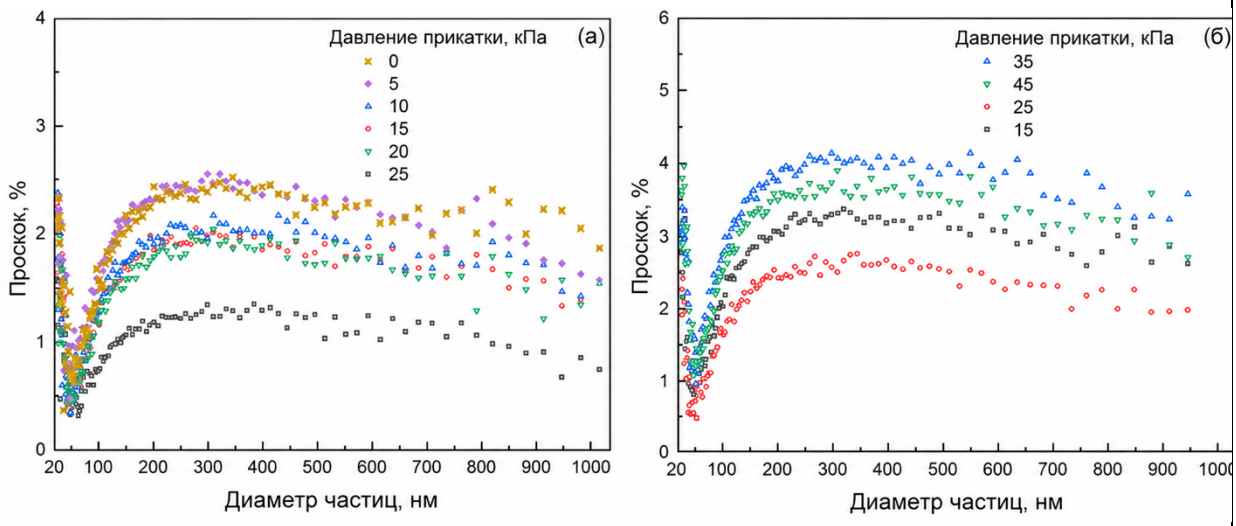


Рисунок 3.9 Зависимость коэффициента проникновения от размера частиц для фильтров, изготовленных при различных давлениях прикатки и намотанных при различных скоростях вращения шпули: а) 190 и б) 120 об/мин. Фильтры были испытаны при расходе воздуха 215 м³/ч и напряжении коронного разряда –11 кВ

Исследование другой серии фильтров (рисунок. 3.9б), полученных при иной скорости вращения намотки — 120 об/мин, показало, что дальнейшее увеличение давления прикатки приводит к ухудшению свойств фильтра. Проскок частиц возрастает до 3,6 и 3,3 % при давлениях 35 и 45 кПа соответственно.

В таблицах 3.9 и 3.10 приведены показатели эффективности фильтров в зависимости от их структурных характеристик и давления прикатки в процессе намотки.

Таблица. 3.9 Характеристики фильтров, изготовленных при различных давлениях прикатки при частоте вращения шпули 190 об/мин

Давление прикатки, кПа	**ΔP при 215 м³/ч, Па**	**ΔP при 79 м³/ч, Па**	**t, мм**	**L, мм**	**m, г**	**ε, %**	**Проскок, %**	**QF при 215 м³/ч, Па⁻¹**	**QF при 79 м³/ч, Па⁻¹**
–	105	45	16,7	429	644,7	78,8	2,1	**0,03680**	**0,08585**
5	127	55	15,4	438	661,2	76,6	2,2	**0,03005**	**0,06938**
10	126	54	16,1	430	646,4	76,7	1,7	**0,03234**	**0,07546**
15	124	53	15,6	440	662,1	77,0	1,7	**0,03286**	**0,07688**
20	122	53	15,5	436	662,4	76,4	1,8	**0,03294**	**0,07584**

Таблица. 3.10 Характеристики фильтров, изготовленных при различных давлениях прикатки при частоте вращения шпули 120 об/мин

Давление прикатки, кПа	**ΔP при 215 м³/ч, Па**	**ΔP при 79 м³/ч, Па**	**t, мм**	**L, мм**	**m, г**	**ε, %**	**Проскок, %**	**QF при 215 м³/ч, Па⁻¹**	**QF при 79 м³/ч, Па⁻¹**
15	99	42	14,9	431	653,3	75,7	2,9	**0,03576**	**0,08430**
25	95	41	15,2	435	654,2	76,3	2,3	**0,03971**	**0,09201**
35	107	46	14,9	428	646,2	75,7	3,6	**0,03107**	**0,07227**
45	107	46	14,7	435	657,5	75,4	3,3	**0,03188**	**0,07416**

Технологически поднять давление прикатки выше 20 кПа при оборотах шпули 190 об/мин не представлялось возможным.

Явной зависимости проскока от давления прикатки получить не удалось, по все видимости прикатка может как улучшать фильтрующие свойства «измельчая» волокна, так и ухудшать их при дальнейшем повышении давления, расплющивая волокна, что приводит к росту перепада сопротивления фильтра, падению эффективности и падению фактора качества.

3.9 Влияние диаметра выходного отверстия фильеры на параметры фильтра

Ещё одним параметром важным параметром влияющим на эффективность фильтрации волокнистыми фильтрами является диаметр волокон Регулирование диаметра волокон может быть достигнуто изменением диаметра выходного отверстия фильеры [100, 101] В данном разделе исследовано влияние диаметра фильеры при формировании полипропиленовых волокон и их намотке на конечные характеристики изготовленных фильтров.

Как было показано выше, уменьшение диаметра выходного отверстия фильеры с 0,8 до 0,6 мм приводит к уменьшению диаметра получаемых полимерных волокон с 292 до 220 мкм. На рисунке 3.10. представлены кривые зависимости проскока частиц от их размера для фильтров, изготовленных с использованием фильер различного диаметра. при скорости вращения шпули 120 об/мин и давлении прикатки 25 кПа и испытанных при расходе воздуха 215 м³/ч и напряжении коронного разряда +9 кВ.

Как видно, фильтры, намотанные с использованием фильеры меньшего диаметра (0,6 мм), имеют более низкий проскок по сравнению с фильтрами, изготовленными с использованием фильеры диаметром 0,8 мм. Например, коэффициент проникновения составляет 0,7 и 1,1 % для фильтров,

изготовленных с использованием фильер диаметром 0,6 и 0,8 мм соответственно.

Как можно видеть из рисунка 3.10 и таблицы 3.11 Уменьшение диаметра волокон положительно влияет на не только эффективность, но и уменьшает сопротивление фильтров, что вкупе дает существенное улучшение фактора качества.

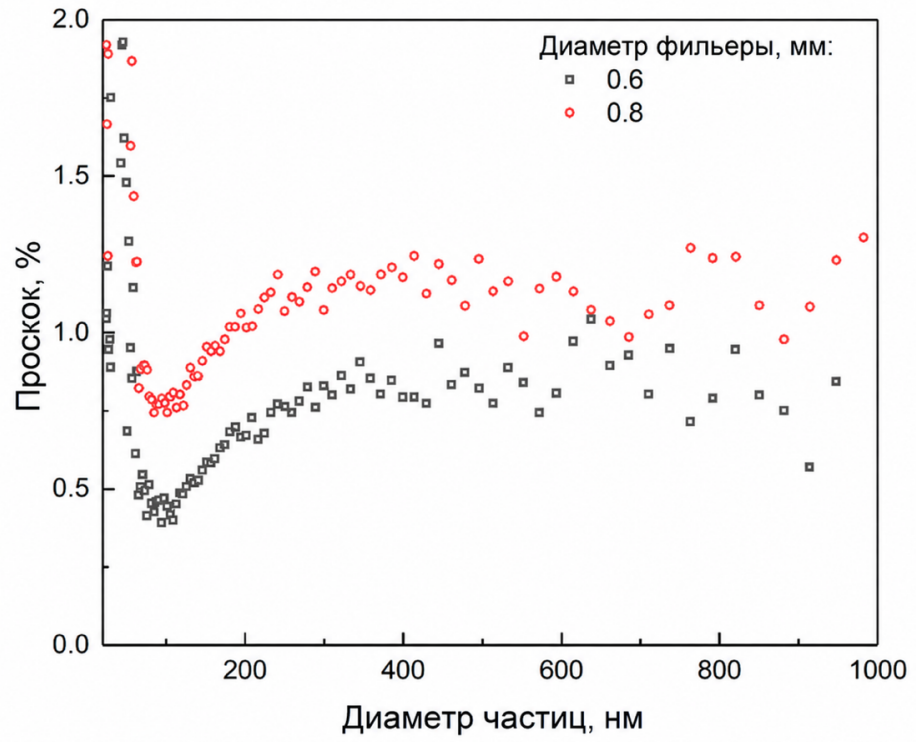


Рисунок. 3.10 Зависимость проскока от размера частиц для фильтров, изготовленных с использованием фильер различного диаметра.

Следует также отметить, что при использовании фильер с меньшим выходным диаметром фильтры обеспечивают меньший перепад давления. Так, перепад давления на фильтрах составляет 79 и 94 Па при использовании фильер диаметром 0,6 и 0,8 мм соответственно. Таким образом, использование фильер с малым выходным диаметром является предпочтительным для изготовления высокоэффективных фильтров.

Таблица 3.11 Характеристики фильтров, изготовленных с помощью с фильер различного диаметра									
Диаметр фильеры, мм	**ΔP при 215 м³/ч, Па**	**ΔP при 79 м³/ч, Па**	**t, мм**	**L, мм**	**m, г**	**ε, %**	**Проскок, %**	**QF при 215 м³/ч, Па⁻¹**	**QF при 79 м³/ч, Па⁻¹**
0,6	79	34	16,9	440	570,4	81,9	0,7	**0,06281**	**0,14594**
0,8	94	40	14,9	437	593,3	78,1	1,1	**0,04798**	**0,11275**

3.10 Выводы к главе 3

1) Показано, что увеличение толщины фильтра приводит к росту площади поверхности волокон и уменьшению проскока через фильтр, при этом растет сопротивление фильтра. При этом проскок падает в 5 раз, а сопротивление растет лишь в 2 раза, что находится в хорошем согласовании с теорией. Это позволяет проектировать фильтры с оптимальным соотношением проскока и сопротивления
2) Фильтры продемонстрировали сильную зависимость проскока и сопротивления от объемного потока очищаемого воздуха. Так, при увеличении потока воздуха с 79 до 215 м3/ч, проскок вырастал с 0,03% до 0,95% (в 30 раз), а сопротивление увеличивалось с 31 до 96 Па (в 3 раза). Полученные данные подтверждают представления о том, что иппакционный механизм улавливания не характерен для субмикронных аэрозолей.
3) Изучено влияние частоты вращения шпули на характеристики изготавливаемых фильтров. Обнаружено, что, увеличивая частоту вращения шпули, можно также снизить проскок частиц в 5 раз, при этом сопротивление растет в 2 раза, однако это происходит не за счет

увеличения толщины, а напротив - за счет более плотной упаковки волокон, что также согласуется с теоретическими представлениями.

4) При помощи оптической микроскопии и РЭМ показано, что раздавливание полипропиленовых волокон прикаткой позволяет получить более мелкие волокна. Однако, однозначного положительного эффекта изменение давления прикатки на эксплуатационные характеристики фильтров не обнаружено.

5) Уменьшение диаметра фильеры однозначно положительно сказывается на характеристиках изготавливаемых фильтров. Так, при уменьшении диаметра фильеры с 0,8 до 0,6 мм проскок падает с 1,1% до 0,7% и сопротивление также падает с 94 Па до 79 Па, а коэффициент качества растет.

Глава 4. Электрические свойства возобновляемых электретных фильтров

Настоящая глава посвящена электрическим свойствам фильтрующих систем на основе возобновляемых электретных фильтров. Мы измерили чисто механическую эффективность фильтров и сравнили их с эффективностью, когда аэрозоль предварительно заряжается. Далее рассмотрели влияние полярности зарядки на проскок аэрозольных частиц. Затем изучили, как меняется проскок от момента включения блока зарядки аэрозолей до выхода системы на рабочий режим. Далее мы разработали методику измерения локального и общего заряда, который приобретает фильтр в процессе работы. При помощи этой методики были проведены исследования локального и суммарного заряда в зависимости от конфигурации заземляющего электрода. Была изучена зависимость тока заземления от размера улавливаемых частиц и массовой производительности генератора. Показано, как влияет локальный потенциал на структуру загрязненного фильтра. Наконец, было исследовано как изменяется эффективность фильтра при напылении проводящего слоя. Это дало возможность построить модель электрических свойств фильтров.

4.1 Механическая эффективность фильтра

Ранее мы приводили оценки механической эффективности типичного HEPA фильтра из работы [55]. Оценим чисто механическую эффективность одного из наших фильтров воспользовавшись уравнениями (1.37 - 1.45). Полученные расчетные данные приведены в таблице ниже.

Ниже приведена таблицы 4.1 и 4.2 по результатам расчета механической эффективности, а также расчетная кривая зависимости проскока от размера частиц (рисунок 4.1) для фильтра толщиной t = 16 мм, диаметром волокна d_f = 200 мкм и пористостью = 80%.

Таблица 4.1 Теоретический расчет механической эффективности фильтров При потоке 215 м^3/ч								
dp, мкм	**ER**	**EI**	**ED**	**EDR**	**EG**	**EΣ**	**Эфф-ть, %**	**П, %**
0,01	8,17E-09	3,60E-12	2,03E-02	2,20E-04	2,60E-07	2,05E-02	40,7	59,3
0,02	3,27E-08	2,96E-11	8,21E-03	1,77E-04	5,34E-07	8,39E-03	19,2	80,8
0,05	2,04E-07	5,02E-10	2,56E-03	1,36E-04	1,45E-06	2,70E-03	6,6	93,4
0,1	8,17E-07	4,62E-09	1,12E-03	1,16E-04	3,35E-06	1,24E-03	3,1	96,9
0,2	3,27E-06	4,80E-08	5,28E-04	1,05E-04	8,71E-06	6,45E-04	1,6	98,4
0,5	2,04E-05	1,32E-06	2,28E-04	1,03E-04	3,87E-05	3,91E-04	1,0	99,0

Таблица 4.2 Теоретический расчет механической эффективности фильтров При потоке 79 м^3/ч								
dp, мкм	**ER**	**EI**	**ED**	**EDR**	**EG**	**EΣ**	**Эфф-ть, %**	**П, %**
0,01	8,2E-09	1,4E-12	3,9E-02	3,6E-04	6,8E-07	3,9E-02	63,0	37,0
0,02	3,3E-08	1,1E-11	1,6E-02	2,9E-04	1,4E-06	1,6E-02	33,3	66,7
0,05	2,0E-07	1,9E-10	4,9E-03	2,2E-04	3,8E-06	5,1E-03	12,2	87,8
0,1	8,2E-07	1,8E-09	2,1E-03	1,9E-04	8,8E-06	2,3E-03	5,7	94,3
0,2	3,3E-06	1,8E-08	1,0E-03	1,7E-04	2,3E-05	1,2E-03	3,0	97,0
0,5	2,0E-05	5,0E-07	4,3E-04	1,7E-04	1,0E-04	7,2E-04	1,8	98,2

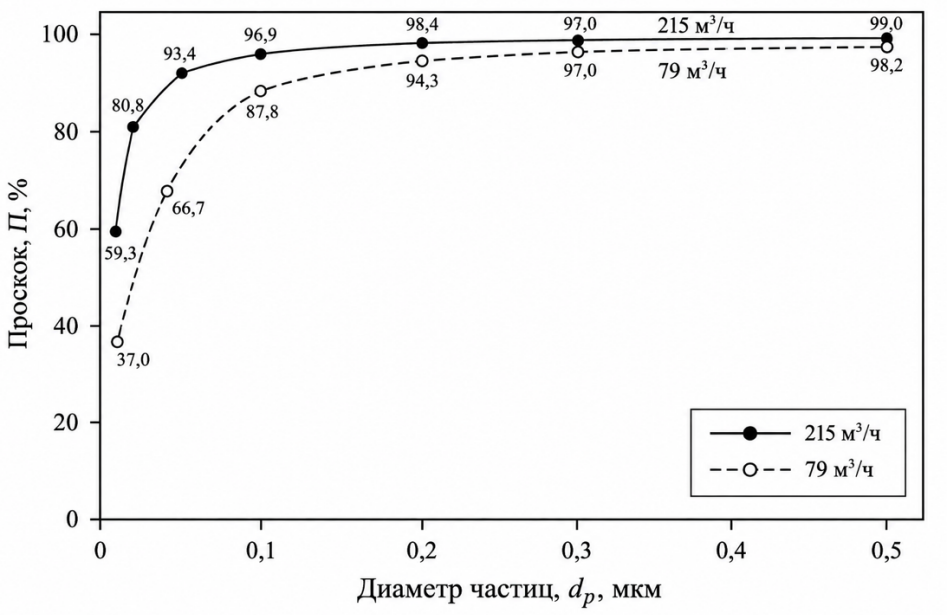


Рисунок. 4.1. Теоретические кривые проскока от диаметра частиц без зарядки

Если рассчитать интегральный проскок исходя из реального распределения DEHS, на входе в фильтрующую установку, то мы получим значение 96% (то есть эффективность всего 4%)

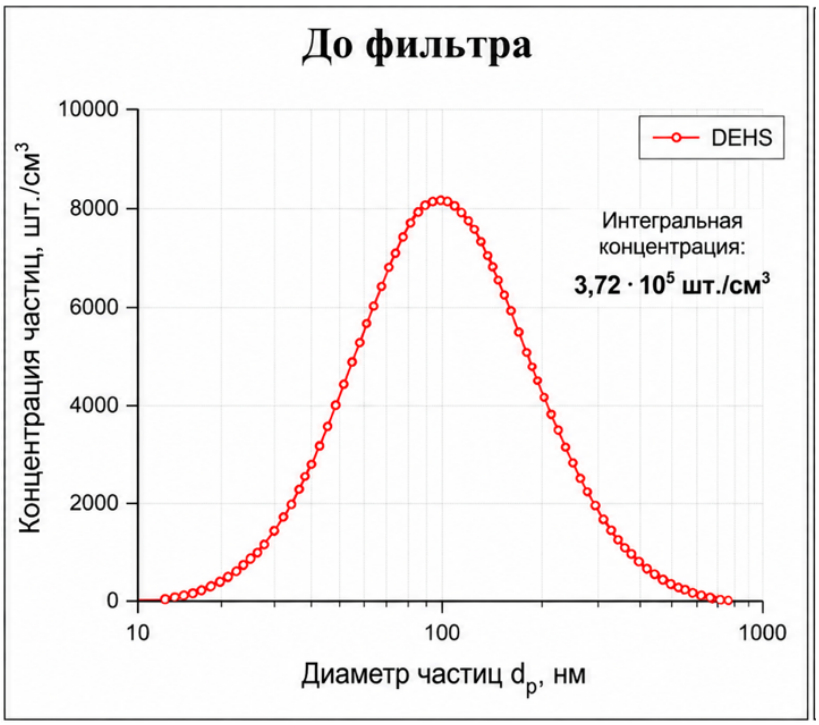


Рисунок. 4.2. Распредение. DEHS на входе в установку

На практике оказалось, что это значение несколько ниже – 79,5%. Это может быть связано с тем что промышленно производимые фильтры не проходят специальной обработки изопропанолом, как это показано было в работах [80, 81], поэтому есть некоторое пространственное разделениее зарядов на волокне и приобретениее фильтрами электретных свойств еще на этапе изготовления.

Примечательно то, что при включении блока зарядки аэрозолей (+9 кВ) и подаче заряженных частиц проскок сразу падает в ~72 раза - до 1,1%. Это говорит о том, что электростатических механизм фильтрации вносит основной вклад в эффективность.

Таблица 4.3	
Показатель	Значение
Перепад давления, Па	26
Расчётный интегральный проскок при заданном распределении, %	96,0
Расчётный фактор качества механической фильтрации, $Па^{-1}$	0,0016
Экспериментальный проскок незаряженных частиц, %	79,48
Фактор качества для незаряженных частиц, $Па^{-1}$	0,0088
Проскок заряженных частиц, %	1,10
Фактор качества для заряженных частиц, $Па^{-1}$	0,1735

4.2 Влияние полярности коронного разряда

Одним из эксплуатационных параметров электретных фильтров является полярность коронного разряда. Полярность играет важную роль в эффективности зарядки аэрозольных частиц и осаждения заряда на материале электретного фильтра [102], а также влияет на количество образующегося озона [55]. Согласно [55] отрицательная корона дает больше озона чем положительная. Озон, образующийся при коронном разряде, может выполнять дополнительную функцию обеззараживания в системах фильтрации воздуха. В литературе показана высокая эффективность газообразного озона в отношении ряда воздушных бактерий и грибов, а также возможность его совместного применения с HEPA-фильтрацией [111, 103]. При этом эффективность инактивации существенно зависит от вида микроорганизма, концентрации озона, времени контакта и относительной влажности. Мы в своей работе не преследовали цель изучать процессы образования озона, однако проверить влияние полярности короны на проскок полезно с точки зрения дальнейшего проектирования воздухоочистительных установок.

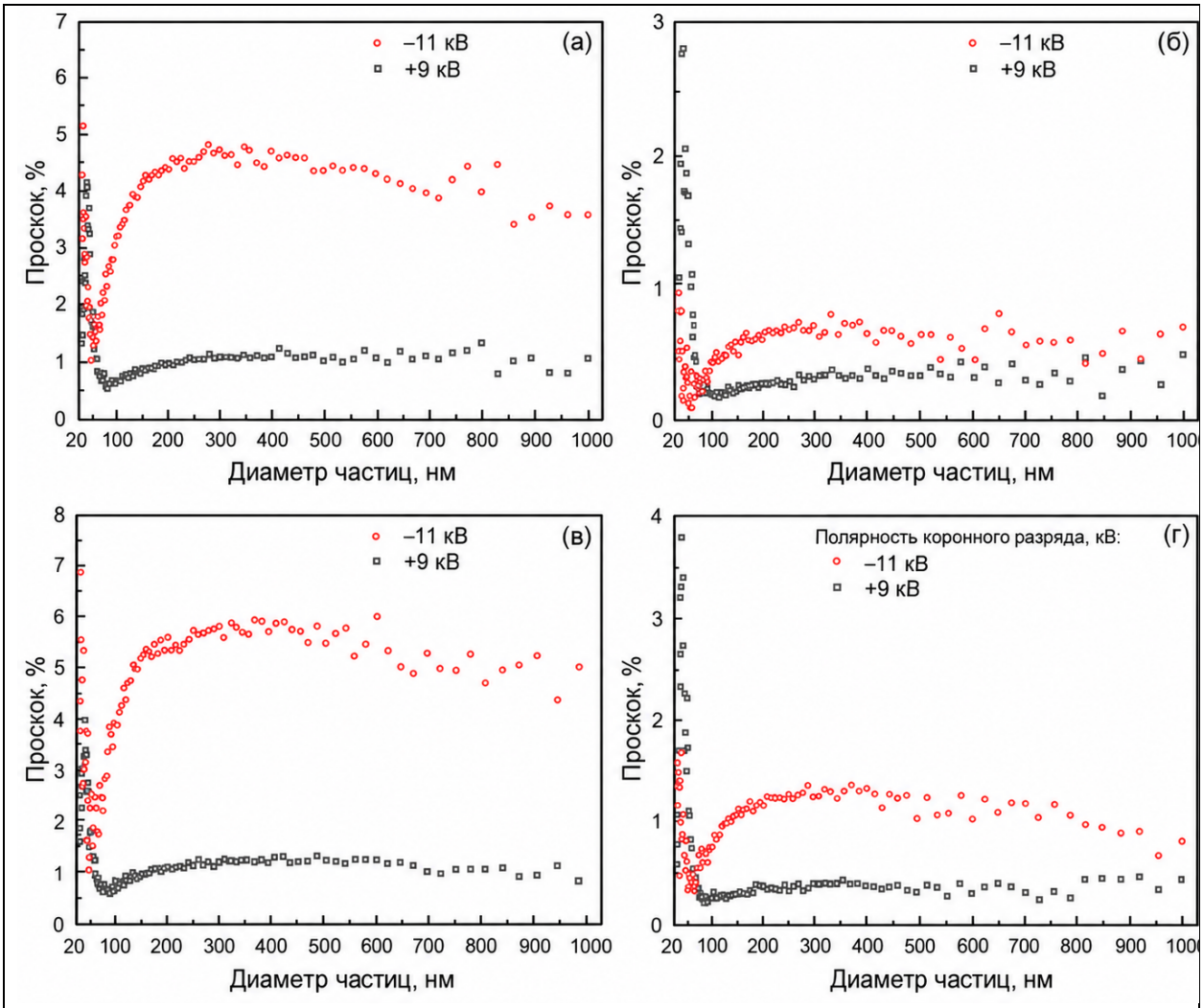


Рисунок. 4.3 Зависимость проскока от размера частиц для фильтра, испытанного при различной полярности коронного разряда. Скорость воздушного потока 215 м3/ч Параметры изготовления фильтра (частота вращения шпули и давление прикатки: а) 120 об/мин, 15 кПа; б) 120 об/мин, 50 кПа; в) 70 об/мин, 50 кПа ; г) 200 об/мин, 25 кПа

Испытания при напряжениях –11 кВ и +9 кВ на разных фильтрах показали во всех случаях, что при использовании положительно заряженных частиц, проскок ниже в 2-5 раз, чем при отрицательно заряженных

Так, проскок для фильтра, изготовленного при давлении прикатки 25 кПа и скорости вращения шпули 190 об/мин, составляет 0,45 % при использовании положительного коронного разряда и 0,85 % — при

использовании отрицательного. Та же тенденция наблюдается и для фильтров, изготовленных при других технологических параметрах (Рисунок. 4.3 а, б, в, г)

Следует также отметить, что при использовании отрицательного коронного разряда наблюдается более резкая зависимость проскока от размера частиц в диапазоне 50–200 нм по сравнению с положительным коронным разрядом.

Таким образом показано, что для частиц аэрозоля DEHS эффективность работы при положительной зарядке аэрозолей выше, чем при отрицательной.

4.3 Исследование влияния типа аэрозоля на эффективность фильтра

Данный раздел посвящён исследованию влияния типа аэрозоля на проскок частиц через полученные фильтры на основе электретных полипропиленовых волокон.

Это исследование имеет важное значение для оптимизации работы фильтра в реальных условиях эксплуатации, поскольку аэрозоли, встречающиеся как внутри помещений, так и в окружающей среде (масляные аэрозоли, пыль, сажа, оксиды), существенно различаются по своим физическим и химическим свойствам, включая распределение частиц по размерам и их зарядовое состояние [104].

Эти различия могут влиять на характер взаимодействия частиц с фильтрующим материалом [105 - 107]. Например, как механические, так и электростатические фильтры не обеспечивают одинаковую степень улавливания частиц во всём диапазоне размеров, а различное влияние

коронного разряда на разные типы аэрозолей может изменять эффективность их улавливания электростатическими силами.

Мы в своей работе проверяли проскок на следующих модельных аэрозолях (таблица 4.3):

Таблица 4.3. Типы использованных в работе аэрозолей

Аэрозоль	**Способ получения**	**Характерные особенности**
масляный туман на основе DEHS	Генератор Ласкина	Жидкий диэлектрический аэрозоль
на основе технического углерода	Искровой генератор	Твердый проводящий неметаллический аэрозоль
Ni_xO_y	Искровой генератор	Проводящий аэрозоль
Al_2O_3	Искровой генератор	Диэлектрический негигроскопичный аэрозоль
KI	Термический генератор конденсации паров из расплава KI	Гигроскопичный аэрозоль

Ниже на рисунках 4.4 (а, б, в, г, д) приведены полученные распределения различных частиц по размерам до и после фильтра.

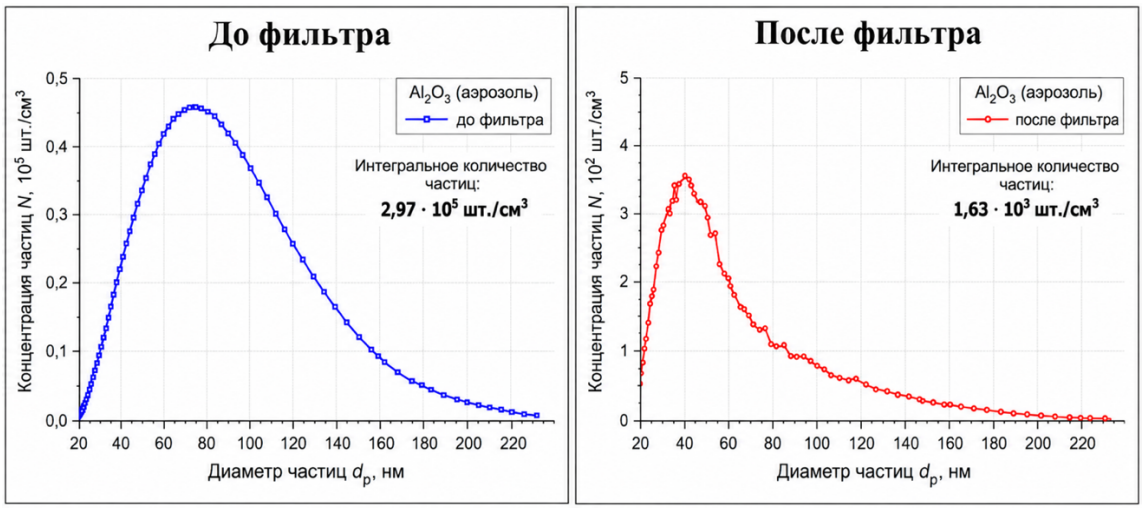


Рисунок 4.4 (а) Распределение частиц по размерам до и после фильтра для аэрозолей Al_2O_3

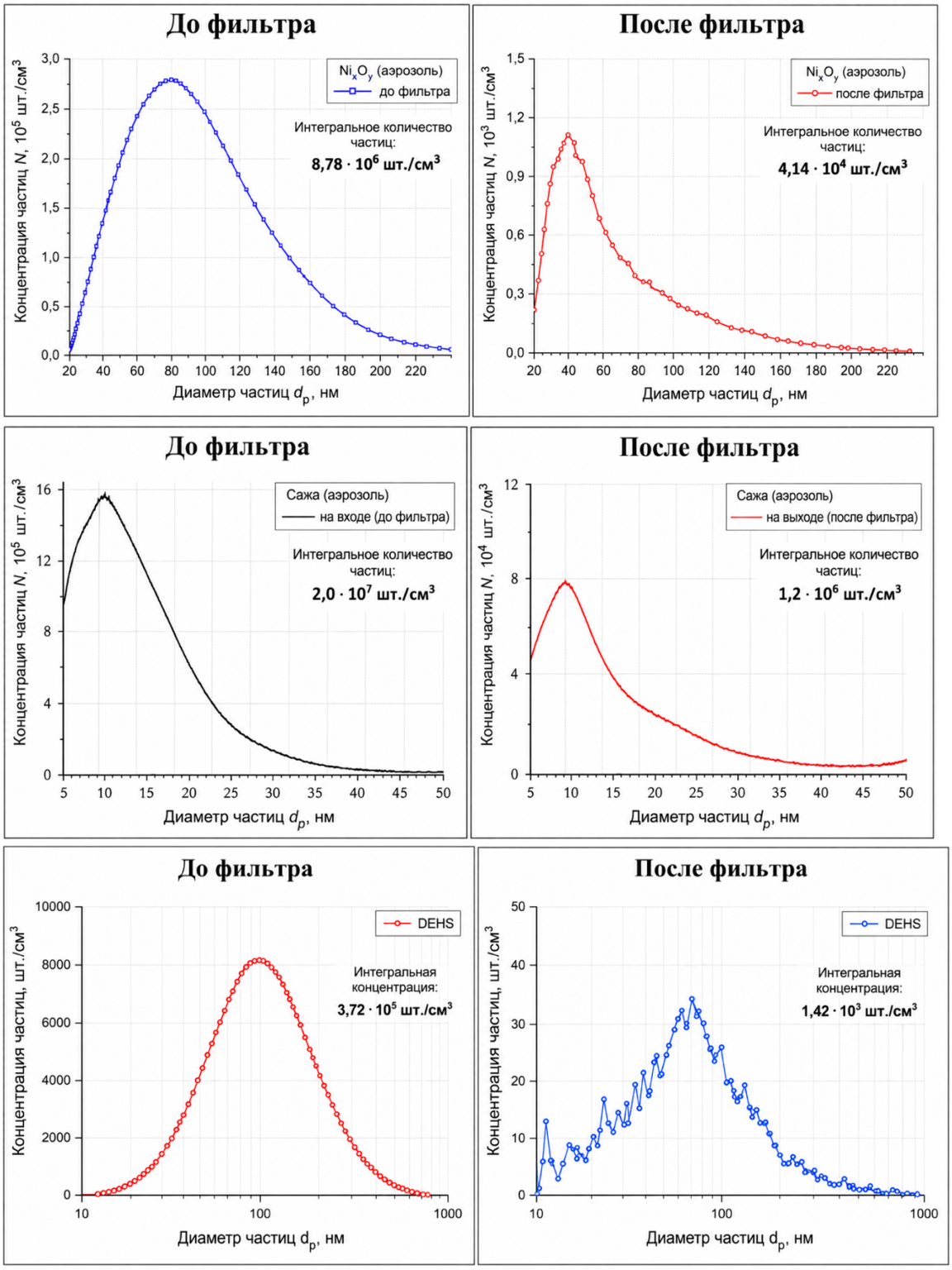


Рисунок 4.4 (б, в, г.) Распределение частиц по размерам до и после фильтра для аэрозолей Ni_xO_y, сажа, DEHS

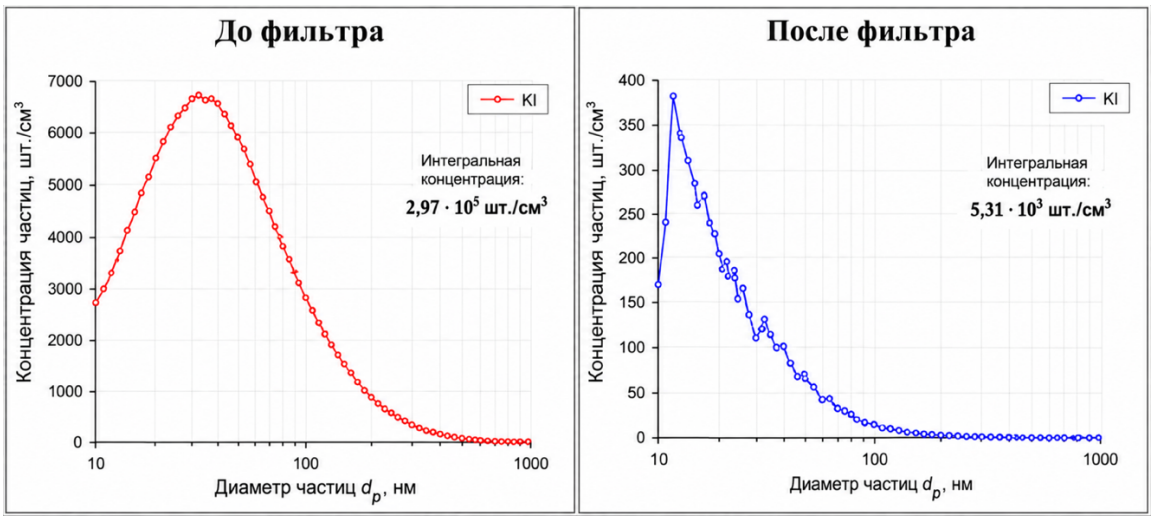


Рисунок 4.4 (д) Распределение частиц по размерам до и после фильтра для аэрозолей KI,

Таблица 4.4 Проскок для различных частиц на одинаковых фильтрах				
Вид аэрозоля	$N_{до}$, шт./см³	$N_{после}$, шт./см³	Интегральный проскок, %	Эффективность, %
DEHS (масляный туман)	$3{,}72 \cdot 10^5$	$1{,}42 \cdot 10^3$	0,38	99,62
Ni_xO_y	$8{,}78 \cdot 10^6$	$4{,}14 \cdot 10^4$	0,47	99,53
Al_2O_3	$2{,}97 \cdot 10^5$	$1{,}63 \cdot 10^3$	0,55	99,45
KI (йодид калия)	$2{,}97 \cdot 10^5$	$5{,}31 \cdot 10^3$	1,79	98,21
Сажа	$\approx 2{,}0 \cdot 10^7$	$\approx 1{,}2 \cdot 10^6$	≈6,0	≈94,0

Из приведенных данных видно, что фильтры являются высокоэффективные по всем видам аэрозолей кроме сажи. Мы дополнительно проверили и сравнили улавливание сажи и DEHS на разных фильтрах (изготовленных при разных технологических параметрах). Результаты приведены в таблице 4.5 ниже:

Таблица 4.5. Проскок на различных фильтрах. Сравнение DEHS и сажи					
Фильтр	Частота вращения шпули (об/мин)	Давление Прикатки (кПа)	Диаметр фильеры (мм)	DEHS (20–900 nm)	сажа (6–37 nm)
				215 $м^3$ $ч^{-1}$	215 $м^3$ $ч^{-1}$
1	130	25	0,6	0.26±0.05%	4.62±1.56%
2			0,8	0.36±0.06%	6.03±1.58%
3	190			1.11±0.01%	9.61±2.35%
4	130			2.31±0.02%	17.45±1.57%

Из анализа данных таблицы 4.5 можно заметить, что величины проскока по DEHS для фильтров 1 и 2 соотносятся как 0,26/0,36 = 0,72, а по углеродному аэрозолю 4,62/6,03 = 0,76. Также для фильтров 3 и 4: DEHS – 1,11/2,31 = 0,48, сажа – 9,61/17,45 = 0,55.

С практической точки зрения это означает, что если фильтр эффективно улавливает аэрозоль одного типа, то он также будет сравнительно эффективен и при улавливании аэрозоля другого типа.

4.4 Влияние времени зарядки фильтра на эффективность фильтрации

Зарядка фильтра на основе полипропиленовых волокон в нашей системе осуществляется преимущественно не в процессе изготовления, а за счёт осаждения заряда от аэрозольных частиц, которые, в свою очередь, получают заряд вследствие коронного разряда. Таким образом, очевидно предположить, что заряд на полимерных волокнах возникает не мгновенно, а зависит от количества предварительно захваченных аэрозольных частиц. Данный раздел посвящён установлению зависимости эффективности фильтра от времени его зарядки для достижения наиболее эффективной работы системы. Кроме того,

вполне очевидно, что процесс зарядки в этом случае зависит не только от времени зарядки, но также от расхода воздуха и концентрации аэрозольных частиц.

Далее была определена эффективность фильтра при различных временах его зарядки. Концентрация прошедших через фильтр частиц измерялась вследующих контрольных временных точках — через 5, 45, 90, 180, 225 минут. На рисунке 4.5 показано, что проскок частиц через фильтр зависит от времени зарядки.

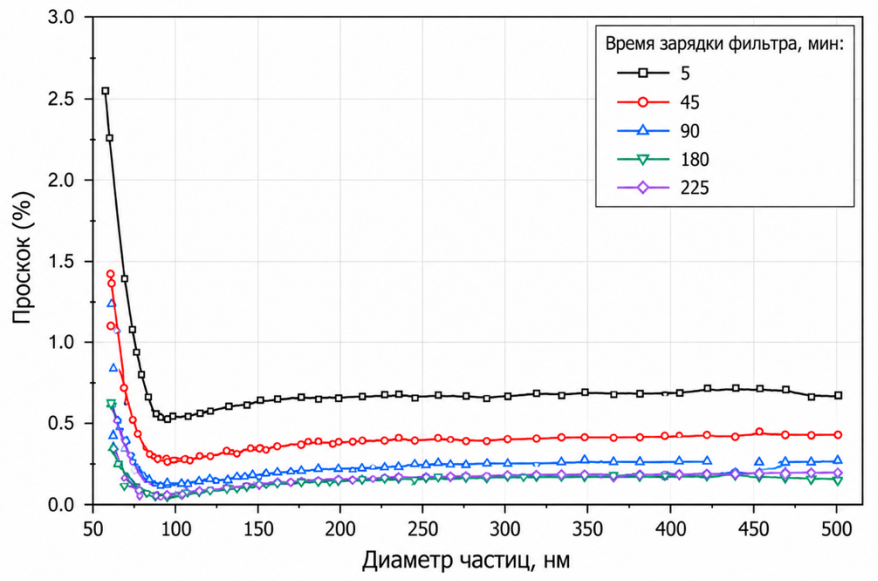


Рисунок 4.5 Зависимость проскока частиц от их размера при различных временах зарядки фильтра — 5, 45, 90, 180, 225 минут

Как видно, увеличение времени выдержки в потоке заряженных аэрозольных частиц существенно влияет на величину проскока частиц. Так, на рисунке 4.5 показано, что увеличение времени зарядки фильтра с 5 до 180 минут снижает суммарный проскок соответственно с 0,68 до 0,17%. В длительных испытаниях установлено, что насыщение по значению проскока достигается примерно через 180 минут зарядки, после чего эффективность фильтра больше не изменяется.

По всей видимости, рост эффективности фильтра с увеличением времени его зарядки объясняется тем, что вследствие осаждения большего количества заряженных загрязняющих частиц на волоконном фильтре он приобретает более высокий заряд. Однако рост не продолжается вечно, что, по-видимому, связано со стоком заряда

4.5 Разработка методики измерения суммарного заряда всего фильтра

Для проверки связи между эффективностью фильтра и его электрическими свойствами была разработана методика измерения суммарного заряда и локального потенциала.

Для измерения суммарного заряда фильтра q_f использовали клетку Фарадея с подключенным к ней электростатическим киловольтметром. Данная методика позволила оценить величину суммарного заряда цилиндрического фильтра длиной до 500 мм и внешним диаметром до 260 мм. Методика заключалась в измерении разности потенциалов $U_{\text{фарадея}}$ между внутренней и внешней обкладками клетки Фарадея внутри которой располагался исследуемый фильтр (рис 4.6). Измерения представляли собой следующую последовательность действий:

1) Помещали клетку Фарадея внутрь системы фильтрации.
2) Заземляли внешнюю обкладку клетки Фарадаея, а к внутренней обкладке подключали электростатический киловольтметр
3) Сдвигали клетку так, чтобы фильтр полностью оказался внутри нее.
4) Включали систему фильтрации и подавали аэрозоль для зарядки фильтра.
5) Снимали показания с электростатического киловольтметра.

Измеряемое значение напряжения $U_{\text{фарадея}}$ прямо пропорциональны суммарному заряду фильтра q_f, согласно выражению:

$$q_f = C_1 \cdot U_{\text{фарадея}} \cdot k, \quad (4.1)$$

где q_f – суммарный заряд фильтра, C_1 – емкость между внутренней и внешней обкладками клетки 171±1 пФ (измерена *LCR*-метром), $U_{\text{фарадея}}$ – значение потенциала, измеренное электростатическими киловольтметрами и k – поправочный коэффициент из-за перфорации внутренней обкладки равный 1,8.

Из выражения (4.1) видно, что для определения суммарного заряда с использованием клетки Фарадея необходимо учитывать перфорацию клетки, ее открытую часть, измеренную емкость C1 между внутренней и внешней обкладками клетки. Из теоремы Гаусса следует, что на внутренней обкладке клетки Фарадея значение нескомпенсированного заряда равно суммарному заряду фильтра (для полностью закрытой клетки). Однако, клетка содержит перфорацию и открытую часть, таким образом значение суммарного заряда будет отличаться в 1,8 раз (1/0,55) так как закрытая часть клетки составляет примерно 55% всей поверхности.

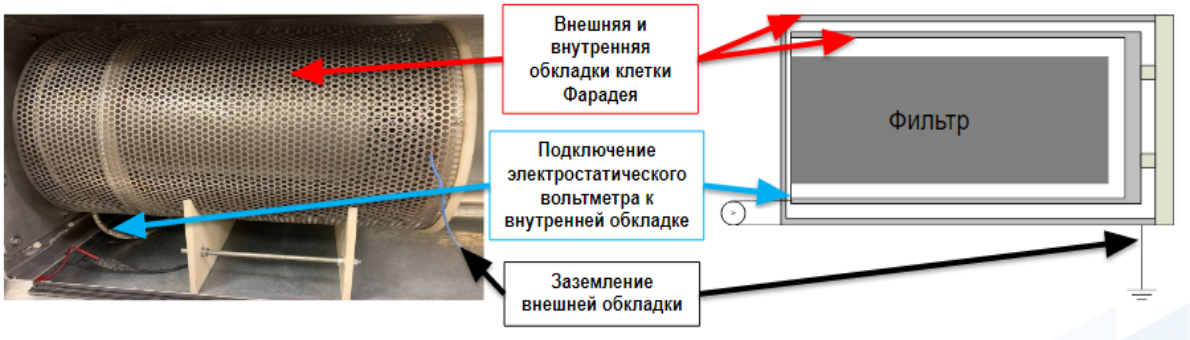


Рисунок 4.6 Реальное (слева) и схематичное (справа) изображение клетки Фарадея в режиме измерения суммарного заряда фильтра q_f.

В измерениях использовалась клетка Фарадея, выполненная в форме цилиндра с внешним и внутренним диаметром обкладок равным 340 и 280 мм, соответственно. Материал клетки - перфорированная нержавеющая сталь AISI 304 Rv 6-8 толщиной 1 мм. Соединительные элементы изготовлены из капролона (полиамид ПА-6) с высоким удельным сопротивлением. Исходя из емкости клетки C_1=171±1 пФ и диапазона измерений киловольтметров (от 100 В до 30 кВ) доступный диапазон измерения заряда от 15 до 5000 нКл. Внешний вид электростатических киловольтметров, используемых в измерениях, представлен на рисунках 4.7 (а, б).

(а)





(б)

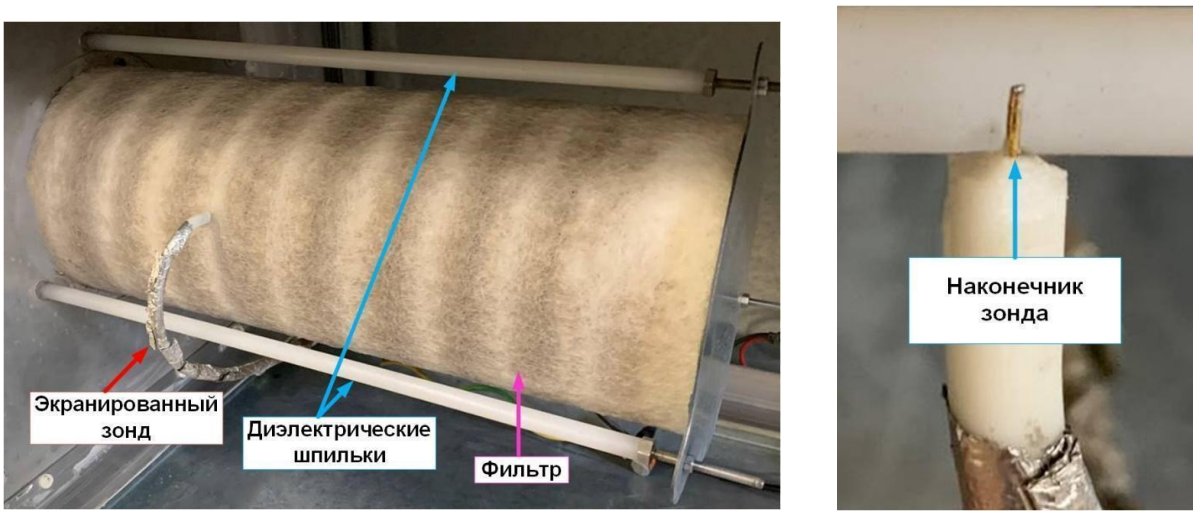
Рисунок 4.7 (а) электростатический вольтметр С509 (класс точности 0,5) с диапазоном измерений от 0,1 до 1 кВ; (б) электростатический вольтметр С96 (класс точности 1,5) с диапазоном измерений от 1 до (7,5-30) кВ.

Таким образом разработанная нами методика позволила измерять суммарный заряд фильтров в широком диапазоне от 15 до 5000 нКл в режиме реального времени.

4.6 Методика измерения локального потенциала in-situ.

Для in-situ измерения локального потенциала φ_{local} на поверхности фильтра была разработана методика, заключавшаяся в использовании зонда, подключенного к электростатическому киловольтметру, с измерением потенциала в различных участках фильтра. Зонд представляет собой высоковольтный кабель ПМВКл-1,5-25, экранированный фольгой, с медным наконечником длиной 5 мм и толщиной 0,7 мм. На рисунке 4.8 представлены фотографии присоединенного к фильтру зонда (а) и его вид вблизи (б).

Для начала измерений наконечник зонда вводился в исследуемый участок фильтра. По мере зарядки фильтра на зонд стекают заряды до тех пор, пока электрический потенциал зонда не сравняется с потенциалом исследуемого участка. Таким образом электростатический киловольтметр показывает значение локального потенциала φ_{local} на поверхности участка фильтра. Измеряя потенциал в различных участках фильтра можно построить его распределение по поверхности, например, рядом с заземляющей проволокой или на расстоянии от нее. Так как киловольтметр измеряет потенциал непрерывно, то это также позволяет устанавливать зависимости потенциала от времени или концентрации аэрозольных частиц. В данной методике использовали киловольтметры С509 и С96. Диапазон измерений локального потенциала φ_{local} по данной методике составляет от 100 В до 30 кВ.



(а) (б)

Рисунок 4.8 Фотографии присоединенного к фильтру зонда (а) и его наконечника (б).

Разработанная методика позволила измерять локальный потенциал на поверхности фильтра in-situ в диапазоне от 100 до 30 кВ.

4.7 Исследование влияния конфигурации заземляющего электрода на локальный потенциал и суммарный заряд фильтра

Ранее мы показали, что эффективность фильтрации растет до некоторой величины с течением времени зарядки. Из этого следует, что заряд фильтра может играть ключевую роль в улавливании аэрозолей. В первую очередь было определено влияние конфигурации заземляющего электрода на заряд, накапливаемый фильтром. В фильтрах, где заряд накапливается вследствие осаждения предварительно заряженных аэрозольных частиц, наличие заземляющего электрода важно для предотвращения электрического пробоя и воспламенения фильтрационной системы. Это техническое решение фигурирует в нашем патенте [109] Этот электрод способствует отводу

избыточного заряда из фильтра и влияет на взаимодействие аэрозоля с фильтром.

В качестве заземляющего электрода использовалась стальная проволока различной длины, что обеспечивало различное количество витков вокруг цилиндрического фильтра, а также различную глубину залегания. Локальный потенциал измерялся на одинаковом расстоянии между витками проволоки и непосредственно над витком. В таблице 4.6 приведены значения локального потенциала и суммарного заряда для фильтров с различной длиной проволоки при постоянной глубине залегания 1 мм. Замеры производились после стабилизации проскока, и выхода на «насыщение» по электрическому состоянию по той же методике, по которой производился замер проскока в засисимости от времени зарядки.

Таблица 4.6. Потенциал и заряд от длины проволоки.

Длина проволоки (м)	Количество витков	Локальный потенциал (kV)		Суммарный заряд (нКл)
		Между витками	Над витком	
13.9	36	0.3	0.1	37
6.4	17	1.0	0.3	92
3.8	10	2.2	0.7	119
1.9	4	3.5	1.0	151

Результаты измерений показывают, что значения локального потенциала в областях между витками и над заземляющей проволокой различаются примерно в три раза в пользу участка между витками. Кроме того, при уменьшении длины заземляющей проволоки с 13,9 до 1,9 м и, соответственно, количества витков с 36 до 4 наблюдается увеличение значений локального потенциала на поверхности фильтра в областях между витками проволоки (с 0,3 до 3,5 кВ) и над проволокой (с 0,1 до 1 кВ). Также

видно, что суммарный заряд фильтра увеличивается с 37 до 151 нКл по мере уменьшения длины проволоки.

Дополнительно было проведено исследование зависимости локального потенциала и суммарного заряда от глубины расположения заземляющего электрода.

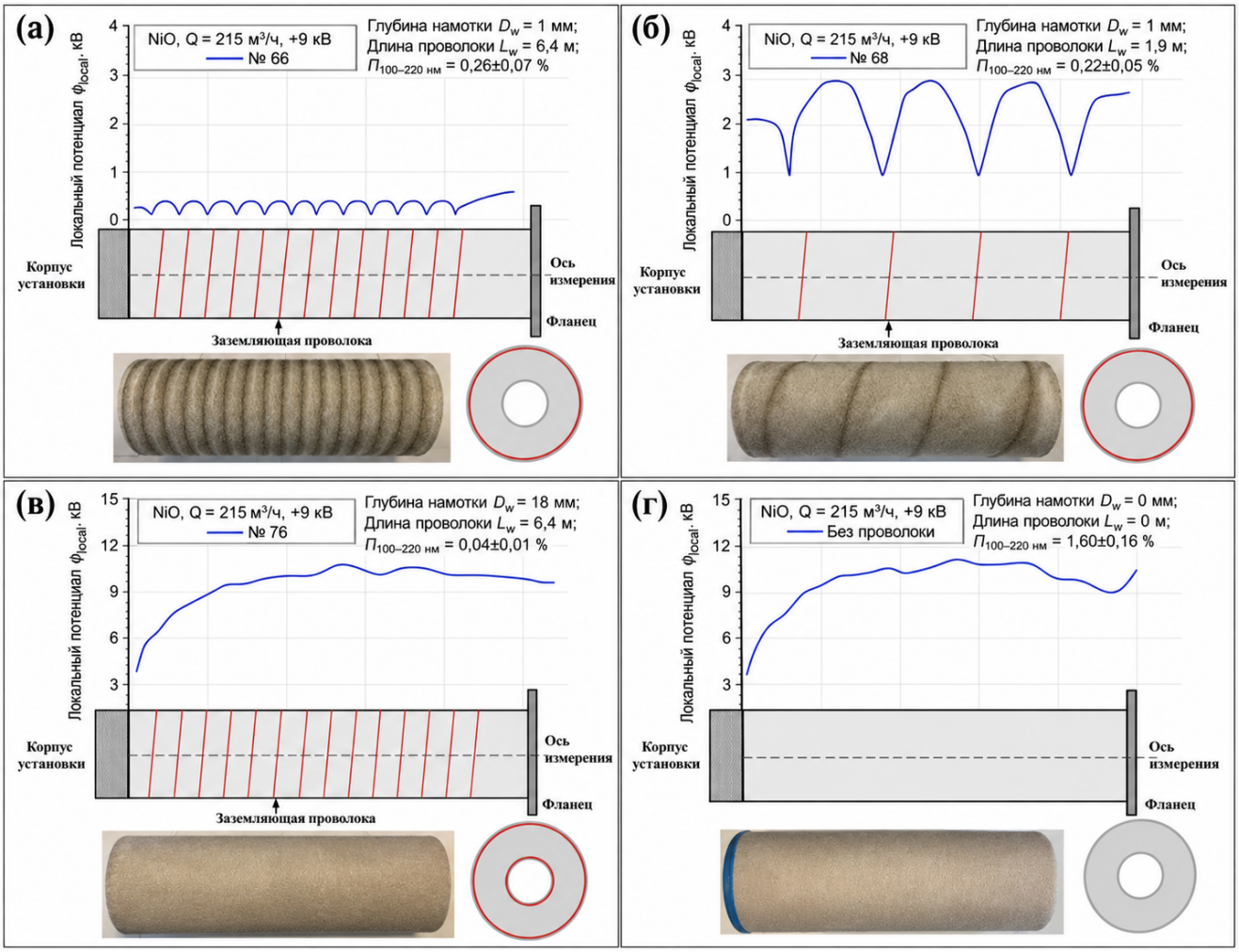


Рисунок 4.9 Распределения локального потенциала φ_{local} на поверхности фильтров с различной длиной проволоки L_w и глубиной намотки D_w: а) L_w=6,4 м, D_w=1 мм; (б) L_w=1,9 м D_w=1 мм; (в) L_w=6,4 м, D_w=18 мм, (г) фильтра без проволоки.

На рисунке 4.9 представлены несколько конфигураций фильтра, а именно: фильтр с длиной проволоки 6,4 м и глубиной внедрения проволоки 1 мм; фильтр с длиной проволоки 1,9 м и глубиной внедрения 1 мм; фильтр с

длиной проволоки 6,4 м и глубиной внедрения 18 мм; а также фильтр без встроенной проволоки и полученные для них параметры.

Рассматривая влияние глубины внедрения заземляющего электрода, можно предположить, что будет изменяться полное сопротивление фильтра, которое должен преодолеть заряд для стекания к электроду (рис. 4.10).

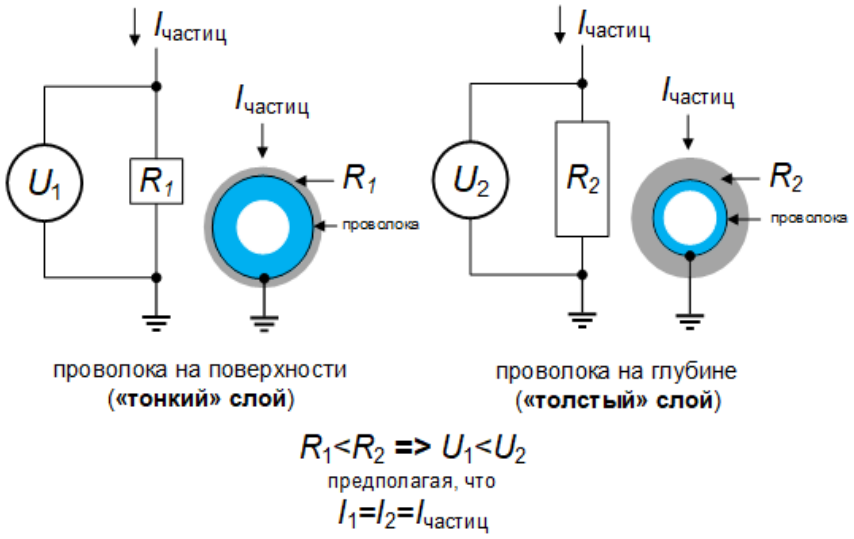


Рисунок 4.10 Схематическое изображение влияния глубины залегания проволоки на потенциал фильтра.

Там, где проволока расположена ближе к поверхности, слой фильтра тоньше и, следовательно, сопротивление этого слоя ниже, то есть R1<R2. Поэтому для протекания электрического тока потребуется меньшее напряжение (заряд), то есть U1<U2. Поскольку напряжение связано с зарядом, суммарный заряд фильтра с глубоко расположенной проволокой будет больше.

На рисунке 4.9 показано, что распределение локального потенциала сильно зависит от глубины расположения заземляющего электрода и его длины. Так, фильтры с проволокой, расположенной близко к поверхности (1 мм), имеют волнообразное распределение потенциала с минимальным

значением вблизи проволоки и максимальным значением между её витками (рис. 4.9 а и б). Минимальные и максимальные значения локального потенциала различаются в несколько раз; например, для фильтра с длиной проволоки 1,9 м эти значения составляют соответственно 1,0 и 3,5 кВ.

На рис. 4.9 (а) и (б) также показано, что амплитуда и период волнообразного распределения потенциала связаны с длиной проволоки: чем короче проволока, тем больше амплитуда и период колебаний потенциала. Более того, среднее значение потенциала также увеличивается с 0,3 до 2,0 кВ при уменьшении длины проволоки с 6,4 до 1,9 м.

Кроме того, следует отметить, что по мере увеличения глубины внедрения электрода разница в локальном заряде над электродом и между витками выравнивается. Так, при глубине 13 мм локальный потенциал составляет 10,5 кВ как между витками, так и над проволокой.

Полученные данные показывают, что параметры намотки проволоки существенно влияют на заряд фильтра, который изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен нКл. Установлено, что при глубине внедрения заземляющего электрода 3, 7, 9 и 13 мм суммарный заряд составлял соответственно 95, 179, 302 и 426 нКл.

Таким образом, проволока, расположенная ближе к внешней поверхности фильтра, ограничивает перемещение заряда вглубь фильтра, поскольку значительная часть зарядов притягивается проволокой и стекает вблизи поверхности фильтра. Такая проволока действует как собирающий электрод, притягивая заряженные частицы и удаляя заряд с волокон фильтра.

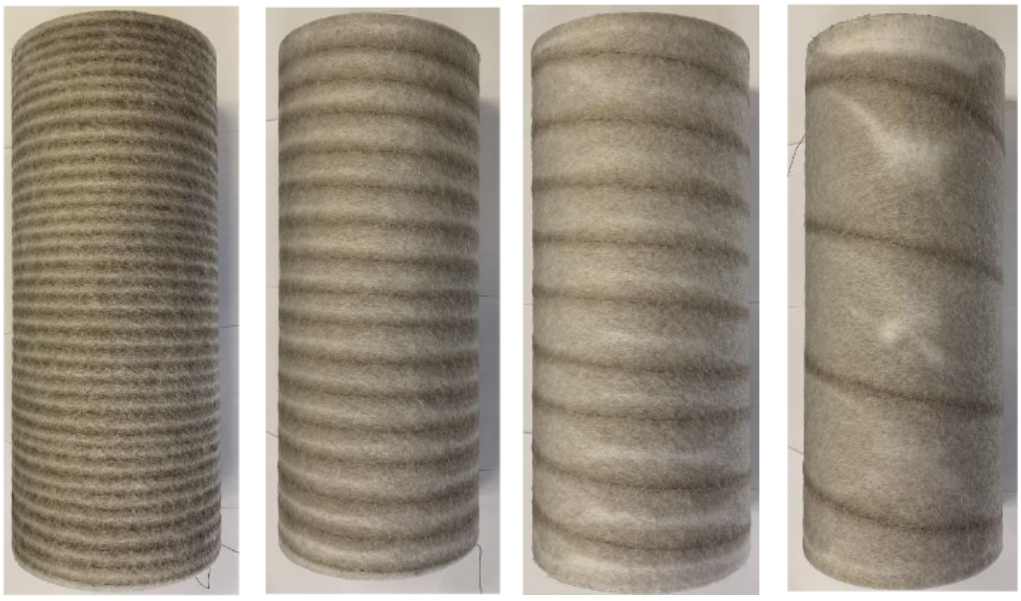
В другом случае — для фильтра с глубоким залеганием проволоки (18 мм), а также для фильтра без проволоки — падение потенциала вблизи проволоки не наблюдается и, как следствие, отсутствует волнообразное

распределение потенциала. Кроме того, такие фильтры имеют более высокие значения потенциала, который возрастает и достигает постоянной величины по мере удаления от заземлённого корпуса (рис. 4.9 в, г).

Очевидно, что различия в распределении локального потенциала будут влиять на эффективность и запылённость фильтров. Фотографии фильтров под графиками на рис. 4.9 показывают, что фильтры с проволокой, расположенной близко к поверхности (1 мм), имеют сильно запылённые области возле проволоки (тёмные полосы из наночастиц NiO), тогда как фильтр с глубоко расположенной проволокой (18 мм) и фильтр без проволоки характеризуются более равномерной запылённостью.

На рис. 4.9 (в) видно, что левая часть фильтра, расположенная ближе к корпусу, также имеет более тёмную окраску. Появление этих тёмных областей, наряду с полосами на других фильтрах, можно объяснить тем, что заряженные частицы стремятся в области с низким потенциалом возле проволоки или корпуса. Можно предположить, что в процессе работы фильтра прохождение частиц через эти области будет увеличиваться, поскольку их проводимость со временем возрастает, а потенциал уменьшается.

На рис. 4.11 показано влияние длины проволоки на характер запыления фильтров.



Фильтр № 65 Фильтр № 66 Фильтр № 67 Фильтр № 68

Рисунок 4.11. Фотографии фильтров #65–68, запыленные в течение 90 мин наночастицами оксида никеля NiO.

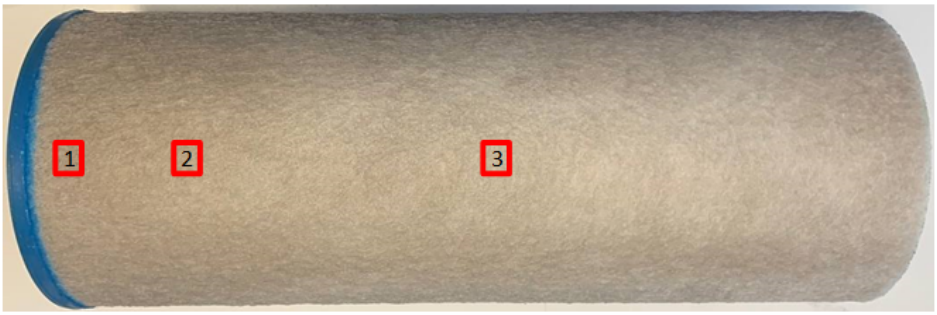
Из рисунка видно, что фильтры с длинной проволокой (13,9 и 6,4 м) сильно загрязнены возле проволоки, тогда как фильтры с небольшим количеством витков (3,8 и 1,9 м) имеют свободные от пыли светлые области между витками проволоки. Эти области соответствуют зонам высокого потенциала и позволяют эффективно отклонять заряженные частицы. Следовательно, фильтры с короткой проволокой будут характеризоваться низкими значениями проскока аэрозольных частиц.

Таким образом, установлено, что увеличение локального потенциала и суммарного заряда фильтра может быть достигнуто за счёт уменьшения длины заземляющего электрода (то есть уменьшения количества витков) и/или увеличения глубины внедрения заземляющего электрода, поскольку увеличение длины проволоки обеспечивает большую площадь разряда для фильтра, тогда как увеличение глубины расположения проволоки приводит к

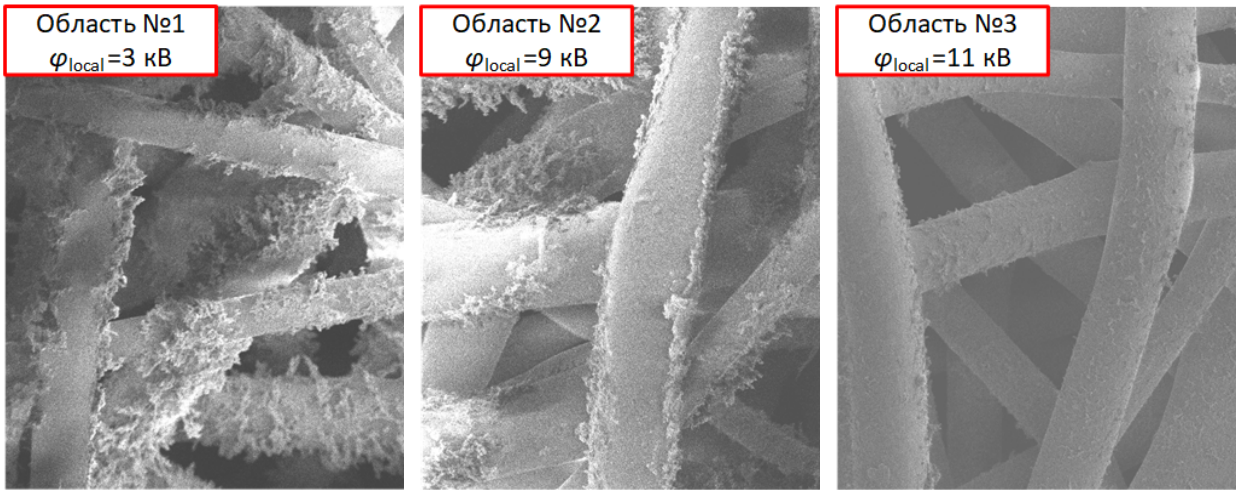
росту сопротивления, которое должен преодолеть заряд для стекания через заземление.

4.8 Микроскопическое исследование поверхности фильтра после эксплуатации

Для изучения зависимости количества осаждённых частиц оксида никеля от локального потенциала поверхности фильтра были получены РЭМ-микрофотографии различных участков поверхности фильтра как без электрода, так и с заземляющим электродом.



(а)



(б) (в) (г)

Рисунок. 4.12 (а) Фотография фильтра без проволоки с указанием исследованных областей поверхности фильтра на РЭМе; (б–г) РЭМ изображения областей поверхности фильтра без проволоки с различными локальными потенциалами.

На фильтре без электрода (рис. 4.12 а) были исследованы три области с различными измеренными значениями локального потенциала: область №1 с

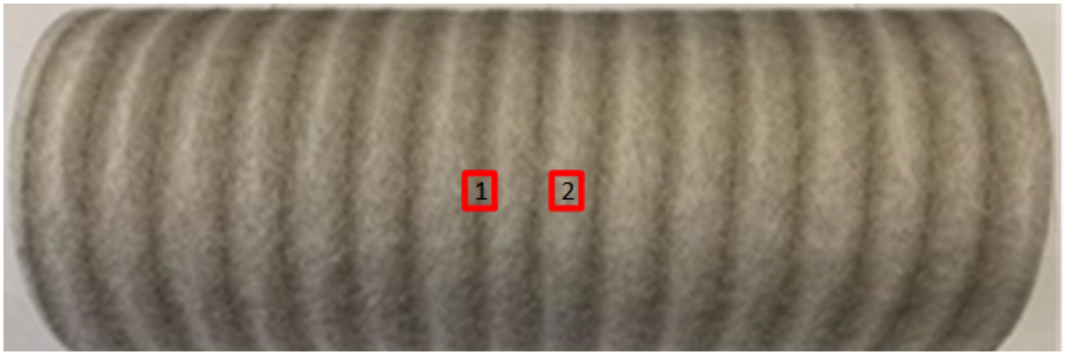
φlocal = 3 кВ, область №2 с φlocal = 9 кВ и область №3 с φlocal = 11 кВ. Различия локального потенциала обусловлены расстоянием до корпуса, через который заряд частично рассеивается с фильтра.

РЭМ-изображения (рис. 4.12 б–г) различных участков поверхности фильтра показывают, что наличие заземляющего электрода обеспечивает более низкий локальный потенциал в окружающей области, что приводит к большему притоку аэрозольных частиц в эту зону. Напротив, в областях между витками проволоки локальный потенциал выше, что вызывает отталкивание частиц из этой зоны.

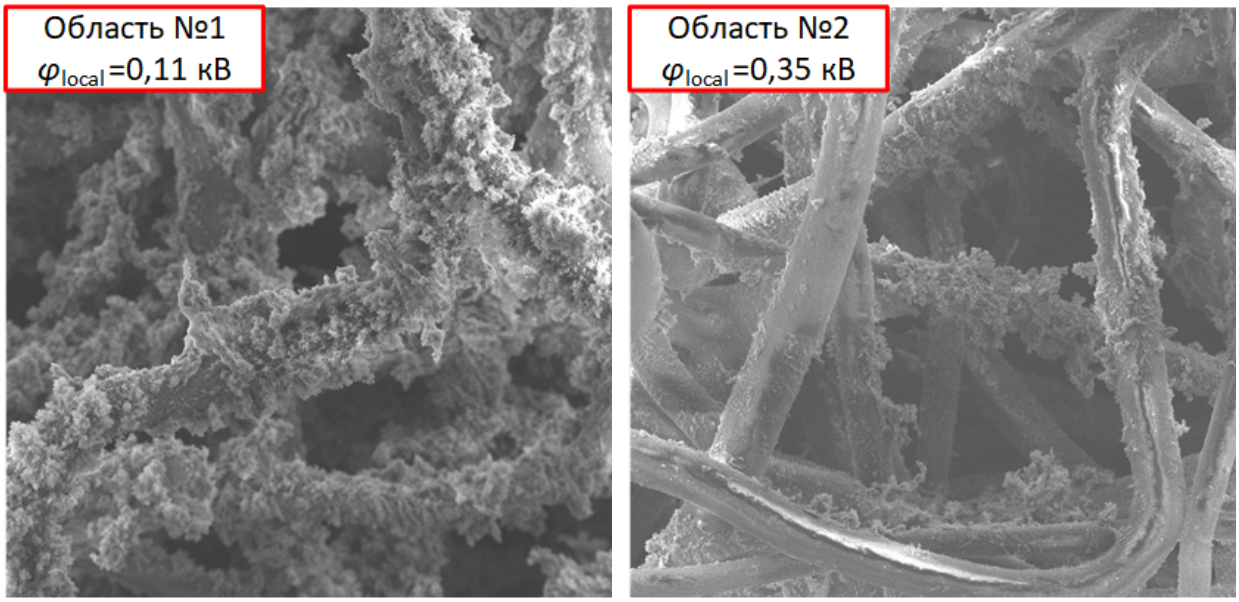
Таким образом, область фильтра возле корпуса разряжается значительно легче, что приводит к снижению локального потенциала в данной зоне. Заряженные частицы движутся по пути наименьшего сопротивления и концентрируются в слабо заряженной области фильтра (вблизи корпуса), что подтверждается наличием обширной тёмной области на фильтре.

В этой области частицы улавливаются менее эффективно, что (в сочетании с большим потоком заряженных частиц через данный участок) приводит к снижению эффективности фильтрации. Поэтому для достижения более равномерного распределения локального потенциала по поверхности фильтра и, как следствие, увеличения суммарного заряда фильтра необходимо изолировать фильтр от корпуса путём формирования диэлектрических прокладок на концах фильтра или на элементах корпуса фильтрационной системы.

На фильтре с заземляющим электродом (рисунок. 4.13, а) были исследованы области поверхности фильтра над проволокой (№1) с локальным потенциалом φlocal = 0,11 кВ и между витками проволоки (№2) с локальным потенциалом φlocal = 0,35 кВ.



(а)



(б) (в)

Рисунок. 4.13. (а) Фотография фильтра без проволоки с указанием исследованных областей поверхности фильтра на РЭМе; (б-в) РЭМ изображения областей поверхности фильтра с проволокой с различными локальными потенциалами.

На рисунке. 4.13 (б,в) представлены РЭМ-изображения участков поверхности фильтра над проволокой и между витками соответственно.

РЭМ-изображения поверхности фильтра на различных расстояниях от заземляющего электрода показывают, что волокна в области возле проволоки с локальным потенциалом φlocal = 0,11 кВ покрыты аэрозольными частицами значительно сильнее, чем в области между витками проволоки с локальным потенциалом φlocal = 0,35 кВ.

Можно предположить, что не только заземляющий электрод способствует разряду фильтра, но и слой аэрозольных частиц, что приводит к снижению локального потенциала в этой области. Заряженные частицы движутся по пути наименьшего сопротивления и концентрируются в слабо заряжённых областях фильтра (вблизи проволоки), что подтверждается наличием тёмных полос.

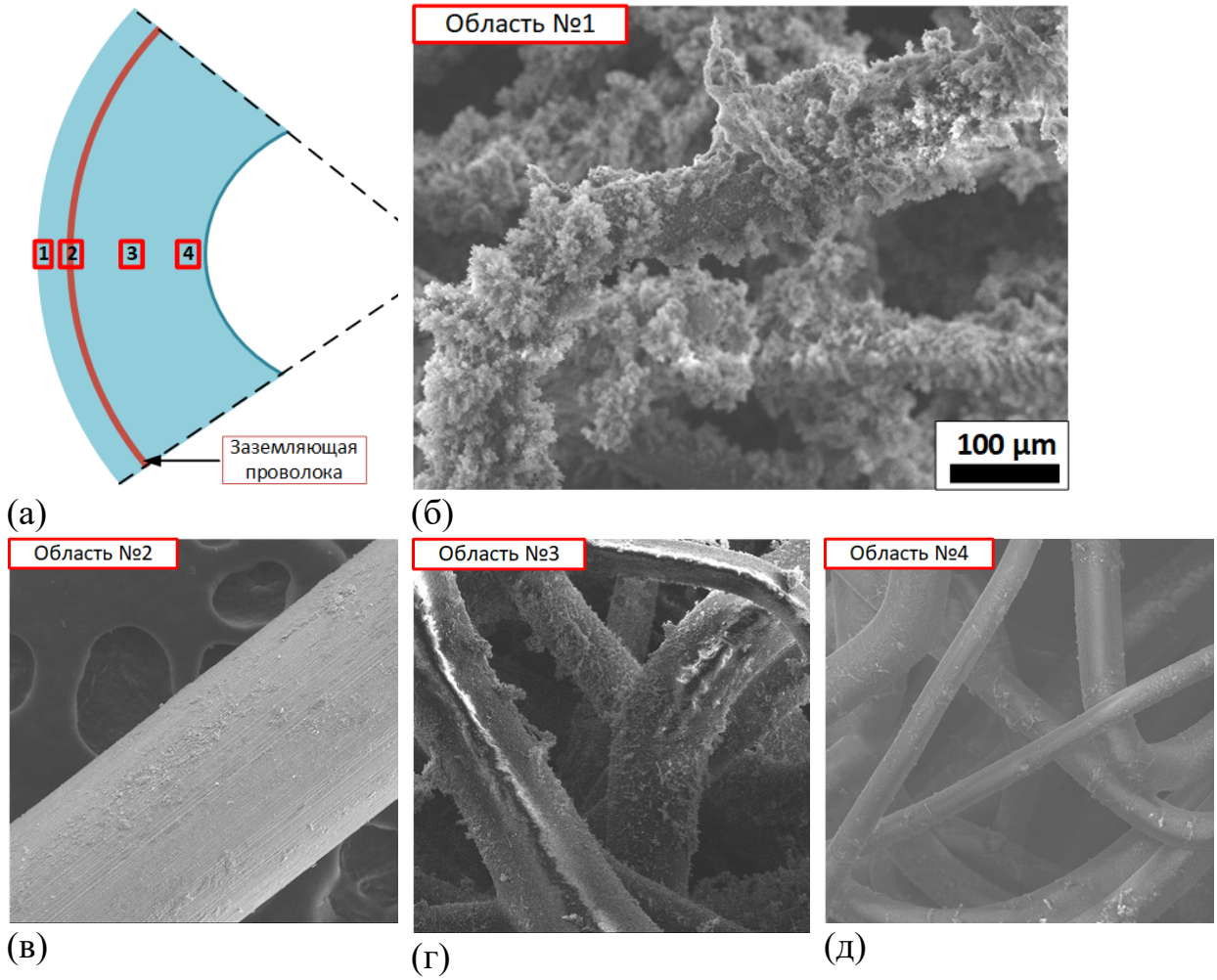


Рисунок 4.14 (а) Схематичное изображение исследуемых на РЭМ-е областей фильтра на различной глубине; (б-д) РЭМ изображения волокон фильтра на различной глубине от внешнего корда и заземляющей проволоки.

Аналогичным образом была исследована запылённость волокон фильтра в зависимости от глубины их расположения. Схематическое изображение

исследованных областей фильтра и соответствующие РЭМ-изображения представлены на рисунке 4.14.

Анализ РЭМ-изображений волокон, полученных на различных глубинах фильтра, показал, что количество аэрозольных частиц, осаждённых на волокнах, уменьшается с увеличением глубины их расположения.

РЭМ-изображение заземляющей проволоки (рисунок. 4.14 в) показывает, что на ней практически не осаждаются аэрозольные частицы.

4.9 Исследование зависимости эффективности фильтрации от конфигурации заземляющего электрода

Эффективность фильтров исследовалась в зависимости от длины заземляющего электрода. Для исследуемых фильтров определялось значение проскока аэрозольных частиц NiO. На рисунке 4.15 (а) показана зависимость проскока аэрозольных частиц на основе NiO от размера частиц при различных длинах заземляющего электрода.

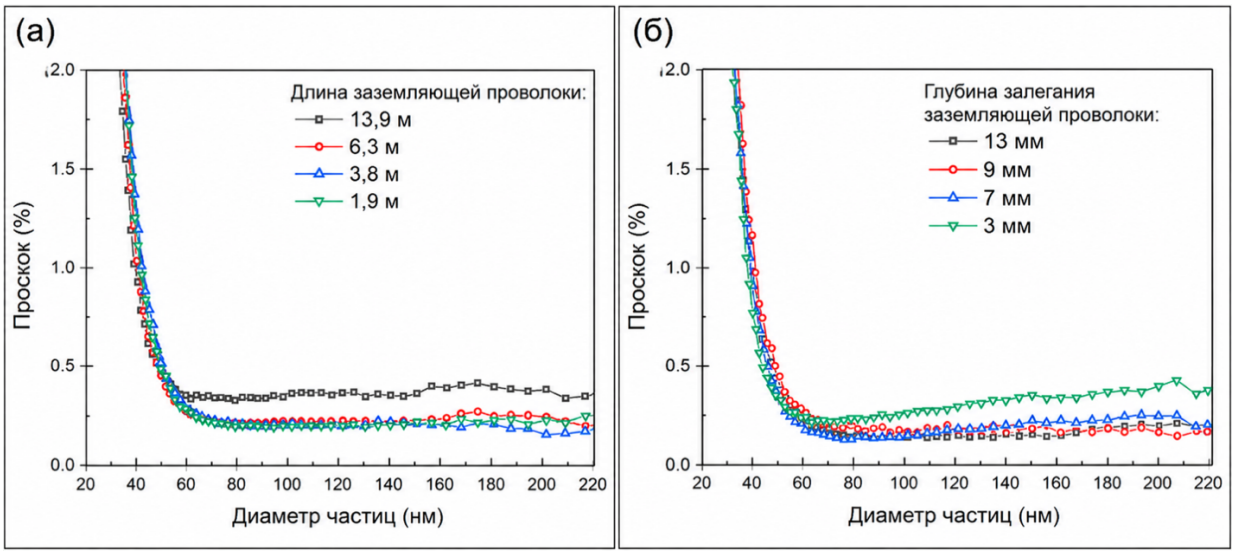


Рисунок 4.15. (а) зависимость проскока аэрозольных частиц на основе NiO от размера частиц при различных длинах заземляющего электрода; (б) зависимость проскока аэрозольных частиц на основе NiO от размера частиц при различных глубинах намотки заземляющего электрода

Полученные данные показывают, что величина проскока зависит от длины заземляющей проволоки: чем длиннее проволока, тем выше коэффициент проникновения аэрозольных частиц. Например, интегральное проникновение аэрозольных частиц NiO (100–220 нм) через фильтры с длиной проволоки 1,9 м и 13,9 м составляет соответственно 0,23% и 0,38%.

Как было показано ранее, более длинный заземляющий электрод (большее количество витков) приводит к уменьшению суммарного заряда фильтра. Поскольку эффективность улавливания аэрозольных частиц зависит от заряда фильтра, можно предположить, что длина проволоки влияет на заряд, а заряд, в свою очередь, влияет на величину проникновения частиц.

В таблице 4.8 представлены результаты измерения интегрального значения проскока частиц NiO через фильтры с различной длиной заземляющего электрода.

Таблица 4.8 Зависимость проскока аэрозольных частиц NiO от длины заземляющего электрода (при постоянной глубине залегания 1 мм).

Длина проволоки (м)	Суммарный заряд (нКл)	Проскок для частиц 100-220 нм (%)	Проскок для частиу 6-220 nm particles (%)
13.9	37	0.38±0.07	0.51±0.04
6.3	92	0.25±0.07	0.44±0.03
3.8	119	0.23±0.05	0.45±0.03
1.9	151	0.23±0.05	0.46±0.04

Таким образом, показано, что увеличение длины (и числа витков) заземляющего электрода приводит к снижению заряда фильтра и, как следствие, уменьшению эффективности фильтра.

Также была исследована эффективность фильтров при различных глубинах внедрения заземляющего электрода. Значение проникновения

аэрозольных частиц измерялось для диапазона глубин внедрения проволоки от 3 до 13 мм (рис. 4.15 б). Дополнительно в таблице 4.8 представлены интегральные значения проникновения аэрозольных частиц и суммарного заряда фильтра в зависимости от глубины расположения заземляющего электрода.

Таблица 4.8 Зависимость проскока аэрозольных частиц NiO от глубины залегания заземляющего электрода (при постоянной длине заземляющего электрода 6,3 м)

Глубина залегания проволоки (мм)	Суммарный заряд (нКл)	Проскок для частиц 100-220 нм (%)	Проскок для частиу 6-220 nm particles (%)
3	95	0.29±0.03	0.38±0.05
7	179	0.17±0.06	0.38±0.06
9	302	0.17±0.02	0.34±0.04
13	426	0.14±0.02	0.33±0.04

Рисунок 4.15 (б) и данные таблицы показывают, что чем глубже расположена проволока, тем выше заряд фильтра и тем меньше проникновение через фильтр. Например, при увеличении глубины расположения заземляющего электрода с 3 до 13 мм суммарный заряд возрастает с 95 до 426 нКл. Это приводит к уменьшению проскока аэрозольных частиц (100–220 нм) с 0,29 до 0,14%.

Ранее было показано влияние длины и глубины расположения проволоки на суммарный заряд фильтра. Кроме того, было установлено, что заземляющий электрод влияет на отвод заряда. Отвод заряда, то есть ток, был измерен при помощи пикоамперметра Keithley 617 Programmable Electrometer. Заземляющая проволока была подключена одним концом к пикоамперметру, другой конец проволоки находился в фильтре и гальванически был отвязан от корпуса установки и заземления.

Так, на рисунке 4.16 показано, что отвод заряда через глубоко расположенную проволоку меньше, чем через проволоку, находящуюся у поверхности.

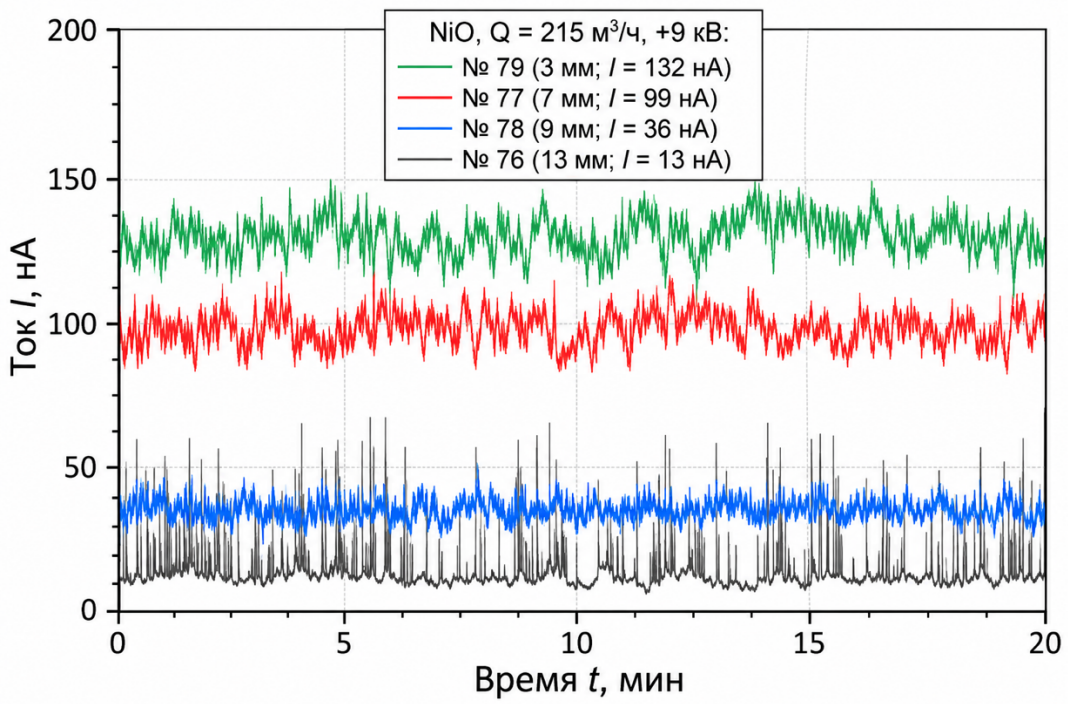


Рисунок 4.16. Зависимость тока заземления от глубины залегания проволоки.

По мере увеличения глубины заземляющей проволоки величина тока заземления. Это связано с тем, что при высоком потенциале фильтра заряд начинает стекать по другим путям (под действием сильного поля он не достигает фильтра, а осаждается на корпусе либо начинает утекать с поверхности фильтра на корпус, не доходя до проволоки).

Таким образом, было установлено, что фильтры с внешним расположением заземляющего электрода (3 мм) улавливают аэрозольные частицы примерно в два раза хуже по сравнению с фильтрами с глубоким расположение электрода (13 мм), поскольку при глубоком расположении увеличиваются суммарный заряд и потенциал фильтра.

Также подробно исследовалось влияние параметров фильтруемого потока — размера аэрозольных частиц и их концентрации — на ток заземления фильтра.

4.10 Зависимость тока заземления от среднего размера частиц

Была исследована зависимость тока заземления фильтра от среднего размера аэрозольных частиц NiO. Параметры аэрозольного генератора были подобраны таким образом, чтобы средний размер частиц составлял приблизительно 56, 77 и 100 нм при постоянной концентрации частиц.

На рисунке 4.16 показаны распределение наночастиц по размерам перед фильтром (4.16а) и значения тока заземления, измеренные на заземляющем электроде для аэрозолей с различным средним размером частиц (4.16-б).

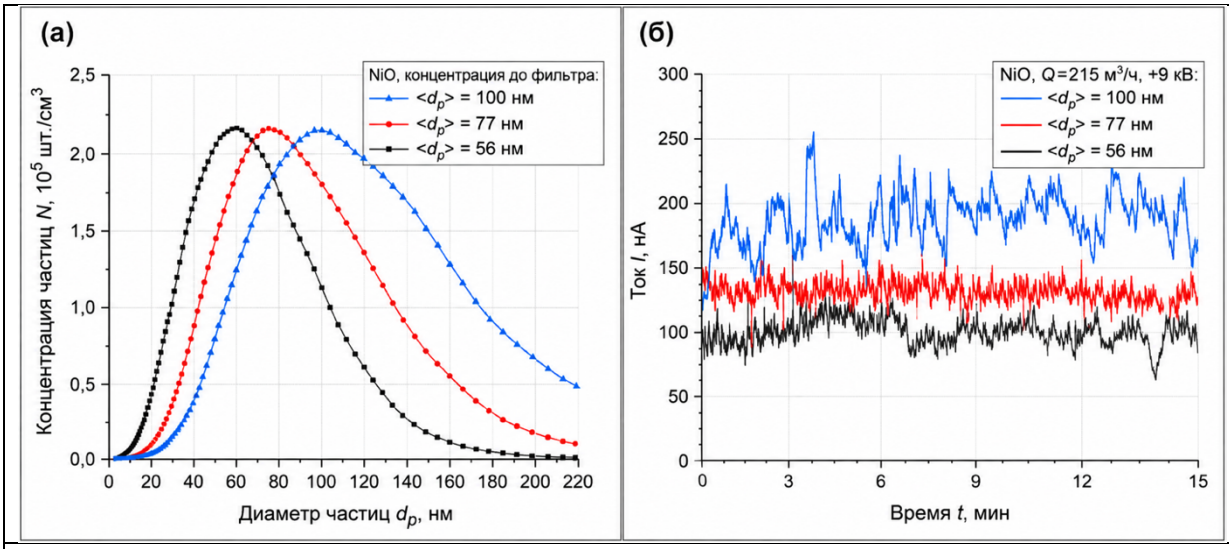


Рисунок 4.16 а) Распределение аэрозольных наночастиц по размерам перед фильтром; б) зависимость значений тока заземления от времени для различных средних размеров аэрозольных частиц.

Полученные значения тока заземления фильтра при различных средних размерах аэрозольных частиц показывают, что с увеличением среднего размера аэрозольных частиц ток, отводимый через заземляющую проволоку фильтра, возрастает.

Так, при увеличении среднего размера аэрозольных частиц с 56 до 100 нм ток увеличивается с 99 до 189 нА.

Следовательно, более крупные частицы несут больший заряд, который возрастает с $2{,}5 \cdot 10^{-19}$ до $4{,}7 \cdot 10^{-19}$ Кл на одну частицу в среднем, что, в свою очередь, приводит к увеличению тока заземления фильтра. Это же может приводить к большему суммарному равновесному заряду фильтра и повышать его эффективность. Отчасти это объясняет почему аэрозоли с более крупным распределением улавливаются лучше, чем более мелкие аэрозоли.

4.11 Зависимость тока заземления и суммарного заряда от массового расхода аэрозолей

Была исследована зависимость тока заземления и суммарного заряда фильтра от массового расхода аэрозоля при постоянном среднем диаметре наночастиц (80 ± 5 нм).

Распределение частиц по размерам, а также зависимости тока заземления и суммарного заряда фильтра от массового расхода аэрозоля представлены на рисунке 4.17:

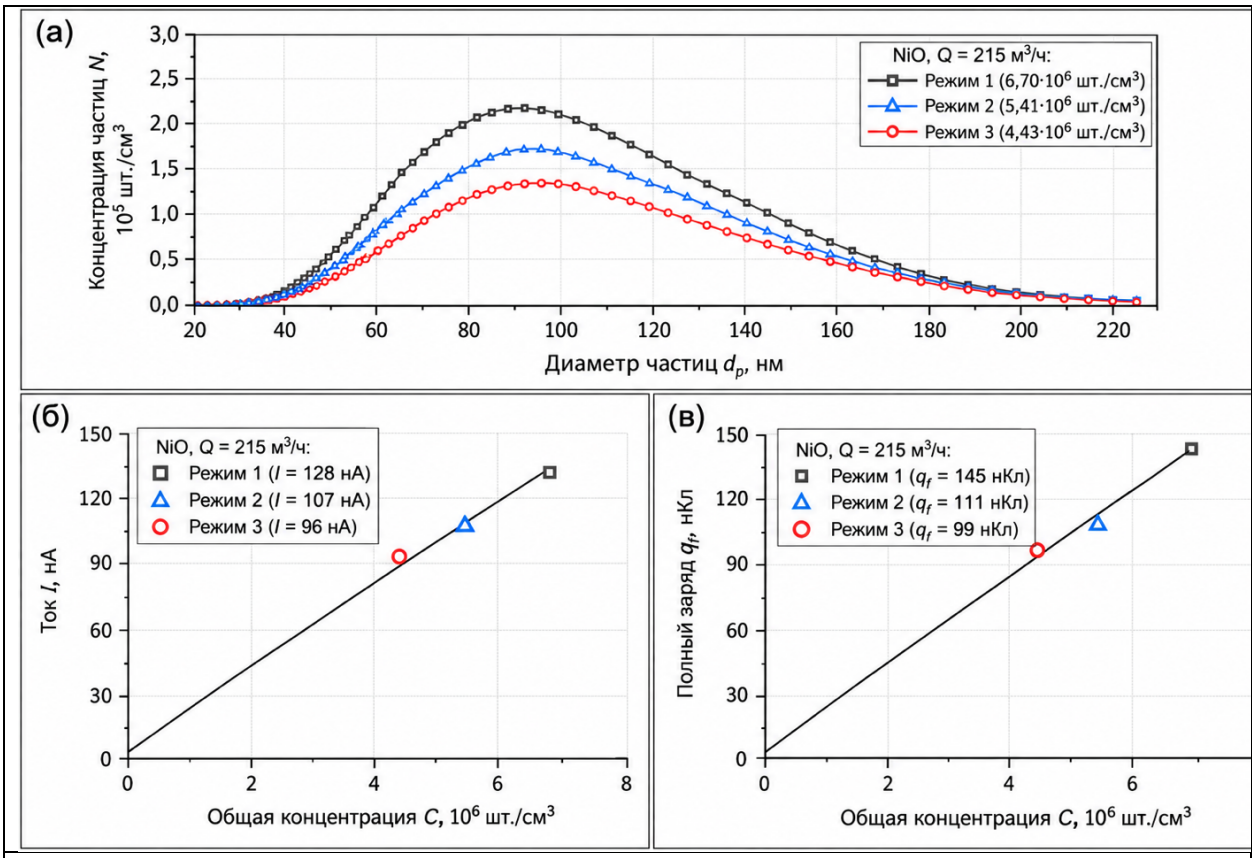


Рисунок 4.17. а) Распределение аэрозольных наночастиц по размерам перед фильтром; б) зависимость тока заземления; в) зависимость суммарного заряда фильтра от массовой производительности генератора

Полученные данные показывают, что при увеличении массовой производительности аэрозоля в генераторе (с $4{,}43 \cdot 10^6$ до $6{,}70 \cdot 10^6$ частиц/см³) при постоянном среднем размере частиц наблюдается увеличение значений тока заземления (с 96 до 128 нА), а также суммарного заряда фильтра (с 99 до 145 нКл).

С другой стороны, было изучено влияние величины расхода воздуха на ток заземления. (таблица 4.9):

Таблица 4.9 Результаты измерения тока заземления в зависимости от расхода воздуха.

Расход воздуха ($м^3$/ч)	Концентрация частиц на входе в установку ($\times 10^6$ # $см^{-3}$)	Ток заземления фильтра I (нА)
215	8.43	171 ± 10
340	5.33	178 ± 12
450	4.43	172 ± 12
550	3.71	180 ± 12

Продемонстрировано, что увеличение массового расхода аэрозоля повышает ток заземления фильтра и его суммарный заряд (рисунок 4.17), тогда как увеличение расхода воздуха практически не влияет на ток заземления (таблица 4.9).

Показано, что при увеличении расхода воздуха с 215 до 550 $м^3 \cdot ч^{-1}$ ток заземления фильтра практически не изменяется и находится в диапазоне 175 ± 15 нА. То есть важна не концентрация заряженных частиц, а именно их массовый поток.

Для более детального изучения влияния суммарного заряда фильтра на эффективность улавливания аэрозоля были измерены проскок аэрозольных частиц и суммарный заряд фильтра при различных концентрациях аэрозоля NiO при постоянном среднем размере частиц около 80 нм.

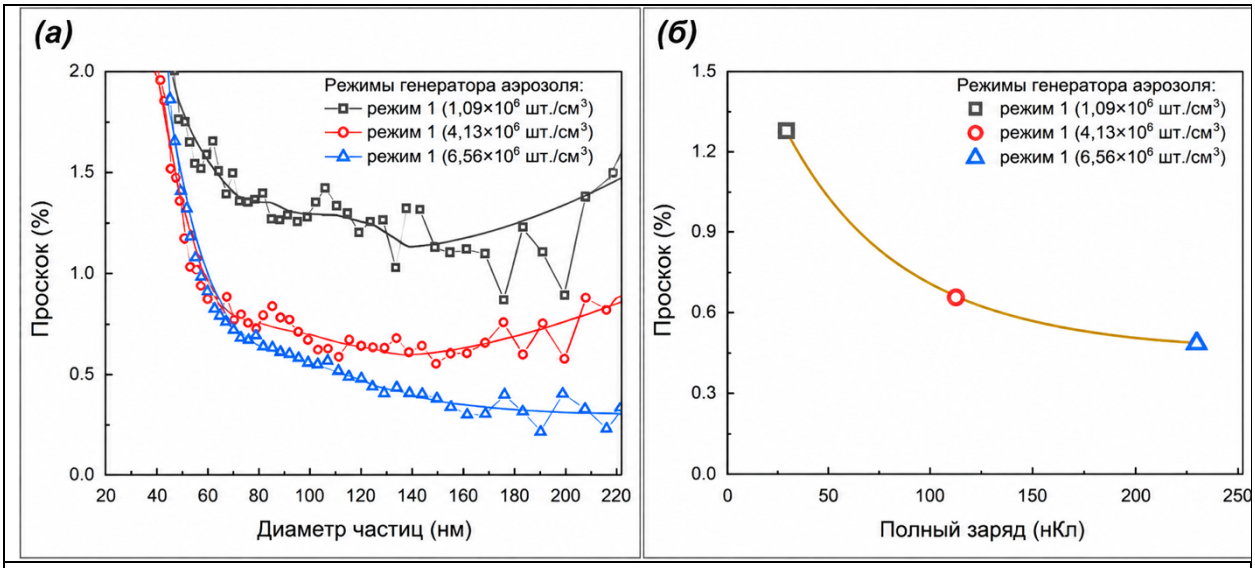


Рисунок. 4.18. а) Зависимость проскока от размера частиц при различной концентрации на входе; б) зависимость проскока от суммарного заряда фильтра при различной концентрации частиц на входе

На рис. 4.18 показана зависимость проскока частиц от их размера (рис. 8а) при трёх различных режимах работы аэрозольного генератора, обеспечивающих различные концентрации частиц NiO, а также зависимость проскока от суммарного заряда фильтра (рис. 4.18б). Таблица 4.10 содержит сводные результаты этого исследования.

Таблица 4.10. Значения суммарного заряда и проскока частиц при различных концентрациях поступающего аэрозоля NiO.

Режим работы генератора	Концентрация на входе 10^6 шт/см$^{-3}$)	Суммарный заряд фильтра (нКл)	Проскок для частиц 100-220 нм (%)
Режим 1	1.09	31	1.27±0.17
Режим 2	4.13	114	0.67±0.07
Режим 3	6.56	230	0.51±0.05

Из рисунка видно, что с увеличением концентрации аэрозоля в системе фильтрации суммарный заряд фильтра возрастает, а проникновение частиц уменьшается. Так, значения суммарного заряда составили 31, 114 и 230 нКл, а интегральные значения проникновения частиц (100–220 нм) — 1,27%, 0,67%

и 0,51% при концентрациях аэрозольных частиц 1,09; 4,13 и 6,56 × 10^6 частиц/см³ соответственно.

Таким образом, изменяя количество поступающего в единицу времени заряженного аэрозоля, было показано, что суммарный заряд напрямую влияет на проникновение частиц через фильтр.

На рис. 4.19 схематически показано влияние суммарного заряда фильтра на траектории частиц в фильтруемом потоке.

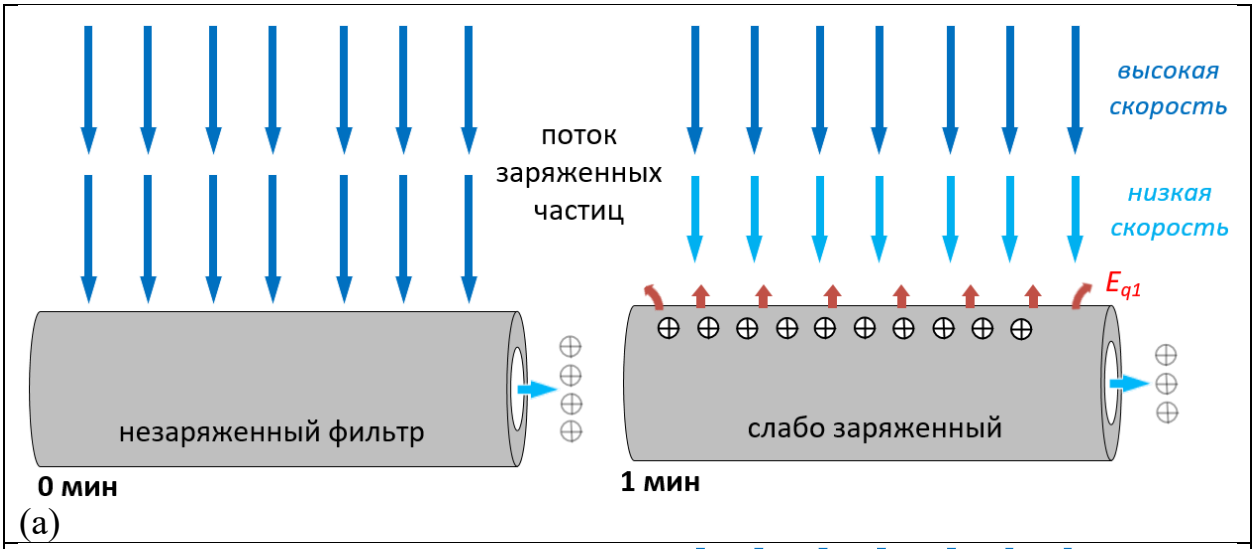


Рисунок. 4.19 Схематическое изображение влияния суммарного заряда на траекторию движения в зависимости от накопленного заряда

В начальный момент времени (t = 0 мин) фильтр не заряжен и не влияет на скорость входящих частиц (рис. 4.19а). Со временем фильтр приобретает заряд (t = 1 мин), и появляется электрическое поле Eq1, замедляющее входящие частицы.

Это замедление уменьшает скорость частиц и повышает эффективность их улавливания за счёт усиления поляризационного взаимодействия между волокном и частицей (силы изображения). Когда фильтр становится достаточно заряженным (t > 5 мин), его поле способно не только замедлять заряженные частицы, но и отклонять их в сторону заземлённого корпуса устройства (рис. 4.19 б).

На рисунке. 4.20 схематически показаны распределение локального электрического потенциала Eq и траектории частиц для фильтра с заземляющим электродом и без него.

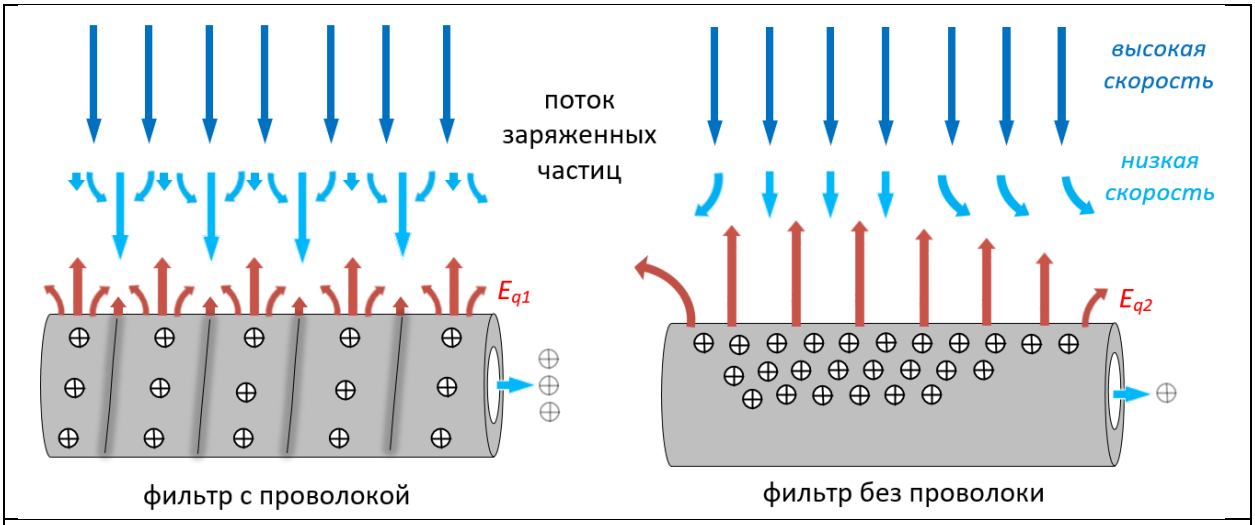


Рисунок.4.20 Схематическое изображение распределение напряженности (потенциала) электрического поля и траектории движения частиц для фильтра с проволокой и без проволок.

Фильтр с заземляющим электродом имеет неравномерное распределение потенциала по поверхности. Так, область фильтра возле проволоки обладает более низким потенциалом по сравнению с областями

между витками. Заряженные частицы движутся в область низкого потенциала вдоль линий электрического поля из заряжённых областей между витками.

Таким образом, частицы концентрируются возле проволоки, что экспериментально подтверждается наличием тёмных полос из осаждённых частиц. В этих областях частицы обладают высокой скоростью и поэтому улавливаются менее эффективно, что снижает эффективность фильтра.

В свою очередь, фильтр без проволоки имеет более равномерное распределение заряда и высокие значения потенциала по всей поверхности фильтра, вследствие чего обладает высокой эффективностью.

На рисунке 4.21 схематически показаны процессы зарядки и разрядки фильтра.

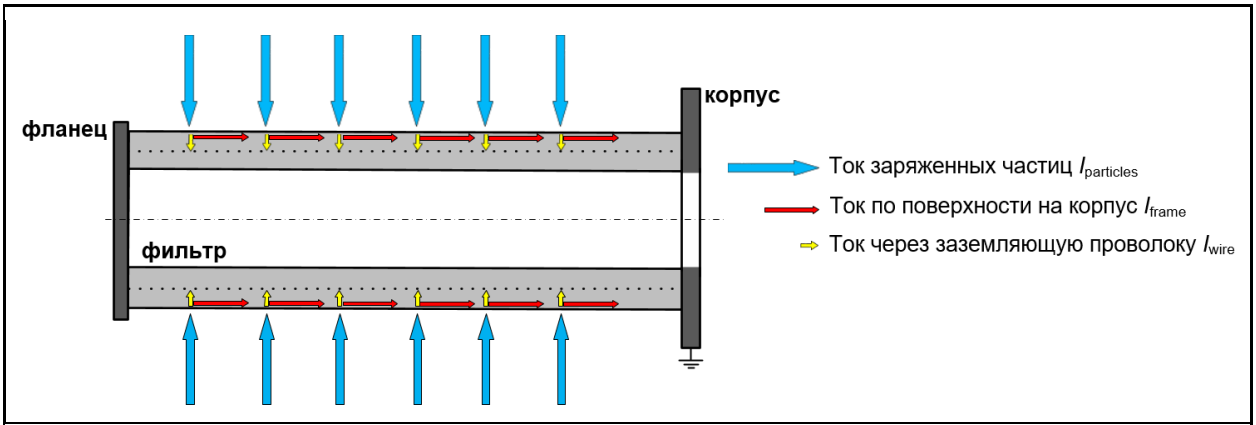


Рисунок 4.21. Схематическое изображение процесса зарядки и разрядки фильтра.

Заряд фильтра формируется потоком заряженных частиц $I_{particles}$, поступающих из фильтруемого воздушного потока. По мере накопления заряда происходит его стекание через заземляющий электрод Ielectrode и по поверхности фильтра на корпус I_{case}.

Фильтр достигает насыщения по заряду (dqf/dt = 0), когда ток поступающих частиц становится равным суммарному току утечки:

$$I_{particles} = I_{electrode} + I_{case}. \quad (4.2)$$

Максимальное значение суммарного заряда фильтра зависит от тока заряженных частиц $I_{particles}$, а значит — от эффективности их зарядки, размера и концентрации (или массового потока).

Согласно закону Ома, при постоянном сопротивлении (R_{filter} = const) увеличение суммарного тока утечки приводит к снижению напряжения и уменьшению заряда, накопленного фильтром qf.

Следовательно, чем длиннее заземляющий электрод и чем ближе он расположен к поверхности фильтра, тем сильнее отвод заряда и тем меньший заряд способен накопить фильтр.

Экспериментально показано, что максимальный суммарный заряд (и потенциал) достигается у фильтров без проволоки, поскольку в них ток может стекать только по поверхности к корпусу.

4.12 Исследование эффективности фильтра в зависимости от его поверхностной проводимости

Для подтверждения того, что области фильтра вблизи заземляющего электрода характеризуются более высокой степенью проникновения аэрозольных частиц, было исследовано влияние осаждения оксида никеля на фильтр на проникновение аэрозольных частиц, суммарный заряд фильтра и электрическую проводимость поверхности фильтра.

Измерения проникновения частиц, суммарного заряда и проводимости поверхности фильтра проводились с интервалом 30 минут.

На рисунке 4.22 показана зависимость проникновения аэрозольных частиц от их размера для фильтров с различной степенью аэрозольной нагрузки.

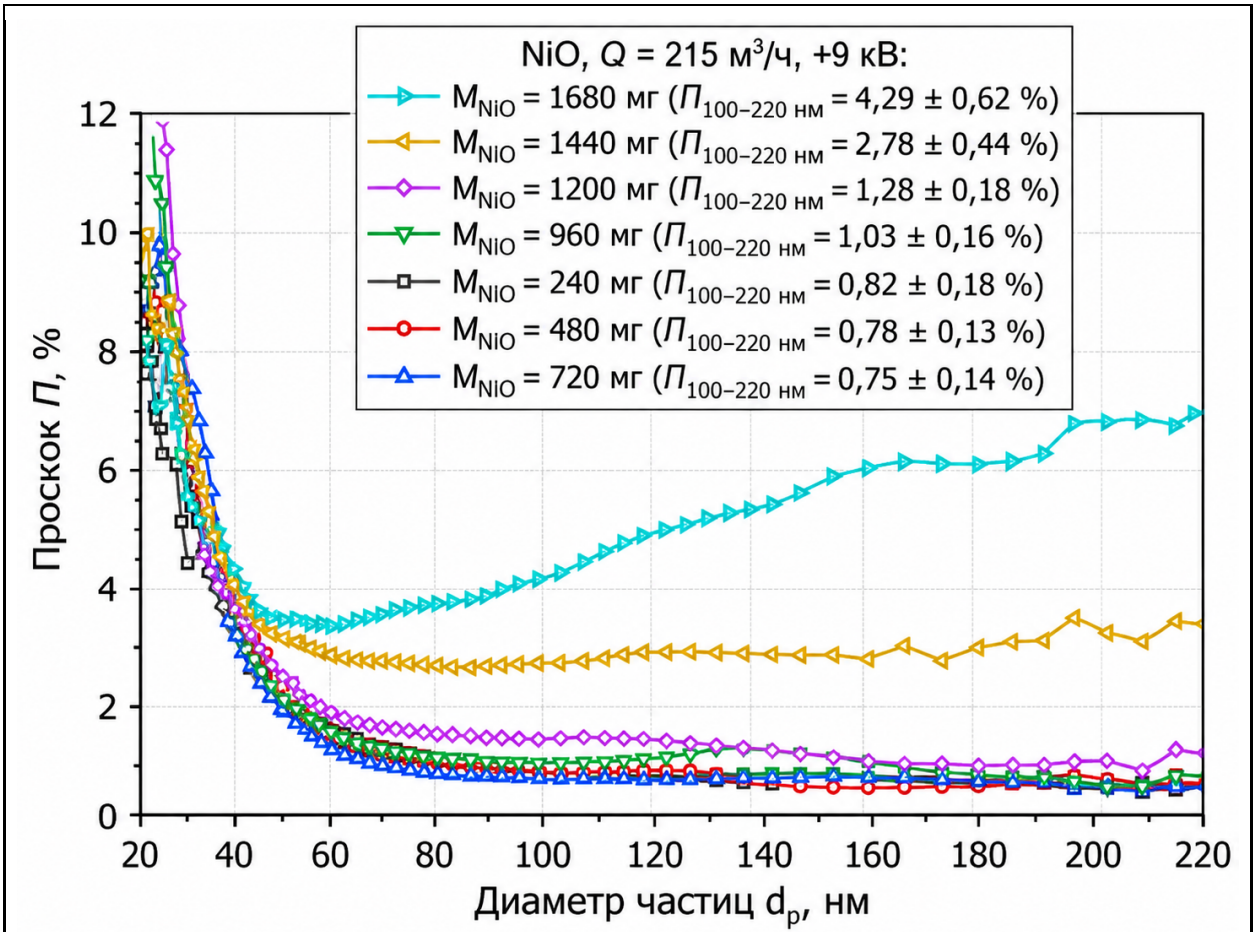


Рисунок 4.22. Зависимость коэффициента проникновения аэрозольных частиц от их размера для фильтров с различной аэрозольной нагрузкой (использовался фильтр без заземляющего электрода)

В таблице 2 приведены измеренные значения в зависимости от степени запылённости фильтра. Проводимость Gf поверхности фильтра измерялась с использованием источника высокого напряжения (фиксировано подавалось 10 кВ) и пикоамперметра KEITHLEY 617 Programmable Electrometer для считывания показаний протекающего тока по поверхности фильтра

Таблица 4.10. Измеренные параметры фильтра от его запыленности аэрозолем оксида никеля.					
Массовое содержание оксида никеля (NixOy) на фильтре M_{NixOy}, мг	C_{in} 10^6 шт/см^3	C_{out}, 10^4 шт/см^3	Проводимость поверхности фильтра G_f, пСм	Суммарный заряд фильтра q_f, нКл	Проскок через фильтр $П_{100\text{-}220\ nm}$, %
240	5.30	8.89	< 0.03	123	0.82 ± 0.18
480		7.60	< 0.03	117	0.78 ± 0.13
720		7.54	0.04	108	0.75 ± 0.14
960		8.38	0.05	77	1.03 ± 0.16
1200		9.85	0.10	55	1.28 ± 0.18
1440		16.00	0.63	31	2.78 ± 0.44
1680		21.17	1.03	18	4.29 ± 0.62

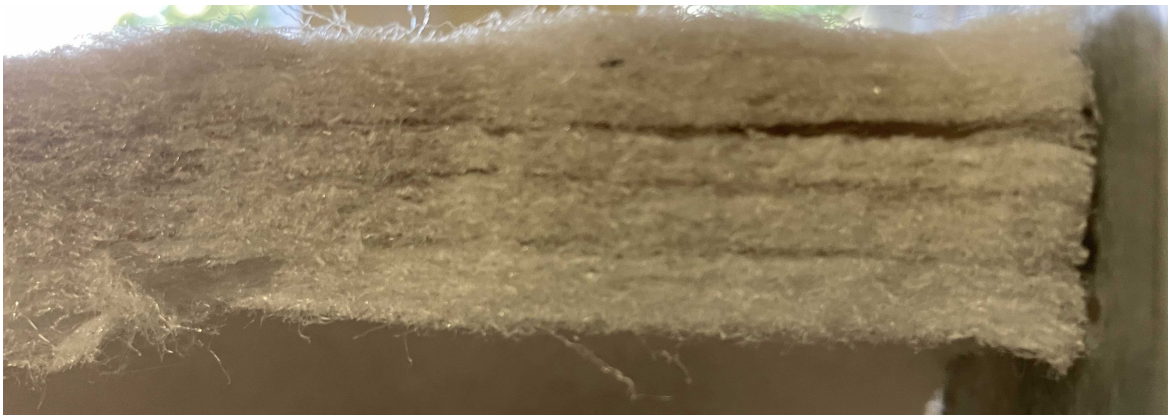
Таблица 4.10 и рисунок 4.22 показывают, что проскок растет, когда проводимость поверхности превышает 0,03 пСм (при массовом содержании оксида никеля на фильтре 720 мг).

По мере увеличения массового содержания NiO на поверхности фильтра (до 1680 мг) происходит значительное снижение суммарного заряда фильтра — со 108 до 18 нКл — и увеличение коэффициента проникновения частиц с 0,75 до 4,29%.

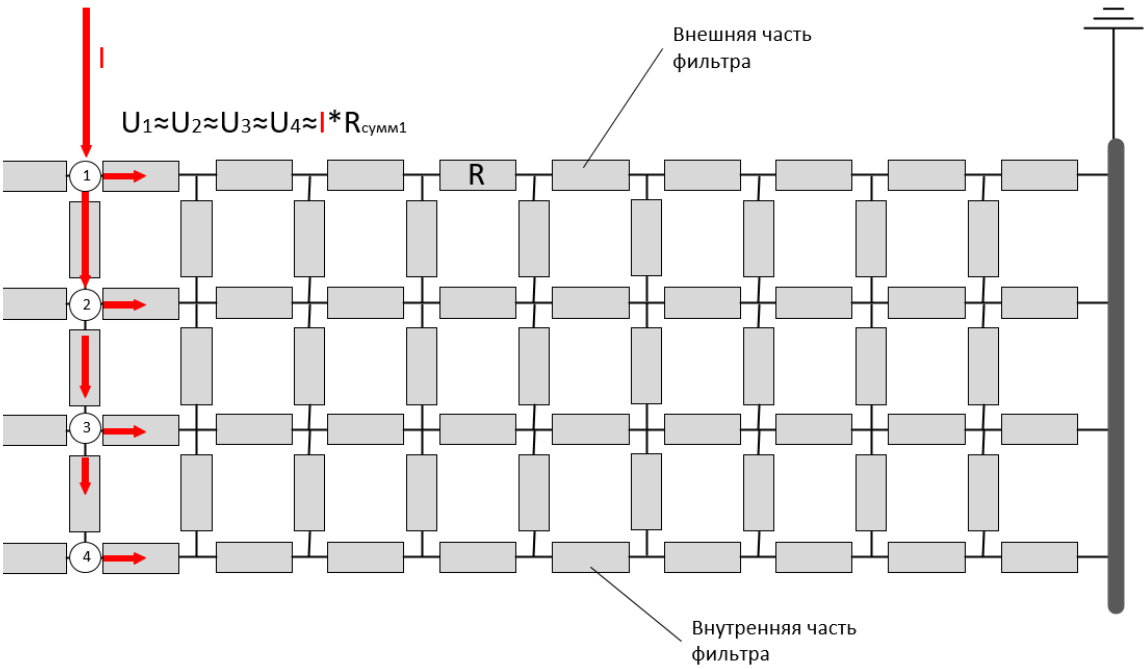
Полученные зависимости проникновения частиц, суммарного заряда и проводимости поверхности фильтра показывают, что снижение эффективности фильтрации при длительном запылении оксидом никеля сопровождается уменьшением суммарного заряда фильтра и увеличением проводимости его поверхности.

4.13 Предлагаемые модели электрических свойств фильтров

Для построения модели накопления заряда фильтром волокнистую структуру фильтра можно представить в виде набора резисторов с сопротивлением R (рис. 4.23).



(а)



(б)

Рисунок 4.23 Модель накопления потенциала для чистого фильтра без проволоки

При этом будем считать, что длина фильтра L значительно превышает его толщину t (L >> t). Следовательно, сопротивление свежего фильтра вдоль его длины значительно больше сопротивления по толщине (RL >> Rt).

Как уже было установлено, потенциал фильтра будет продолжать увеличиваться до тех пор, пока ток заряженных частиц (осаждающихся на фильтре) Iparticles не станет равен току, протекающему через фильтр к заземлённому корпусу Icase (Iparticles = Icase).

На рисунке 4.23 показано распределение потенциала по глубине свежего фильтра без заземляющего электрода в заряженном состоянии.

Потенциалы в точках 1, 2, 3 и 4 можно считать одинаковыми, поскольку сопротивление между этими точками значительно меньше сопротивления между этими точками и заземлённым корпусом.

Таким образом, потенциал равномерно распределяется по всей толщине свежего фильтра без заземляющего электрода.

При рассмотрении случая свежего фильтра с заземляющим электродом (рис. 4.24) видно, что сопротивление между точкой 2 и заземляющим электродом больше, чем между точкой 1 и заземляющим электродом, что приводит к более высокому потенциалу в точке 2 (при этом предполагается, что ток через точки 1 и 2 одинаков).

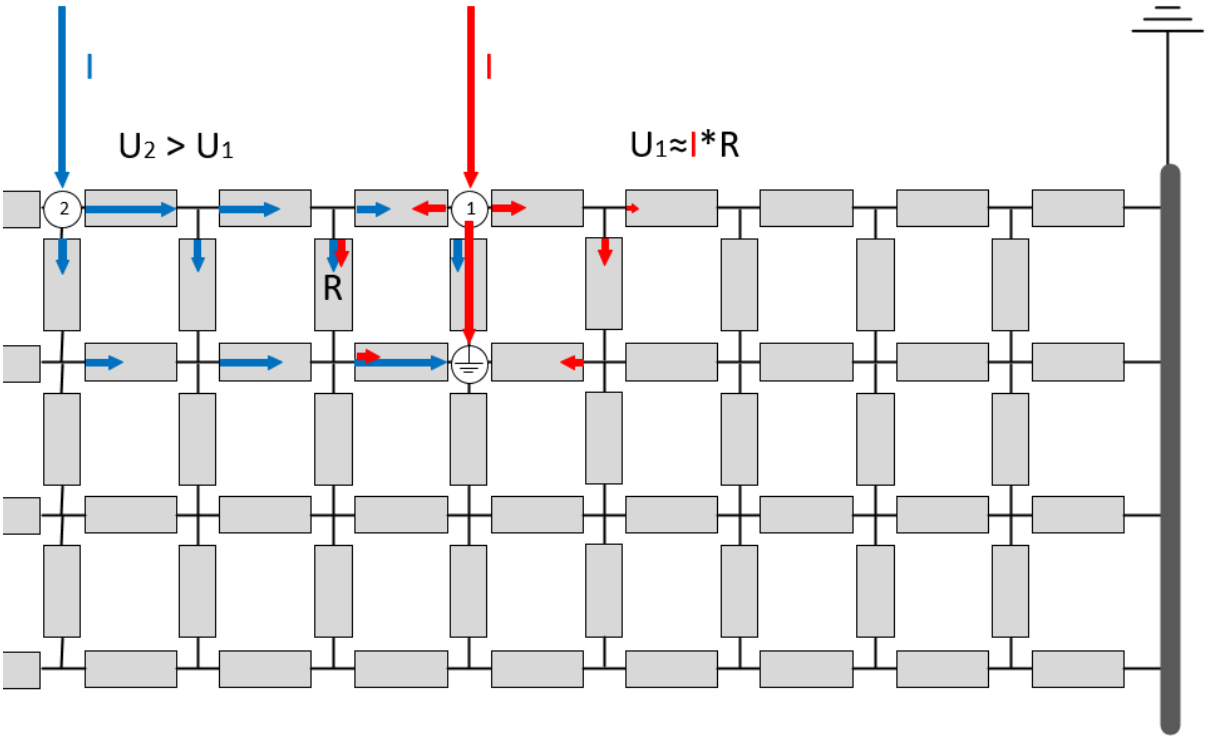


Рисунок 4.23 Модель накопления потенциала для чистого фильтра с проволокой.

В дальнейшем ток через точку 1 становится выше, что лишь частично компенсирует разность потенциалов между этими двумя точками.

Наличие проволоки также приводит к неравномерному распределению потенциала по глубине фильтра, а именно: потенциал внутри фильтра оказывается значительно ниже, чем на его поверхности.

Установлено, что при загрязнении фильтра его сопротивление и суммарный заряд уменьшаются.

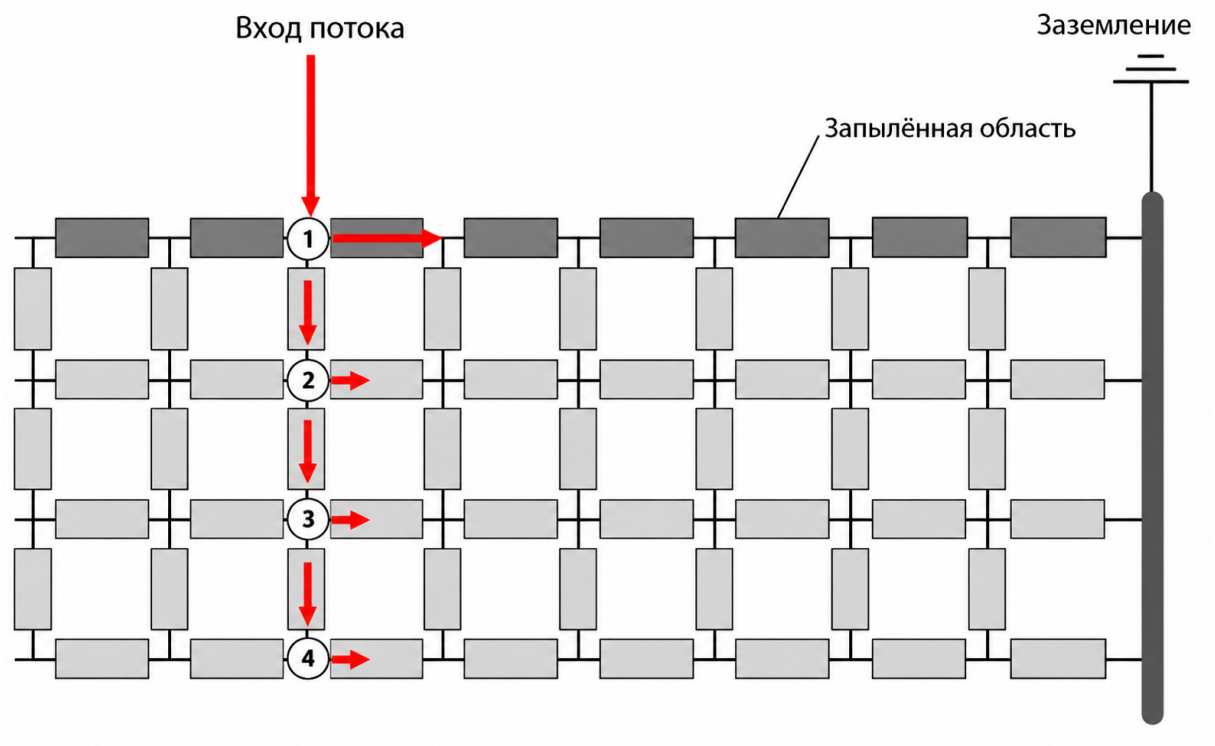


Рисунок 4.25 Модель накопления потенциала для покрытого проводящей пылью фильтра без проволоки

Поскольку большая часть пыли накапливается в поверхностных слоях фильтра, сопротивление этих слоёв уменьшается (рис. 4.25). Таким образом, ток, протекающий по поверхности фильтра, становится значительно больше тока, проходящего через внутренние слои.

Можно также сделать вывод, что при загрязнении поверхностных слоёв фильтра разность потенциалов между точками 1 и 4 возрастает (поскольку сопротивлением по толщине фильтра уже нельзя пренебречь (RL >> Rt)), а абсолютные значения потенциала уменьшаются.

В результате загрязнённый фильтр отличается от чистого следующими параметрами:

- сопротивление поверхностного слоя и, следовательно, всего запыленного фильтра меньше, чем у свежего фильтра;

- ток, протекающий по поверхности фильтра, увеличивается по мере роста его загрязнения;
- разность потенциалов между внутренними и внешними слоями в заряженном состоянии больше для загрязнённого фильтра, чем для свежего.

4.14 Каскадный фильтр как способ избежания стока заряда

Как мы показали ранее, сток заряда приводит к снижению эффективности всей системы. Исходя из этого было сделано предположение, что если между точками, например 2 и 3 на рисунке 4.25 сделать воздушный промежуток, то заряд с внутренних слоев фильтра (где точки 3 и 4) не будет перетекать на внешние запыленные (точки 1 и 2). Основываясь на этом предположении, нами была предложена и запатентована конструкция каскадного фильтра [108] схематически изображенного на рисунке 4.27

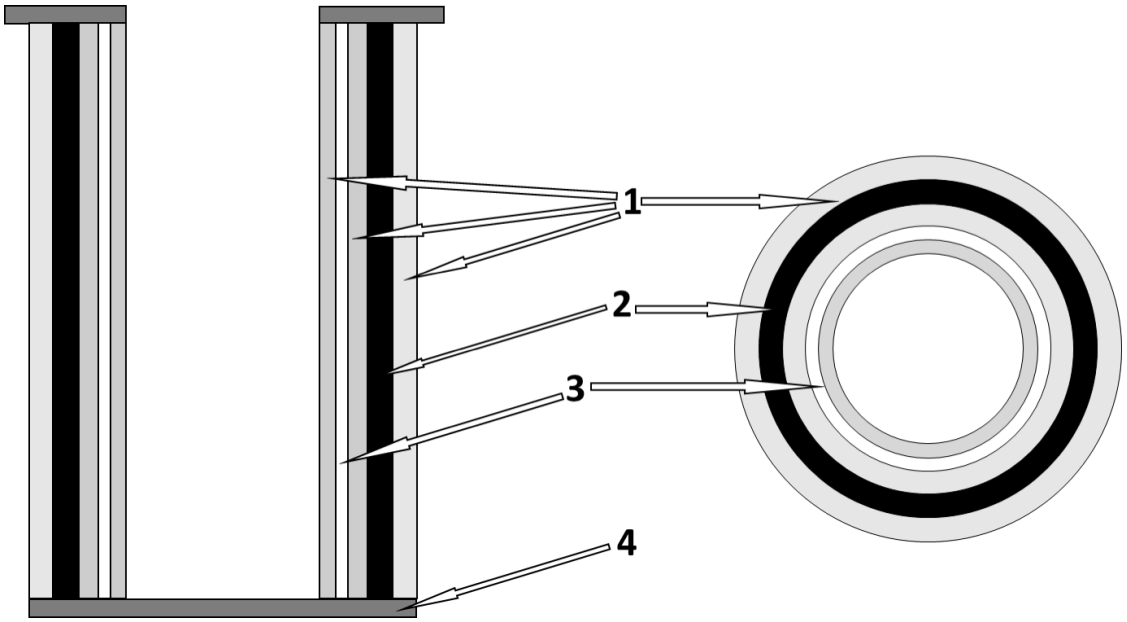


Рисунок 4.26. 1 – фильтрующий элемент, состоящий из диэлектрического волокнистого материала, сформированного волокнами из высокопористого гидрофобного диэлектрического материала, 2 – наполнитель, представляющий собой сорбент или катализатор разложения озона, 3 – зазор между слоями фильтра, 4 – глухой фланец фильтра.

В показанной конструкции для избежания перетока заряда фильтр изготовлен из не менее двух коаксиальных фильтрующих цилиндров (слоев фильтра) с воздушной прослойкой между ними. Пространство между слоями фильтра может быть использовано для заполнения материалами, способствующими удалению из воздуха газообразных загрязнителей. Например, в это пространство может быть помещен гранулированный активированный уголь или гопкалит или другиой катализатором разложения 10а. Таким образом система «блок зарядки аэрозолей + каскадный фильтр» может быть использована в помещениях с пребыванием персонала без дополнительной ступени разложения озона. Для удаления из фильтруемого воздуха летучих органических соединений пространство между слоями фильтра может быть заполнено гранулированным активированным углём или активированной окисью алюминия с нанесенным $KMnO_4$. Для удаления других газообразных соединений из воздуха пространство между слоями фильтра может быть заполнено любым специфическим гранулированным сорбентом. Результаты испытаний предложенной конструкции приведены в таблице 4.11.

Таблица 4.11. Эксплуатационные характеристики каскадных фильтров

Параметр	Значение
Расход воздуха F, м³/ч	80
Перепад давления ΔP, Па	64
Эффективность E, %	99,99752
Проскок П, %	0,00248
Класс фильтрации	H14
Фактор качества QF, $Па^{-1}$	0,1657
Эффективность по озону E_{O_3}, %	99,975

4.15 Выводы к главе 4

1) Разработана методика измерения суммарного заряда всего фильтра
2) Разработана методика in-situ измерения локального потенциала на поверхности фильтра
3) Исследовано влияние суммарного заряда и локального потенциала фильтра на эффективность улавливания аэрозолей. Показано что более высокие значения заряда фильтра и более равномерное распределение потенциала способствуют уменьшению проскока. Так увеличение суммарного заряда фильтра с 31 нКл до 230 нКл за счет увеличения количества поступающих заряженных частиц приводит к падению проскока почти в 2,5 раза (с 1,27% до 0,51%). Размещение заземляющего зонда на большей глубине фильтра позволило увеличить максимальный локальный потенциал с +1 кВ до +10,5 кВ, увеличить суммарный заряд с 95 до 426 нКл и привело к уменьшению проскока с 0,26% до 0,04%
4) Проведено микроскопическое исследование различных участков фильтров подтвердившее отклонение заряженных частиц в область наименьшего локального потенциала
5) Исследовано влияние проводимости волокон фильтра на его способность удерживать заряд и эффективность фильтрации. Так, для поддержания высокой эффективности фильтра на протяжении длительного времени необходимо, чтобы фильтр сохранял свои диэлектрические свойства и не позволял приобретенному заряду стекать. Так, при преднамеренном увеличении проводимости поверхности фильтра с <0,03 до 1,03 пСм за счет напыления проводящих частиц на волокна проскок растет с 0,82 до 4,29%

6) Построены физические модели электрических свойств фильтров, а именно моделей накопления электрических зарядов волокнами фильтра и возникновения электрического тока при захвате заряженных аэрозолей
7) Предложено техническое решение в виде многослойных фильтров с воздушной прослойкой для повышения фактора качества и достижения эффективности фильтрации H14 и выше. Возможность помещения гранулированной засыпки в межслойное пространство позволяет создавать фильтры, самостерилизующиеся в процессе работы озоном, создаваемым коронным разрядом, при этом безопасные с точки зрения выходной концентрации озона.

Заключение

1. Система, состоящая из последовательно установленных зарядителя аэрозолей и диэлектрического волокнистого фильтра, проявляет свойства возобновляемого электретного фильтра. Эффективность улавливания частиц различной природы (диэлектрических, проводящих, гидрофобных и гигроскопичных) такими фильтрами при предварительной зарядке аэрозоля в 40–80 раз выше, чем без зарядки.

2. Параметры изготовления фильтра оказывают существенное влияние на эффективность системы в целом. При увеличении толщины фильтра в 2 раза проскок уменьшается в 5 раз, при этом сопротивление возрастает линейно — только в 2 раза. Увеличение частоты вращения шпули позволяет получить более плотную упаковку волокон, благодаря чему проскок уменьшается с 1,13 до 0,23 %. Использование фильеры меньшего диаметра позволяет получить более тонкие волокна и приводит к повышению эффективности фильтрации.

3. Для эффективного улавливания наночастиц из воздуха фильтр должен иметь высокий суммарный заряд, а потенциал должен быть равномерно распределён по его поверхности. Увеличение суммарного заряда фильтра с 31 до 230 нКл за счёт увеличения количества поступающих заряженных частиц приводит к уменьшению проскока почти в 2,5 раза — с 1,27 до 0,51 %. Размещение заземляющего зонда на большей глубине фильтра позволило увеличить максимальный локальный потенциал с +1 до +10,5 кВ и суммарный заряд с 95 до 426 нКл, что привело к уменьшению проскока с 0,26 до 0,04 %.

4. Для поддержания высокой эффективности фильтра в течение длительного времени необходимо, чтобы фильтр сохранял диэлектрические свойства и препятствовал стеканию приобретённого заряда. При преднамеренном увеличении проводимости поверхности фильтра с менее 0,03 до 1,03 пСм за счёт напыления проводящих частиц на волокна проскок возрастает с 0,82 до 4,29 %.

5. Реализована и запатентована конструкция каскадного электретного фильтра, позволяющая преодолеть проблемы стекания и перераспределения заряда. Такая конструкция позволила получить фильтрующую систему с проскоком не более 0,00248 %, соответствующую классу фильтрации H14.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ И СОКРАЩЕНИЙ

Сокращения

Обозначение	Расшифровка и пояснение
AISI	American Iron and Steel Institute — Американский институт чугуна и стали; обозначение марки стали
Al_2O_3	оксид алюминия
DEHS	ди(2-этилгексил)себацинат; жидкий тестовый аэрозоль
HEPA	High Efficiency Particulate Air filter — высокоэффективный воздушный фильтр
ISO	International Organization for Standardization — Международная организация по стандартизации
KCl	хлорид калия
KI	йодид калия
LCR-метр	измеритель индуктивности L, ёмкости C и сопротивления R
MPPS	Most Penetrating Particle Size — размер наиболее проникающих частиц
NaCl	хлорид натрия
NiO	оксид никеля(II)
$N_{ix}O_{\gamma}$	обобщённое обозначение оксидов никеля переменного состава
PAN	polyacrylonitrile — полиакрилонитрил
PM_1	взвешенные частицы с аэродинамическим диаметром не более 1 мкм
$PM_{2,5}$	взвешенные частицы с аэродинамическим диаметром не более 2,5 мкм
PP	polypropylene — полипропилен
PVDF	polyvinylidene fluoride — поливинилиденфторид
ULPA	Ultra-Low Penetration Air filter — воздушный фильтр сверхнизкого проскока
ГОСТ	государственный стандарт
ДОФ	диоктилфталат; вещество для получения тестового аэрозоля
ИСО	Международная организация по стандартизации; русское обозначение ISO
ПА-6	полиамид 6 (капролон)
РЭМ	растровая электронная микроскопия; растровый электронный микроскоп
ФП	фильтр Петрянова
ФПА	фильтрующий материал Петрянова из ацетилцеллюлозных волокон
ФПП	фильтрующий материал Петрянова из перхлорвиниловых волокон
ФПС	фильтрующий материал Петрянова из полистирольных волокон

Условные обозначения

Обозначение	Расшифровка и пояснение
a	радиус коронирующей проволоки, см
A	площадь осадительной поверхности, м²
B	механическая подвижность частицы, м·с⁻¹·Н⁻¹
b	диаметр обечайки либо ширина пластины (в зависимости от формулы), м или см
C₁	ёмкость между внутренней и внешней обкладками клетки Фарадея, Ф
C_c	поправочный коэффициент Каннингема на скольжение
C_in	массовая концентрация частиц перед фильтром, мг·м⁻³
C_out	массовая концентрация частиц после фильтра, мг·м⁻³
C_d	коэффициент аэродинамического сопротивления частицы
D	коэффициент диффузии частицы, м²·с⁻¹
d	характерный размер препятствия, м
d_f	диаметр волокна, м
d_p	диаметр частицы, м
d_v	объёмно-эквивалентный диаметр частицы, м
d_w	диаметр коронирующей проволоки, см
E	напряжённость электрического поля, В·м⁻¹
E_c	критическая напряжённость возникновения коронного разряда, кВ·см⁻¹
E_D	эффективность улавливания одиночным волокном за счёт диффузии
E_I	эффективность улавливания одиночным волокном за счёт импакции
E_R	эффективность улавливания одиночным волокном за счёт перехвата
E_DR	эффективность совместного диффузионно-перехватного механизма
E_Σ	суммарная эффективность улавливания одиночным волокном
e	элементарный электрический заряд, 1,602·10⁻¹⁹ Кл
F	сила, Н
F_drag	сила аэродинамического сопротивления, Н
F_elec	электростатическая сила, Н
F_grav	сила тяжести, Н
G_f	поверхностная проводимость фильтра, См
g	ускорение свободного падения, м·с⁻²
h	расстояние между осадительными пластинами, м
J	коэффициент импакционного улавливания

Обозначение	Расшифровка и пояснение
k	постоянная Больцмана, $1{,}381 \cdot 10^{-23}$ Дж·К$^{-1}$; в формуле заряда клетки Фарадея — поправочный коэффициент
K_E	электростатическая постоянная, $1/(4\pi\varepsilon_0)$, Н·м^2·Кл$^{-2}$
Kn	число Кнудсена
Ku	гидродинамический фактор Кувабары
L	длина фильтра или осадителя, м
N	число обнаруженных частиц
N_i	концентрация ионов в воздухе, м$^{-3}$
N_in	счётная концентрация частиц перед фильтром, м$^{-3}$ или см$^{-3}$
N_out	счётная концентрация частиц после фильтра, м$^{-3}$ или см$^{-3}$
n	число элементарных зарядов на частице
N_эл	потребляемая электрическая мощность вентилятора, Вт
P	проскок частиц через фильтр
Pe	число Пекле
Q	объёмный расход воздуха, м^3·с$^{-1}$
q_f	суммарный электрический заряд фильтра, Кл
q_F (QF)	фактор качества фильтра, Па$^{-1}$
R	отношение диаметра частицы к диаметру волокна, d_p/d_f
R_L	электрическое сопротивление фильтра вдоль его длины, Ом
R_t	электрическое сопротивление фильтра по толщине, Ом
Re	число Рейнольдса
S	тормозной путь частицы, м
Stk	число Стокса
t	время, с; в формулах фильтрации — толщина фильтра, м
T	абсолютная температура, К
U	напряжение, В
U_0, U_1, U_2	электрические потенциалы или напряжения в характерных точках, В
U_Фарадея	разность потенциалов между обкладками клетки Фарадея, В
V	скорость частицы относительно среды или скорость потока, м·с$^{-1}$
V_0	начальная скорость частицы, м·с$^{-1}$
V_elec	скорость дрейфа заряженной частицы в электрическом поле, м·с$^{-1}$
V_grav (V_ts)	скорость гравитационного осаждения (скорость витания) частицы, м·с$^{-1}$
Z	электрическая подвижность заряженной частицы, м^2·В$^{-1}$·с$^{-1}$
α	коэффициент упаковки волокон в фильтре

Обозначение	Расшифровка и пояснение
α, β, γ	эмпирические коэффициенты в формуле поправки Каннингема
Δp	перепад давления на фильтре, Па
ε	пористость фильтра; в формулах зарядки — относительная диэлектрическая проницаемость частицы
ε₀	электрическая постоянная, Ф·м$^{-1}$
η	динамическая вязкость газа, Па·с; в уравнении Дойча—Андерсона — эффективность осаждения
η_вент	общий коэффициент полезного действия вентилятора и электродвигателя
λ	средняя длина свободного пробега молекул газа, м
ρ_g	плотность газа, кг·м$^{-3}$
ρ_p	плотность материала частицы, кг·м$^{-3}$
τ	время релаксации частицы, с
φ_local	локальный электрический потенциал на поверхности фильтра, В
χ	динамический фактор формы частицы
x_rms	среднеквадратичное смещение частицы, м

Практическая Значимость

1) Полученные результаты зависимости величины заряда и распределения потенциала позволили ввести новые производственные инструкции, согласно которым заземляющий электрод размещается ближе к внутренней поверхности фильтра, в результате чего на серийно выпускаемых фильтрах удалось добиться снижения проскока примерно в 2 раза – в среднем 0,29 до 0,14%
2) Переход на фильеры меньшего диаметра позволил снизить перепад давления на фильтре, тем самым улучшив фактор качества в среднем до 0,16 1/Па
3) Результаты работы послужили разработки новой конструкции фильтр-элементов, которые нашли свое применение для ЛФМ -ламинарных фильтрующих модулей, первая партия которых выпущена и введена в эксплуатацию

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д.ф.м.н Иванову Виктору Владимировичу за предоставленную возможность выполнять работу на кафедре нанометролонии и наноматериалов, а также ценные советы. Также автор выражает благодарность генеральному директору ООО «Информационно-технологический институт» Першину Алексею Николаевичу за финансовую поддержку работ, и особенно за возможность практического внедрения результатов работы на предприятии. Автор благодарен Патарашвили Антону Николаевичу за смелые предположения при разработке модели фильтрации и Корнюшину Денису Владимировичу за помощь в организации измерений на главном измерительном стенде и настройку генератора аэрозолей, а также Ефимову Алексею Анатольевичу и всему коллективу кафедры нанометрологии и наноматериалов за помощь и живое участие. Помимо этого автор выражает особую благодарность научному сотруднику ИМЕТ РАН Судьину Владиславу Витальевичу за помощь в получении и обработке массива данных оптических фотографий шлифов образцов фильтров.

Список литературы

1. Osburn C. M., Donovan R. P., Berger H., Jones G. W. The effects of contamination on semiconductor manufacturing yield // Journal of Environmental Sciences. 1988. Vol. 31, no. 2. P. 45–57
2. Meng H., Shiue A., Wang C., et al. Particle and bacterial colony emissions from garments and humans in pharmaceutical cleanrooms // Journal of Building Engineering. 2024. Vol. 97. Art. 110829
3. Santos R. A., Hasslocher-Moreno A. M. Study of the microbiological efficiency of a hospital ventilation system with HEPA filtration in the prevention of airborne pathogens // Revista de Gestão Social e Ambiental. 2024. Vol. 18, no. 11. Art. e09641.
4. СанПиН 2.1.3.2630-10. Санитарно-эпидемиологические требования к организациям, осуществляющим медицинскую деятельность.
5. ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. М.: Стандартинформ, 2018.
6. ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010. Высокоэффективные фильтры очистки воздуха EPA, HEPA и ULPA. Часть 1. Классификация, методы испытаний, маркировка. М.: Стандартинформ, 2011.
7. Федотов А. Е. Чистые технологии — ключевое направление технического прогресса // Медицинский алфавит. Серия «Эпидемиология и гигиена». — 2012. — № 3. — С. 41–44.
8. Саитгараева Н. А., Мухаметжанов А. А. Проблемы проверки HEPA-фильтров, установленных на месте эксплуатации // Технология чистоты. — 2025. — № 1. — С. 5–7.

9. Новиков К. Ю., Поскребышев И. Ю., Демидов Е. Н. Опыт контроля HEPA фильтров на объектах. «Взгляд снизу» // Технология чистоты. — 2025. — № 3. — С. 9–17.
10. Beckman I. P., Berry G., Cho H., Riveros G. Alternative High-Performance Fibers for Nonwoven HEPA Filter Media // Aerosol Science and Engineering. — 2023. — Vol. 7. — P. 36–58.
11. Талипова М. В., Лянг А. В., Щербак Н. В. Сравнительный анализ фильтровальных бумаг высокой эффективности очистки воздуха для средств индивидуальной защиты органов дыхания // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239.
12. Mittal H., Parks S. R., Pottage T., Walker J. T., Bennett A. M. Survival of microorganisms on HEPA filters // Applied Biosafety. 2011. Vol. 16, no. 3. P. 163–166
13. Li K., Feng G., Chen T., Zhao H. Research of electret air filter: a review // Polymers for Advanced Technologies. 2024. Vol. 35, no. 6. Art. e6454
14. Method of making cylindrical fibrous filter structures : пат. US 4594202 A, США / D. B. Pall, C. F. Harwood, A. Bradley, T. R. Brennan ; заявитель и патентообладатель Pall Corporation. — № US06/568824 ; заявл. 06.01.1984 ; опубл. 10.06.1986.
15. Depth filter cartridge and method and apparatus for making same : пат. US 5340479 A, США / J. T. Szczepanski, T. M. Aune, H. J. Schneider ; заявитель Osmonics, Inc. — № US07/932620 ; заявл. 20.08.1992 ; опубл. 23.08.1994.

16. Filter cartridges having nonwoven melt blown filtration media with integral co-located support and filtration : пат. US 5591335 A, США / S. D. Barboza, C. Hoffman Jr., C. V. Kopp, R. J. Schmitt, A. C. Shucosky ; патентообладатель Memtec America Corporation. — № US08/433006 ; заявл. 02.05.1995 ; опубл. 07.01.1997.
17. Melt-blown tubular core elements and filter cartridges including the same : пат. US 6342283 B1, США / B. Mozelack, R. J. Schmitt, S. D. Barboza [и др.] ; заявитель USF Filtration & Separations, Inc. — № US09/358886 ; заявл. 22.07.1999 ; опубл. 29.01.2002.
18. Фукс Н. А. Механика аэрозолей. М.: Издательство Академии наук СССР, 1955. 352 с.
19. Whyte W., Agricola K., Derks M. Airborne particle deposition in cleanrooms: deposition mechanisms // Clean Air and Containment Review. 2015. No. 24. P. 4–9.
20. Walter H. Coagulation and size distribution of condensation aerosols // Journal of Aerosol Science. — 1973. — Vol. 4. — P. 1–15.
21. Ивлев Л. С. Физика атмосферных аэрозольных систем. Л.: Издательство ЛГУ, 1982. 366 с.
22. Ивлев Л. С. Механизмы образования и распада атмосферных аэрозолей и облачности и их экологическое значение // Биосфера. — 2013. — Т. 5, № 2. — С. 182–210.
23. Klinzing G. E., Rizk F., Marcus R., Leung L. S. Pneumatic Conveying of Solids: A Theoretical and Practical Approach. 3rd ed. Dordrecht: Springer, 2010.

24. Haggerty M. T., Emmons M. C., Wagner A. L., Cutbirth J. M. Cyclone Sub-Micron Particulate Separator // 52nd International Conference on Environmental Systems. — Calgary, Canada, 16–20 July 2023. — Paper ICES-2023-469. — 11 p.
25. Kotzur B. A., Berry R. J., Zigan S., García-Triñanes P., Bradley M. S. A. Particle attrition mechanisms, their characterisation, and application to horizontal lean phase pneumatic conveying systems: A review // Powder Technology. — 2018. — Vol. 334. — P. 76–105.
26. Fortini A., Suman A., Zanini N. An experimental and numerical study of the solid particle erosion damage in an industrial cement large-sized fan // Engineering Failure Analysis. 2023. Vol. 146. 107058.
27. Alqallaf J., Teixeira J.A. Numerical study of effects of solid particle erosion on compressor and engine performance // Results in Engineering. 2022. Vol. 15
28. Alqallaf J. et al. Solid Particle Erosion Behaviour and Protective Coatings for Gas Turbine Compressor Blades—A Review // Processes. 2020. Vol. 8. Art. 984.
29. Hu A., Li R., Chen G., Chen S. Impact of Respiratory Dust on Health: A Comparison Based on the Toxicity of PM2.5, Silica, and Nanosilica // International Journal of Molecular Sciences. — 2024. — Vol. 25.
30. Nkhamah E., Ndhlovu M., Dvonch J. T., Lynar M., Kaira C., Mbow A., Siziya S., Voyi K. Exposure to cement dust and respiratory health for communities residing near cement factories: A systematic review of the literature // Medical Research Archives. — 2022. — Vol. 10, No. 12.
31. Green H. L., Lane W. R. Particulate Clouds: Dusts, Smokes and Mists. 2nd ed. London: E. & F. N. Spon, 1964.

32. ISO 27891:2015. Aerosol particle number concentration — Calibration of condensation particle counters. Geneva: ISO, 2015.
33. Vasilatou K., Iida K., Kazemimanesh M., Olfert J., Sakurai H., Sipkens T. A., Smallwood G. J. Aerosol physical characterization: A review on the current state of aerosol documentary standards and calibration strategies // Journal of Aerosol Science. — 2025. — Vol. 183.
34. Hammer T., Irwin M., Swanson J., Berger V., Sonkamble U., Boies A. et al. Characterising the silver particle generator: A pathway towards standardising silver aerosol generation // Journal of Aerosol Science. — 2022. — Vol. 163
35. Scheibel H. G., Porstendörfer J. Generation of monodisperse Ag- and NaCl-aerosols with particle diameters between 2 and 300 nm // Journal of Aerosol Science. — 1983. — Vol. 14, No. 2. — P. 113–126
36. Tuch T., Weinhold K., Merkel M., Nowak A., Klein T., Quincey P. et al. Dependence of CPC cut-off diameter on particle morphology and other factors // Aerosol Science and Technology. — 2016. — Vol. 50, No. 4. — P. 331–338.
37. Atmospheric Aerosol Properties and Climate Impacts. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research / M. Chin et al. Washington, DC: NASA, 2009.
38. Spindler G., Grüner A., Müller K., Schlimper S., Herrmann H. Long-term size-segregated particle (PM10, PM2.5, PM1) characterization study at Melpitz — influence of air mass inflow, weather conditions and season // Journal of Atmospheric Chemistry. — 2013. — Vol. 70, No. 2. — P. 165–195

39. Ani S. A., Usha K. F., Auyon S. T., Nipa N., Islam M. A., Khan M. B. Assessment of Air Quality Parameters of Urban and Rural Areas in Selected Districts of Bangladesh // Journal of Materials and Environmental Science. — 2025. — Vol. 16, No. 8. — P. 1373–1387
40. Harr L., Sinsel T., Simon H., Torbenson M. C. A., Jan E. Mobile measurements for distribution and attribution of particulate matter in urban environments // Atmospheric Environment. — 2023. — Vol. 315.
41. Squizzato S., Masiol M., Agostini C., Visin F., Formenton G., Harrison R. M., Rampazzo G. Factors, origin and sources affecting PM1 concentrations and composition at an urban background site // Atmospheric Research. — 2016. — Vol. 180. — P. 262–273
42. Zhang F., Shiue A., Fan Y., et al. Dynamic emission rates of human activity in biological cleanrooms // Building and Environment. 2022. Vol. 226. Art. 109777
43. Zappi A., Popovicheva O., Tositti L., et al. Factors influencing aerosol and precipitation ion chemistry in urban background of Moscow megacity // Atmospheric Environment. 2023. Vol. 294. Art. 119458
44. Gubanova D. P., Vinogradova A. A., Iordanskii M. A., Skorokhod A. I. Variability of near-surface aerosol composition in Moscow in 2020–2021: episodes of extreme air pollution of different genesis // Atmosphere. 2022. Vol. 13, no. 4. Art. 574
45. Lin I.-K., Bai H., Wu B.-J. Analysis of Relationship between Inorganic Gases and Fine Particles in Cleanroom Environment // Aerosol and Air Quality Research. — 2010. — Vol. 10. — P. 245–254.

46. Rotatori M., Mosca S., Guerriero E., et al. Emission of submicron aerosol particles in cement kilns: Total concentration and size distribution // Journal of the Air & Waste Management Association. 2014. Vol. 65. No. 1. P. 41-49.
47. Schmid O., Stoeger T. Surface area is the biologically most effective dose metric for acute nanoparticle toxicity in the lung // Journal of Aerosol Science. — 2016. — Vol. 99. — P. 133–143.
48. Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications / ed. by P. Kulkarni, P. A. Baron, K. Willeke. — 3rd ed. — Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2011. — 900 p. — ISBN 978-0-470-38741-2.
49. Методические указания по измерению концентрации свинца в воздухе рабочей зоны методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии : МУ 3972-85 : утв. заместителем Главного государственного санитарного врача СССР 05.11.1985 // Методические указания по измерению концентраций вредных веществ в воздухе рабочей зоны. — Вып. XXI. — М., 1986. — С. 168
50. Pershin N. A., Efimov M. N., Sudin V. V., Ivanov V. V. Role of fabrication parameters in enhancing cylindrical electret polypropylene fiber-based filters for air purification // Chimica Techno Acta. — 2025. — Vol. 12, No. 4. — Art. 8952
51. Pershin N. A., Efimov M. N., Sudin V. V., Ivanov V. V. Efficiency of a Dielectric Fibrous Filter Under Unipolar Particle Charging: Effects of Surface Potential and Grounding Probe Configuration // Russian Journal of Applied Chemistry. — 2026. — Vol. 99, No. 6. — P. 299–315.
52. Rader D. J. Momentum slip correction factor for small particles in nine common gases // Journal of Aerosol Science. 1990. Vol. 21, no. 2. P. 161–168.

53. Kim J. H., Mulholland G. W., Kukuck S. R., Pui D. Y. H. Slip Correction Measurements of Certified PSL Nanoparticles Using a Nanometer Differential Mobility Analyzer (Nano-DMA) for Knudsen Number From 0.5 to 83 // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. — 2005. — Vol. 110, No. 1. — P. 31–54.
54. СП 60.13330.2020. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01-2003.
55. Hinds W. C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. — 2nd ed. — New York : Wiley-Interscience, 1999.
56. Fath W., Blum C., Glor M., Walther C. D.. Electrostatic ignition hazards due to pneumatic transport of flammable powders through insulating or dissipative tubes and hoses – New experiments and calculations // Journal of Electrostatics. 2013. Vol. 71. No. 3. P. 377-382
57. Cooper D. W., Reist P. C.. Neutralizing charged aerosols with radioactive sources // Journal of Colloid and Interface Science. 1973. Vol. 45. No. 1. P. 17-26
58. Taylor G. I.. Disintegration of water drops in an electric field // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1964. Vol. 280. No. 1382. P. 383-397
59. Wilm M.. Principles of Electrospray Ionization // Molecular & Cellular Proteomics. 2011. Vol. 10. No. 7. Art. M111.009407
60. Reneker D. H., Yarin A. L.. Electrospinning jets and polymer nanofibers // Polymer. 2008. Vol. 49. No. 10. P. 2387-2425
61. Cui Y., Zhuang C., Zeng R.. Electric field measurements under DC corona discharges in ambient air by electric field induced second harmonic generation // Applied Physics Letters. 2019. Vol. 115. No. 24. Art. 244101

62. Boelter K. J., Davidson J. H.. Ozone Generation by Indoor, Electrostatic Air Cleaners // Aerosol Science and Technology. 1997. Vol. 27. No. 6. P. 689-708.
63. Lawless P. A.. Particle charging bounds, symmetry relations, and an analytic charging rate model for the continuum regime // Journal of Aerosol Science. 1996. Vol. 27. No. 2. P. 191-215.
64. Alderman S. L., Parsons M. S., Hogancamp K. U., Waggoner C. A.. Evaluation of the Effect of Media Velocity on Filter Efficiency and Most Penetrating Particle Size of Nuclear Grade High-Efficiency Particulate Air Filters // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. 2008. Vol. 5. No. 11. P. 713-720.
65. Popa G. N., Diniș C. M., Iagăr A.. Investigations on Three-Section Plate-Type Electrostatic Precipitators Used in Thermoelectric Power Plants // Energies. 2023. Vol. 16. No. 3. Art. 1186.
66. ГОСТ 31961–2012. Вентиляторы промышленные. Показатели энергоэффективности. — Введ. 2014-07-01. — М. : Стандартинформ, 2014. — 18 с
67. Yeh H. C., Liu B. Y. H.. Aerosol filtration by fibrous filters—I. theoretical // Journal of Aerosol Science. 1974. Vol. 5. No. 2. P. 191-204.
68. Beckman I. P., Berry G., Cho H., Riveros G.. Alternative High-Performance Fibers for Nonwoven HEPA Filter Media // Aerosol Science and Engineering. 2022. Vol. 7. No. 1. P. 36-58.
69. Кирш А. А., Будыка А. К., Кирш В. А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП // Российский химический журнал. 2008. Т. 52, № 5. С. 97–101.

70. Tucker N., Stanger J. J., Staiger M. P., Razzaq H., Hofman K. The History of the Science and Technology of Electrospinning from 1600 to 1995 // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. — 2012. — Vol. 7, No. 2 Suppl. — P. 63–73
71. Басманов П. И., Кириченко В. Н., Филатов Ю. Н., Юров Ю. Л. Высокоэффективная очистка газов от аэрозолей фильтрами Петрянова. — М., 2002. — 193 с
72. Огородников Б. И., Кириченко В. Н., Басманов П. И., Петрянов И. В. Улавливание короткоживущих дочерних продуктов распада радона волокнистыми фильтрами ФП // Атомная энергия. — 1963. — Т. 15, вып. 3. — С. 230–237.
73. ИТС 22–2016. Очистка выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при производстве продукции (товаров), а также при проведении работ и оказании услуг на крупных предприятиях: информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. — М. : Бюро НДТ, 2016.
74. Evaluation of Filter Media for Particle Number, Surface Area and Mass Penetrations // The Annals of Occupational Hygiene. 2012.
75. Effect Of Industrial Aerosols On The Performance Of Electrically Charged Filter Material // The Annals of Occupational Hygiene. 1988.
76. Lee J., Kim J.. Material Properties Influencing the Charge Decay of Electret Filters and their Impact on Filtration Performance // Polymers. 2020. Vol. 12. No. 3. Art. 721.
77. Liu C., Dai Z., He B., Ke Q. F.. The Effect of Temperature and Humidity on the Filtration Performance of Electret Melt-Blown Nonwovens // Materials. 2020. Vol. 13. No. 21. Art. 4774.

78. Kim J., Park J., Tsai P. J., Yoon C.. The Effects of Temperature and Humidity on Electrostatic Changes in Respirators and Their Filtration Efficiency // Indoor Air. 2024. Vol. 2024. No. 1. Art. 5503400
79. Choi H. J., Park E. S., Kim J. U., et al. Experimental Study on Charge Decay of Electret Filter Due to Organic Solvent Exposure // Aerosol Science and Technology. 2015. Vol. 49. No. 10. P. 977-983.
80. Martin S. B., Moyer E. S.. Electrostatic Respirator Filter Media: Filter Efficiency and Most Penetrating Particle Size Effects // Applied Occupational and Environmental Hygiene. 2000. Vol. 15. No. 8. P. 609-617.
81. Chen C. C., Huang S. H.. The Effects of Particle Charge on the Performance of a Filtering Facepiece // American Industrial Hygiene Association Journal. 1998. Vol. 59. No. 4. P. 227-233.
82. Otani Y., Emi H., Mori J. Initial Collection Efficiency of Electret Filter and Its Durability for Solid and Liquid Particles // KONA Powder and Particle Journal. — 1993. — Vol. 11. — P. 207–214
83. Liu C., Dai Z., He B., Ke Q. The Effect of Temperature and Humidity on the Filtration Performance of Electret Melt-Blown Nonwovens // Materials. — 2020. — Vol. 13, No. 21. — Art. 4774.
84. Zhou X., Zhang W., Yuan X., et al. The variation of the most penetrating particle size of electret filter media during usage under different humidity levels // Building and Environment. 2026. Vol. 288. Art. 114017
85. Ровный С. И., Глаголенко Ю. В., Пятин Н. П., Транчук О. А., Максимов В. Е., Афанасьева Е. В. Разработка и испытание модульных трудногорючих фильтров тонкой очистки на основе стеклобумаги // Атомная энергия. — 2006. — Т. 101, вып. 2. — С. 144–148.

86. Натансон Г. Л. Осаждение аэрозольных частиц на обтекаемом цилиндре под действием электростатического притяжения // Доклады Академии наук СССР. — 1957. — Т. 112, № 4. — С. 696–699.
87. Romay F. J., Liu B. Y. H., Chae S. J.. Experimental Study of Electrostatic Capture Mechanisms in Commercial Electret Filters // Aerosol Science and Technology. 1998. Vol. 28. No. 3. P. 224-234
88. Tang M., Thompson D., Chang D. Q., et al. Filtration efficiency and loading characteristics of PM2.5 through commercial electret filter media // Separation and Purification Technology. 2018. Vol. 195. P. 101-109
89. Cai Y., Cai R., Zhang L.. Experimental and theoretical analysis of loading characteristics of electret filter media for charged particles // Particuology. 2024. Vol. 93. P. 87-98
90. Sambudi N. S., Choi H. J., Lee M. H., Cho K.. Capture of Ultrafine Particles Using a Film-Type Electret Filter with a Unipolar Charger // Aerosol and Air Quality Research. 2017. Vol. 17. No. 2. P. 626-635
91. Chen H., Zhang Z., Zhang Z., et al. Enhancement of filtration efficiency by electrical charges on nebulized particles // Particuology. 2018. Vol. 37. P. 81-90
92. Rodrigues M. V., Barrozo M. A. S., Gonçalves J. A. S., Coury J. R.. Effect of particle electrostatic charge on aerosol filtration by a fibrous filter // Powder Technology. 2017. Vol. 313. P. 323-331
93. Wente V. A.. Superfine Thermoplastic Fibers // Industrial & Engineering Chemistry. 1956. Vol. 48. No. 8. P. 1342-1346.
94. Ефимов А.А., Иванов В.В., Багазеев А.В., Бекетов И.В., Волков И.А., Щербинин С.В. Получение аэрозольных наночастиц в многозазорном газоразрядном генераторе // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. № 23. С. 51–57

95. ГОСТ Р 8.775-2011 ГСИ. Дисперсный состав газовых сред. Определение размеров наночастиц по методу дифференциальной электрической подвижности аэрозольных частиц
96. ISO 21501-4:2018. Determination of particle size distribution — Single particle light interaction methods — Part 4: Light scattering airborne particle counter for clean spaces. — 2nd ed. — Geneva : International Organization for Standardization, 2018. — 42 p.
97. ГОСТ Р ИСО 14644-1–2017. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц. — Введ. 2018-12-01. — М. : Стандартинформ, 2017. — V, 29
98. Ефимов А. А., Иванов В. В., Волков И. А., Субботина И. Р., Першин Н. А. Исследование эффективности фильтрации наноразмерных аэрозолей разной природы электретными волокнистыми фильтрами // Российские нанотехнологии. — 2013. — Т. 8, № 11–12. — С. 96–102
99. Ge J., Lv X., Zhou J., Lv Y., Sun J., Guo H., Wang C., Hu P., Špitálský Z., Liu Y. Multi-level structured polylactic acid electrospun fiber membrane based on green solvents for high-performance air filtration // Separation and Purification Technology. — 2024. — Vol. 331. — Art. 125659
100. Effects of Six Processing Parameters on the Size of PCL Fibers Prepared by Melt Electrospinning Writing // Micromachines. — 2023. — Vol. 14, No. 7. — Art. 1437
101. Zhou H., Green T. B., Joo Y. L. The thermal effects on electrospinning of polylactic acid melts // Polymer. — 2006. — Vol. 47, No. 21. — P. 7497–7505.

102. Kilic A., Russell S. J., Shim E., Pourdeyhimi B. The charging and stability of electret filters // Fibrous Filter Media / ed. by P. J. Brown, C. L. Cox. — Duxford : Woodhead Publishing, 2017. — P. 95–121.

103. Sharma M., Hudson J. B. Ozone gas is an effective and practical antibacterial agent // American Journal of Infection Control. — 2008. — Vol. 36, No. 8. — P. 559–563.

104. Lee J., Kim J., Song C. H., Kim S. B., Chun Y., Sohn B. J., Holben B. N. Characteristics of aerosol types from AERONET sunphotometer measurements // Atmospheric Environment. — 2010. — Vol. 44, No. 26. — P. 3110–3117.

105. Yang S., Lee W.-M. G., Huang H.-L., Huang Y.-C., Luo C.-H., Wu C.-C., Yu K.-P. Aerosol penetration properties of an electret filter with submicron aerosols with various operating factors // Journal of Environmental Science and Health, Part A. — 2007. — Vol. 42, No. 1. — P. 51–57.

106. Glover W., Chan H.-K. Electrostatic charge characterization of pharmaceutical aerosols using electrical low-pressure impaction (ELPI) // Journal of Aerosol Science. — 2004. — Vol. 35, No. 6. — P. 755–764.

107. Kamiński M., Gac J. M., Sobiech P., Kozikowski P., Jankowski T. Pressure Drop Dynamics during Filtration of Mixture Aerosol Containing Water, Oil, and Soot Particles on Nonwoven Filters // Polymers. — 2023. — Vol. 15, No. 7. — Art. 1787

108. Пат. RU 2866220 C1. Высокоэффективный каскадный электростатический фильтр / Н. А. Першин, А. Н. Першин, А. А. Першин, В. В. Судьин, Д. В. Барсуков ; патентообладатель ООО «Информационно-технологический институт». — Заявка № 2025131053 ; приоритет 07.11.2025 ; зарегистр. 15.07.2026

109. Пат. RU 220312 U1 Российская Федерация. Устройство очистки воздуха с электростатическим фильтром / А. А. Першин, Н. А. Першин, Р. Р. Салимшин, Р. Р. Салимшин ; патентообладатель ООО «Завод Аэролайф». — № 2023117148 ; заявл. 29.06.2023 ; опубл. 06.09.2023.
110. ГОСТ Р 70064.2–2022. Фильтры очистки воздуха общего назначения. Часть 2. Определение фракционной эффективности и перепада давления. — М. : Российский институт стандартизации, 2022. — 44 с.
111. Pertegal V., Riquelme E., Lozano-Serra J., Cañizares P., Rodrigo M. A., Sáez C., Lacasa E. Cleaning technologies integrated in duct flows for the inactivation of pathogenic microorganisms in indoor environments: A critical review of recent innovations and future challenges // Journal of Environmental Management. — 2023. — Vol. 345. — Art. 118798.
112. Direct-reading instruments for aerosols: A review for occupational health and safety professionals part 1: Instruments and good practices / D. J. H. Vosburgh, E. Cauda, P. T. O'Shaughnessy [et al.] // Journal of Occupational and Environmental Hygiene. — 2022. — Vol. 19, № 12. — P. 696–705.