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

Специальность 1.3.17 - Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Долгопрудный - 2026

Работа выполнена в Московском физико-техническом институте (государственном университете).
Научный руководитель: Иванов Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, профессор.

Ведущая организация: ФИЦ ХФ РАН
Защита состоится «15:00» 24 октября 2026 г. в _15:00__ часов на заседании диссертационного совета ФЭФМ 1.3.17.003 созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (МФТИ, Физтех), по адресу: 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9.
С диссертацией можно ознакомиться [библиотека/репозиторий].
Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
[Ф.И.О., ученая степень]

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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,

В частности, для микроэлектронных производств в работе показано [1], 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 и учреждениях здравоохранения источником аэрозолей (в том числе и микробиологических) являются люди [2], поэтому создание чистых помещений с фильтрацией и контролем содержания аэрозолей необходимо во избежание микробиологического загрязнения продукции или заражения людей соответственно.

В общем правила для построения чистых помещений различного назначения устанавливаются [3], а стандарт [4] устанавливает строгие требования для эффективности систем улавливания аэрозолей за один проход по *наиболее проникающим частицам*:

Существуют высококлассные механические фильтры класса E11-U16, и они производятся в России [5]. Основным материалом для производства таких фильтров является фильтровальная бумага из стекловолокна (стеклобумага) [6].

Однако, как отмечено в [7] 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 [8].

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.

---

[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] ГОСТ Р ИСО 14644-1-2017. Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц.

[4] ГОСТ Р ЕН 1822-1-2010. Высокоэффективные фильтры очистки воздуха EPA, HEPA и ULPA. Часть 1. Классификация, методы испытаний, маркировка.

[5] Федотов А. Е. Чистые технологии — ключевое направление технического прогресса // Медицинский алфавит. Серия «Эпидемиология и гигиена». — 2012. — № 3. — С. 41–44

[6] 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.

[7] 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

[8] 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

Необходимо отметить, что за последние 10 лет время [9] количество работ по электретным фильтрам возросло значительно, что свидетельствует об интересе отрасли к данной технологии в целом.

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.

[9] 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

Практическая значимость работы

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 до в среднем 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 на фармацевтическом предприятии

Достоверность результатов обеспечивается:

- количеством проведенных измерений и вычислениями погрешностей результатов измерений;
- использованием нескольких методов измерений, имеющую качественную сопоставимость;
- согласованностью результатов экспериментов с теоретическими предсказаниями;

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.

Апробация работы и публикации

Основные результаты диссертации представлены тремя статьями в рецензируемых научных изданиях, а также защищены двумя патентами Российской Федерации. Основные результаты работы докладывались на конференциях Saint Petersburg OPEN 2024, 34-я конференция АСИНКОМ, 2024, XXX Юбилейный Международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы" Материалы опубликованы в «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы [Электронный ресурс]» XXX Международного симпозиума, г. Санкт-Петербург, 1–5 июля 2024 г. — Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2024

Личный вклад автора

Автор участвовал в постановке задач исследования, разработке и модернизации экспериментальных стендов, изготовлении и испытании цилиндрических полипропиленовых фильтров, проведении измерений концентрации и дисперсного состава аэрозолей, электрического заряда, локального потенциала и токов утечки, обработке и интерпретации результатов, разработке физической модели и конструктивных решений, а также подготовке публикаций и патентов.

Структура и объем диссертации

Диссертация изложена на 176 страницах и включает введение, четыре главы, заключение, список обозначений и сокращений, раздел о практической значимости и список литературы. Экспериментальные результаты сосредоточены преимущественно в третьей и четвертой главах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении

обоснована актуальность разработки высокоэффективных систем очистки воздуха для микроэлектронной промышленности, сформулированы цель и задачи исследования, показана необходимость совместного анализа структурных, аэродинамических и электрических характеристик возобновляемого электретного фильтра.

Первая глава

посвящена анализу физических свойств аэрозольных частиц и механизмов их улавливания. Рассмотрены диффузия, перехват, импакция, гравитационное и электростатическое осаждение, зарядка частиц ионами и коронный разряд. Для субмикронных частиц механическая эффективность исследуемого грубоволокнистого полипропиленового фильтра сравнительно невысока, поэтому определяющим фактором высокой эффективности системы является электростатический механизм. Оценены возможности классической электрофильтрации для задач тонкой очистки воздуха, а также выполнен расчет ячейки коронного разряда, использованного в работе, и оценка возможности его применения, в качестве источника ионов для зарядки аэрозолей.

Рассмотрены свойства электретных фильтров, механизмы поляризации и взаимодействия заряженных частиц с диэлектрическими волокнами. Описаны ограничения существующих работ по фильтрации заряженных аэрозолей на диэлектрических фильтрах и предложены конкретные измеримые характеристики фильтров (сумарный заряд и локальный потенциал), изучение которых по мнению автора должны привести к лучшему пониманию механизмов фильтрации.

Вторая глава

содержит описание методов изготовления фильтров, экспериментальных стендов и средств измерений. Цилиндрические фильтры изготавливались из полипропилена методом раздува расплава с намоткой на вращающуюся шпулю. Варьировались частота вращения шпули, расход ограждающего воздуха, давление прикатки и диаметр выходного отверстия фильеры.

В качестве тестовых аэрозолей использовались DEHS, оксиды никеля и алюминия, сажа и йодид калия. Показаны принципиальные схемы генерации аэрозолей. Размеры и концентрации частиц измерялись системой SMPS 3936 и оптическим счетчиком Lighthouse Solair 3100. Основной стенд включал генератор аэрозоля, блок коронного разряда, цилиндрический фильтр, средства измерения концентрации до и после фильтра, дифференциальный манометр и вентилятор (рисунок 1).

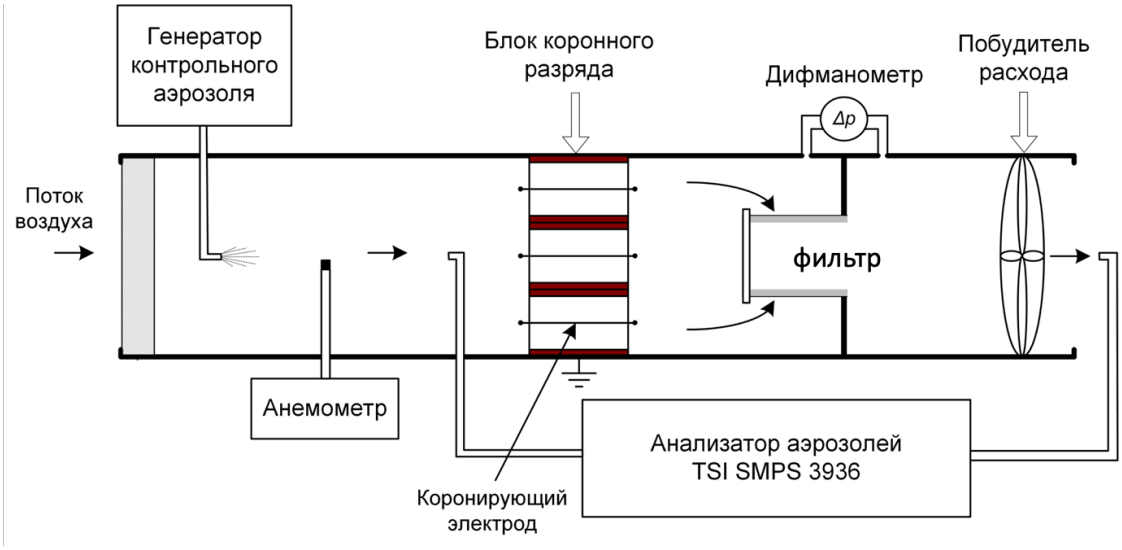

Рисунок 1 Схематическое изображение главного измерительного стенда

В блоке зарядки использовалась геометрия «проволока - обечайка» с вольфрамовой проволокой диаметром 0,1 мм.

Проскок определяли как отношение концентрации частиц после фильтра к концентрации перед ним. Оценивали как интегральный проскок частиц, так и по каждому измеренному размеру частиц с построением кривой зависимости P(d) Для оценки сочетания эффективности и сопротивления использовали фактор качества $QF = -\ln(P)/\Delta P$.

Третья глава

посвящена установлению взаимосвязей между технологическими параметрами изготовления цилиндрических полипропиленовых волокнистых фильтров, формируемых намоткой расплава на вращающуюся шпулю, их структурой и эксплуатационными характеристиками. Исследованы однородность структуры, влияние прикатки, частоты вращения шпули, расхода ограждающего воздуха, толщины фильтрующей стенки и диаметра фильеры. Эксплуатационные свойства оценивали по аэродинамическому сопротивлению, интегральному и размерному проскоку аэрозоля, а также фактору качества.

Однородность структуры и влияние прикатки

Для оценки однородности из внутренней, средней и внешней областей фильтра вырезали образцы, заливали их эпоксидной смолой, шлифовали и исследовали методами оптической микроскопии. Отдельно полученные компьютерной обработкой оптических фотографий данных выборочно проверяли вручную при помощи данных растровой электронной микроскопии. Определяли средний диаметр волокон, пористость, диаметр мелких волокон и удельную площадь поверхности. Разброс измеренных структурных параметров между различными областями одного фильтра не превышал 7 %, что позволило считать изготовленные элементы достаточно однородными для последующих сравнительных испытаний.

Внутренний и внешний корды толщиной 2–3 мм формировались без прикатки, тогда как средняя часть фильтра подвергалась воздействию прижимного цилиндра. Микроскопия показала различие морфологии: в корде волокна преимущественно сохраняли округлое сечение, а в средней части наблюдались деформированные и более тонкие волокна. Горячий полипропилен прилипал к поверхности прижимного цилиндра и вытягивался при отрыве, вследствие чего формировалась дополнительная фракция тонких волокон.

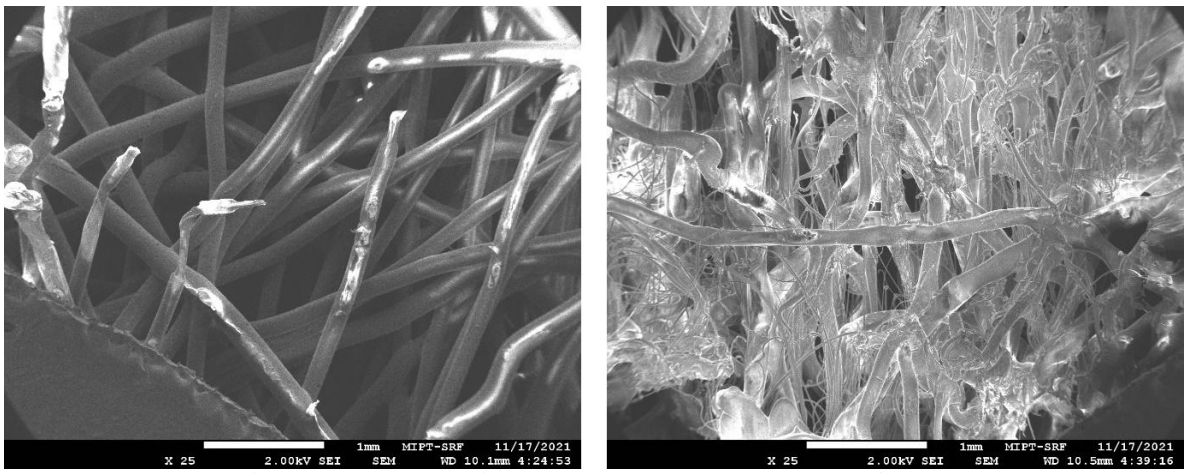

Рисунок 2 — РЭМ-изображения волокон в области корда (слева) и средней части фильтра, подвергавшейся прикатке (справа)

Влияние параметров изготовления на структуру фильтра

Увеличение частоты вращения шпули с 100 до 250 об/мин сопровождалось уменьшением толщины стенки с 21,3 до 18,6 мм и снижением пористости с 81,4 до 75,3 %. Это указывает на более плотную упаковку волокон при увеличении скорости намотки. Средний диаметр волокон изменялся немонотонно и достигал максимума 431 мкм при 190 об/мин. При увеличении давления прикатки с 15 до 45 кПа пористость возрастала с 69,3 до 73,1 %, однако средний диаметр волокон и площадь поверхности изменялись немонотонно. Повышение расхода ограждающего воздуха с 70 до 100 л/мин приводило к уменьшению толщины стенки с 14,0 до 13,1 мм и пористости с 70,5 до 64,8 %, а средний диаметр волокон увеличивался с 370 до 653 мкм. Расход ниже 70 л/мин оказался технологически неприемлемым, поскольку волокно не достигало шпули.

Уменьшение диаметра фильеры с 0,8 до 0,6 и 0,3 мм уменьшало диаметр волокон соответственно с 301 до 292 и 220 мкм.

Влияние толщины фильтра

Толщина фильтрующей стенки изменялась от 14,9 до 23,0 мм. При этом масса фильтра возрастала с 593,3 до 1138,2 г, пористость уменьшалась с 78,1 до 74,2 %, а перепад давления при расходе 215 м³/ч увеличивался почти линейно с 94 до 190 Па. Одновременно интегральный проскок снижался примерно в 5 раз — с 1,1 до 0,2 %. Следовательно, увеличение толщины является эффективным и предсказуемым способом повышения эффективности, хотя сопровождается ростом энергозатрат.

Таблица 1. Зависимость проскока и сопротивления от толщины

Толщина, мм	Δp при 215 м³/ч, Па	Δp при 79 м³/ч, Па	Проскок, %	QF при 215 м³/ч, Па⁻¹
14,9	94	40	1,1	0,04798
16,1	110	48	0,7	0,04511
18,6	134	57	0,5	0,03954
20,1	156	67	0,3	0,03724
23,0	190	81	0,2	0,03271

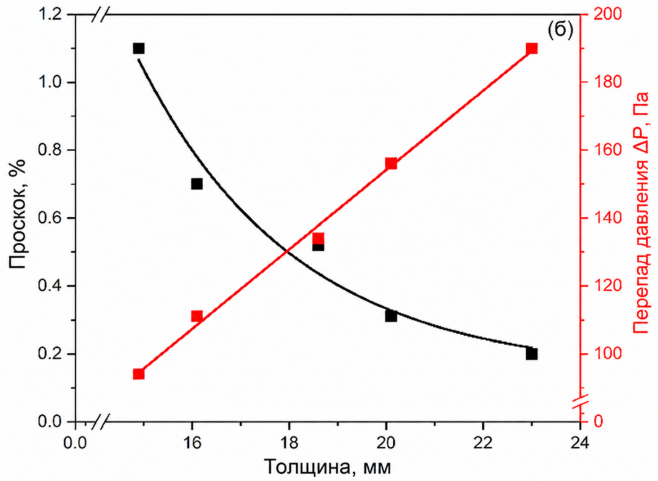

Рисунок 3— Зависимость интегрального проскока и перепада давления от толщины фильтра;

Зависимость проскока от размера частиц

На размерных кривых обнаружен максимум проскока в области 30–40 нм, затем проскок уменьшается и после приблизительно 250 нм выходит на плато. Положение наиболее проникающего размера частиц смещено относительно типичных электретных материалов, для которых максимум часто наблюдается около 80–100 нм. Это может быть связано с существенно большим диаметром волокон исследованных фильтров — 100–300 мкм против единиц микрон у типичных электретных фильтров [10]. С ростом диаметра волокон. возрастает число Пекле и ослабевают диффузионный и диффузионно-перехватный механизмы [11]. Поэтому наиболее проникающий размер смещается в область более мелких частиц.

[10] 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

[11] Hinds W. C. Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles. — 2nd ed. — New York : Wiley-Interscience, 1999.

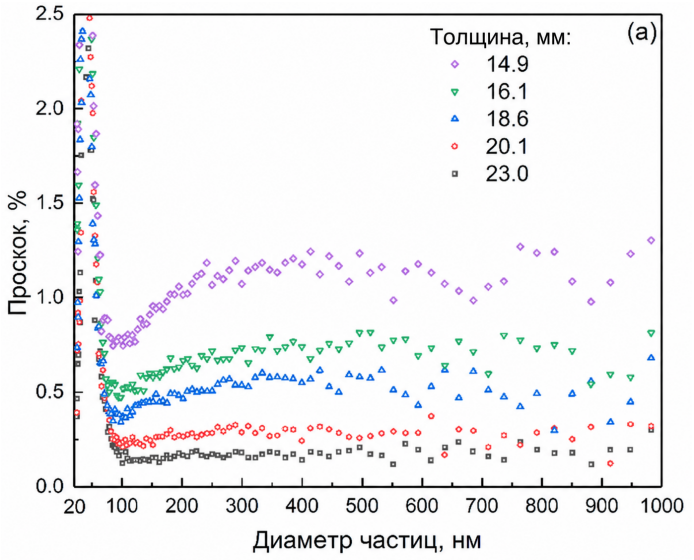

Рисунок 4 — Зависимость проскока от размера частиц для разных толщин фильтра

Влияние расхода воздуха

При увеличении расхода воздуха с 79 до 215 м³/ч проскок возрастал с 0,03 до 0,95 %, то есть более чем в 30 раз, тогда как перепад давления увеличивался с 31 до 96 Па — приблизительно в 3 раза. Фактор качества снижался с 0,2617 до 0,0485 Па⁻¹. Полученный результат объясняется сокращением времени пребывания частиц в фильтрующем слое и ослаблением диффузионного и электростатического осаждения. Импакция не компенсирует этот эффект, поскольку для субмикронных частиц её вклад мал.

Таблица 2. Зависимость проскока и сопротивления от толщины

Расход, м³/ч	**Перепад давления, Па**	**Проскок, %**	**Набегающая скорость, м/с**	**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

Влияние частоты вращения шпули

При повышении частоты вращения шпули от 100 до 250 об/мин интегральный проскок уменьшался приблизительно в 5 раз — с 1,13 до 0,23 %. Одновременно перепад давления при 215 м³/ч возрастал со 101 до 202 Па. Снижение проскока происходило не за счёт увеличения толщины: толщина, напротив, уменьшалась, а плотность упаковки волокон возрастала. Фактор качества несколько снижался, поскольку рост сопротивления опережал улучшение эффективности. С практической точки зрения повышение частоты свыше 220 об/мин может быть нецелесообразно из-за ускоренного износа узлов намоточной установки.

Влияние давления прикатки

Влияние давления прикатки оказалось немонотонным. При частоте вращения шпули 190 об/мин фильтры без прикатки и при 5 кПа имели близкий проскок — 2,1 и 2,2 %. В другой серии, при 120 об/мин, увеличение давления с 15 до 25 кПа снижало проскок с 2,9 до 2,3 %, но дальнейшее повышение до 35–45 кПа увеличивало его до 3,6–3,3 %. Прикатка способна улучшать структуру за счёт образования тонких волокон, однако чрезмерное давление по-видимому деформирует и уплотняет материал, повышая сопротивление и снижая фактор качества.

Влияние диаметра фильеры

Уменьшение диаметра выходного отверстия фильеры с 0,8 до 0,6 мм уменьшало средний диаметр волокон и одновременно улучшало обе основные эксплуатационные характеристики. Интегральный проскок

снижался с 1,1 до 0,7 %, а перепад давления при 215 м³/ч — с 94 до 79 Па. В результате фактор качества возрастал с 0,04798 до 0,06281 Па⁻¹. Таким образом, уменьшение диаметра фильеры однозначно положительно сказывается на качестве изготавливаемых фильтров.

Таблица 3 Характеристики фильтров изготовленных с помощью с фильер различного диаметра

Диаметр фильеры, мм	ΔP при 215 м³/ч, Па	ΔP при 79 м³/ч, Па	Проскок, %	QF при 215 м³/ч, Па⁻¹	QF при 79 м³/ч, Па⁻¹
0,6	79	34	0,7	0,06281	0,14594
0,8	94	40	1,1	0,04798	0,11275

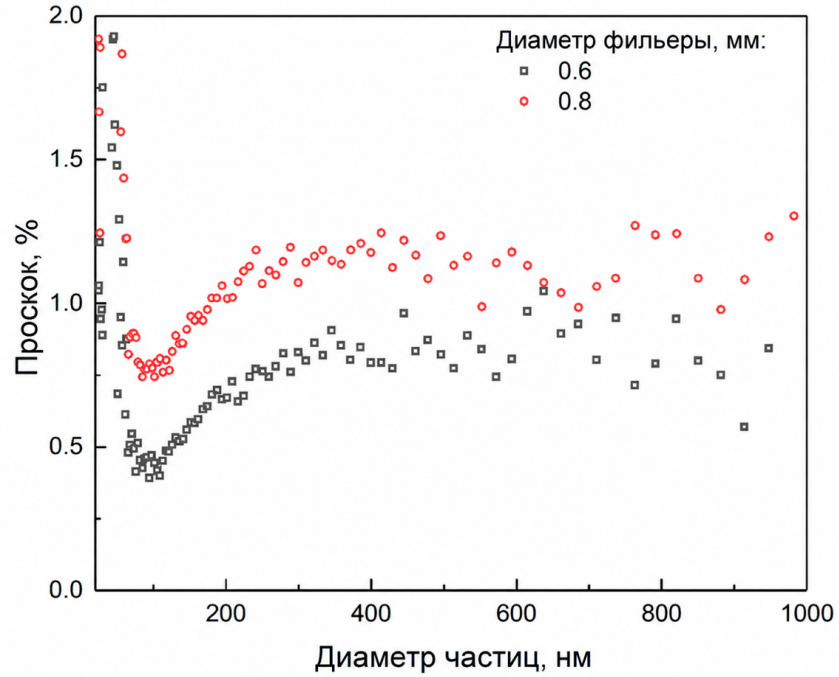

Рисунок 5. Зависимость проскока от размера частиц для фильтров, изготовленных с использованием фильер различного диаметра.

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 импакционный 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.

Четвертая глава

посвящена исследованию электрических свойств системы, состоящей из блока предварительной униполярной зарядки аэрозоля и цилиндрического полипропиленового волокнистого фильтра. Основная задача главы заключалась в установлении связи между электрическим состоянием фильтра — его суммарным зарядом, локальным потенциалом, токами стекания и поверхностной проводимостью — и эффективностью улавливания аэрозольных наночастиц.

Механическая эффективность и влияние зарядки аэрозоля

Вначале была оценена собственная механическая эффективность фильтра. Расчет по [9] для фильтра толщиной 16 мм, диаметром волокна 200 мкм и пористостью 80 % показал, что интегральный проскок по частицам DEHS с максимумом распределения в 181 нм и среднем арифметическим размером в 204 нм должен составить около 96%. На практике оказалось, что это значение несколько ниже – 79,5%, что может быть связано с некоторым пространственным разделением зарядов на волокне и приобретением фильтров электретных свойств еще на этапе изготовления (специально на производстве фильтров заряд снимается). 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 Сравнение механической фильтрации и электростатической

Начальный перепад давления, Па	Расчётный интегральный проскок при заданном распределении, %	Расчётный фактор качества, $Па^{-1}$	Проскок незаряженных частиц, %	Фактор качества для незаряженных частиц, $Па^{-1}$	Проскок заряженных частиц, %	Фактор качества для заряженных частиц, $Па^{-1}$
26	96,0	0,0016	79,48	0,0088	1,10	0,1735

Также сравнили влияние полярности зарядки для аэрозоля DEHS: положительная корона (+9кВ) обеспечивала несколько более высокую эффективность чем отрицательная (-11кВ): интегральный проскок составил 0,45 % и 0,85 % соответственно. Необходимо отметить, что согласно [11] 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 [12, 13]

Влияние природы аэрозоля

Работоспособность системы проверялась на аэрозолях различной физико-химической природы: жидком диэлектрическом DEHS, твердых проводящих частицах оксидов никеля и технического углерода, диэлектрическом негигроскопичном Al_2O_3 и гигроскопичном KI. Полученные результаты показали, что электростатический механизм обеспечивает высокую эффективность для частиц различной природы.

Таблица 5 Сравнение эффективности по аэрозолям разной природы

Аэрозоль	**Характеристика**	**Проскок, %**	**Эффективность, %**
DEHS	жидкий диэлектрический	0,38	99,62
Ni_xO_γ	проводящий	0,47	99,53
Al_2O_3	диэлектрический	0,55	99,45
KI	гигроскопичный	1,79	98,21
Сажа	проводящий	≈6,0	≈94,0

[12] 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

[13] 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

Проверяя проскок аэрозолей разной природы на фильтрах, изготовленных при разных технологических режимах, было установлено, что если фильтр эффективно улавливает аэрозоль одного типа, то он также будет сравнительно эффективен и при улавливании аэрозоля другого типа

Таблица 6 Сравнение эффективности по аэрозолям разной природы для разных фильтров

Фильтр	Частота вращения шпули, об/мин	Давление прикатки, кПа	Диаметр фильеры, мм	Проскок DEHS (20–900 нм), %	Проскок сажи (6–37 нм), %
1	130	25	0,6	**0,26 ± 0,05**	**4,62 ± 1,56**
2	130	25	0,8	**0,36 ± 0,06**	**6,03 ± 1,58**
3	190	25	0,8	**1,11 ± 0,01**	**9,61 ± 2,35**
4	130	25	0,8	**2,31 ± 0,02**	**17,45 ± 1,57**

Влияние времени зарядки

Заряд фильтра в исследуемой системе формируется преимущественно вследствие осаждения предварительно заряженных аэрозольных частиц. Поэтому электрическое состояние фильтра и его эффективность изменяются во времени. При увеличении времени зарядки с 5 до 180 мин суммарный проскок уменьшался с 0,68 до 0,17 %. После приблизительно 180 мин достигалось насыщение, и дальнейшее увеличение времени практически не влияло на эффективность. Это свидетельствует об установлении равновесия между поступлением заряда с частицами и его утечкой.

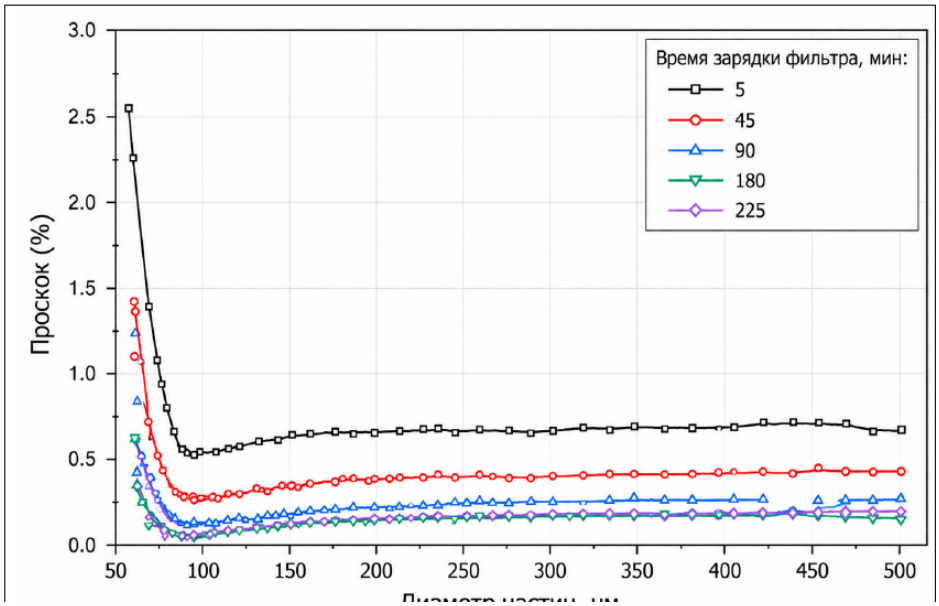

Рисунок 6 — Зависимость проскока от размера частиц при различном времени зарядки фильтра

Методики измерения электрических характеристик

Для прямого исследования электрического состояния фильтра разработана методика измерения его суммарного заряда с использованием цилиндрической клетки Фарадея. Заряд определяли по выражению $qf = C_1 \cdot U_{Фарадея} \cdot k$, где $C_1 = 171 \pm 1$ пФ — емкость между обкладками клетки, $U_{Фарадея}$ — измеренная разность потенциалов, $k = 1{,}8$ — поправочный коэффициент, учитывающий перфорацию внутренней обкладки. Методика обеспечивала измерение суммарного заряда в диапазоне 15–5000 нКл.

Для измерения локального потенциала поверхности in situ был разработан контактный зонд, подключенный к электростатическому киловольтметру. Диапазон измерения локального потенциала составлял от 100 В до 30 кВ. Метод позволял определять распределение потенциала по поверхности фильтра и отслеживать его изменение непосредственно во время работы.

Влияние конфигурации заземляющего электрода

Показано, что длина и глубина расположения заземляющей проволоки существенно влияют на электрическое состояние фильтра. При глубине залегания 1 мм уменьшение длины проволоки с 13,9 до 1,9 м приводило к увеличению суммарного заряда с 37 до 151 нКл. Одновременно потенциал между витками возрастал с 0,3 до 3,5 кВ, а непосредственно над проволокой — с 0,1 до 1,0 кВ. При поверхностном расположении электрода формировалось характерное волнообразное распределение потенциала с минимумом над проволокой и максимумом между витками.

При увеличении глубины залегания электрода с 3 до 13 мм суммарный заряд возрастал с 95 до 426 нКл. Одновременно распределение потенциала становилось более равномерным; при глубине 13 мм локальный потенциал достигал примерно 10,5 кВ как над проволокой, так и между витками. Это объясняется увеличением электрического сопротивления пути стекания заряда к глубоко расположенному электроду.

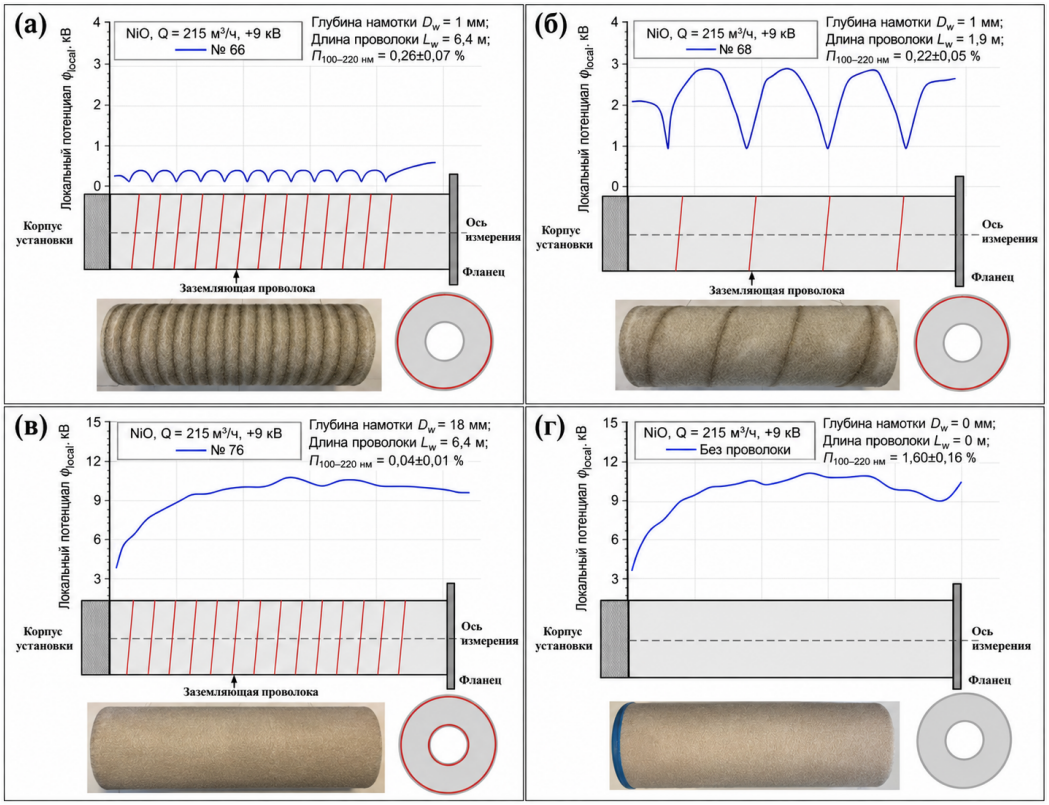

Рисунок 7 — Распределение локального потенциала для различных конфигураций заземляющего электрода

Изменение конфигурации электрода непосредственно влияло на эффективность. При увеличении глубины его расположения с 3 до 13 мм проскок частиц NiO размером 100–220 нм уменьшался с 0,29 до 0,14 %. При уменьшении длины проволоки с 13,9 до 1,9 м проскок в том же диапазоне уменьшался с 0,38 до 0,23 %. Таким образом, уменьшение интенсивности отвода заряда позволяет фильтру накопить больший заряд и повысить эффективность.

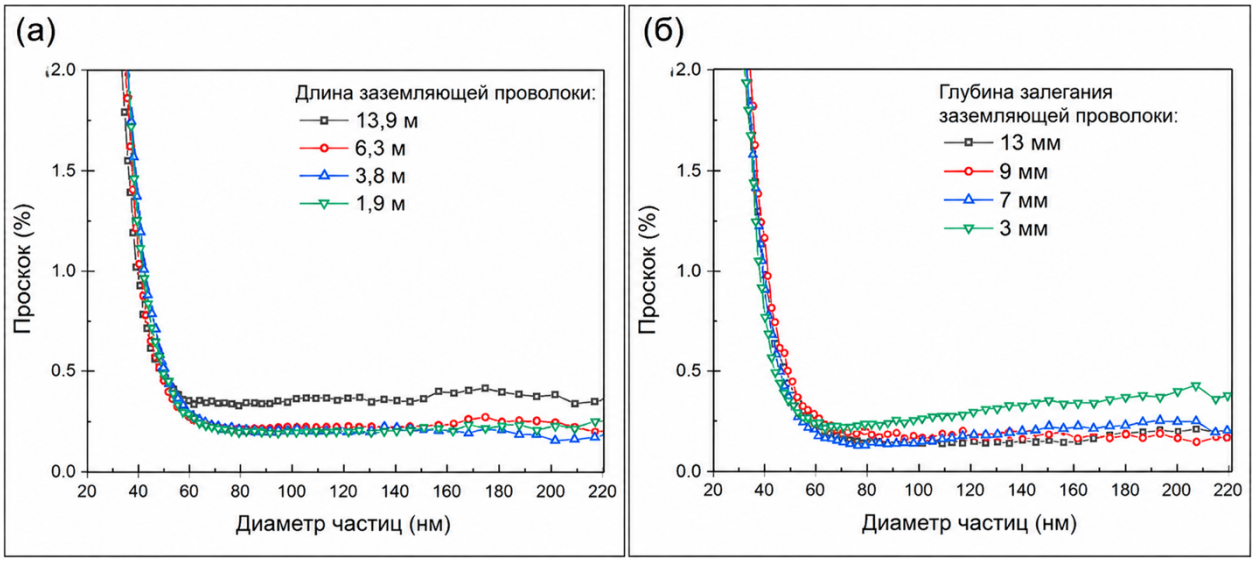

Рисунок 8 (а) зависимость проскока аэрозольных частиц на основе NiO от размера частиц при различных длинах заземляющего электрода; (б) зависимость проскока аэрозольных частиц на основе NiO от размера частиц при различных глубинах намотки заземляющего электрода

Микроскопическое подтверждение влияния локального потенциала

Растровая электронная микроскопия показала связь между локальным потенциалом и распределением осажденных частиц. На фильтре без заземляющего электрода исследовались области с локальными потенциалами 3, 9 и 11 кВ. Наиболее интенсивное загрязнение наблюдалось в области с минимальным потенциалом. Для фильтра с проволокой область непосредственно над электродом при φlocal = 0,11 кВ была значительно сильнее покрыта частицами (рис 9б), чем область между витками при φlocal = 0,35 кВ (рис. 9а)

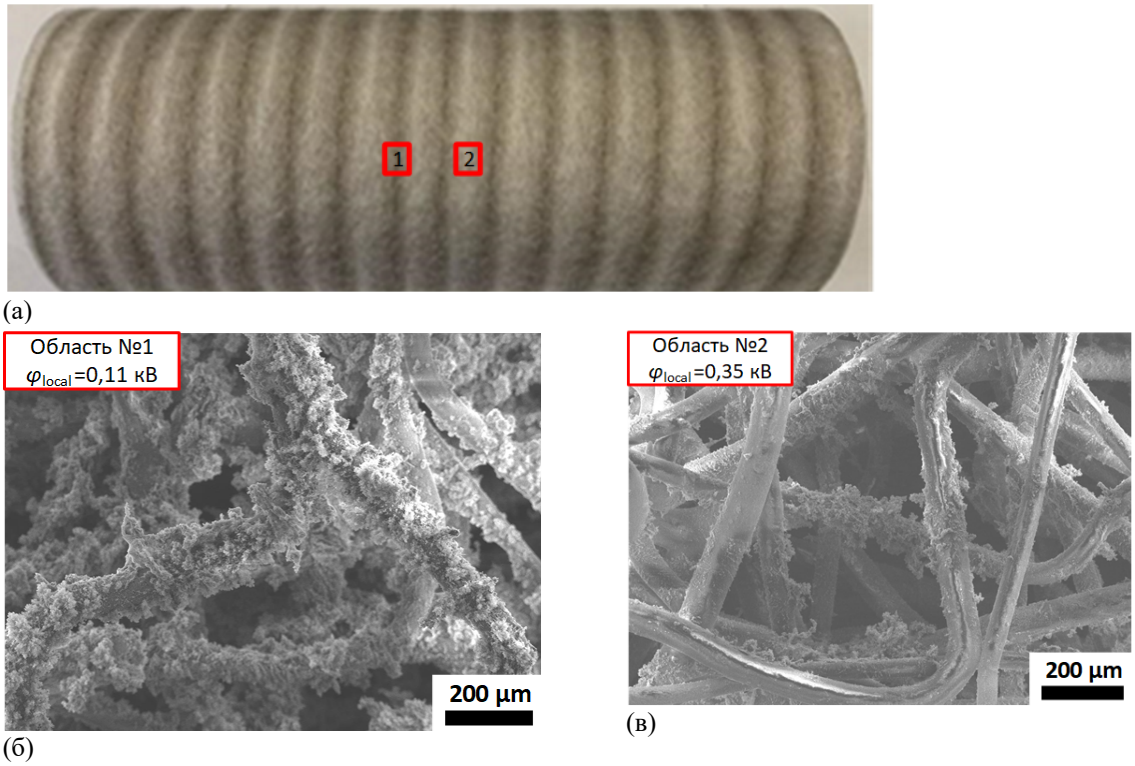

Рисунок. 9. (а) Фотография фильтра без проволоки с указанием исследованных областей поверхности фильтра на РЭМе; (б-в) РЭМ изображения областей поверхности фильтра с проволокой с различными локальными потенциалами.

Тормозящее действие волокон на частицы

Исходя из вышесказанного мы приходим к тому, что предварительно заряженные волокна фильтра будто бы выталкивают частицы, заряженные тем же знаком, по мере их приближения к фильтру, и чем сильнее заряжен фильтр, тем сильнее отклоняются частицы от линии тока воздуха (рис 10).

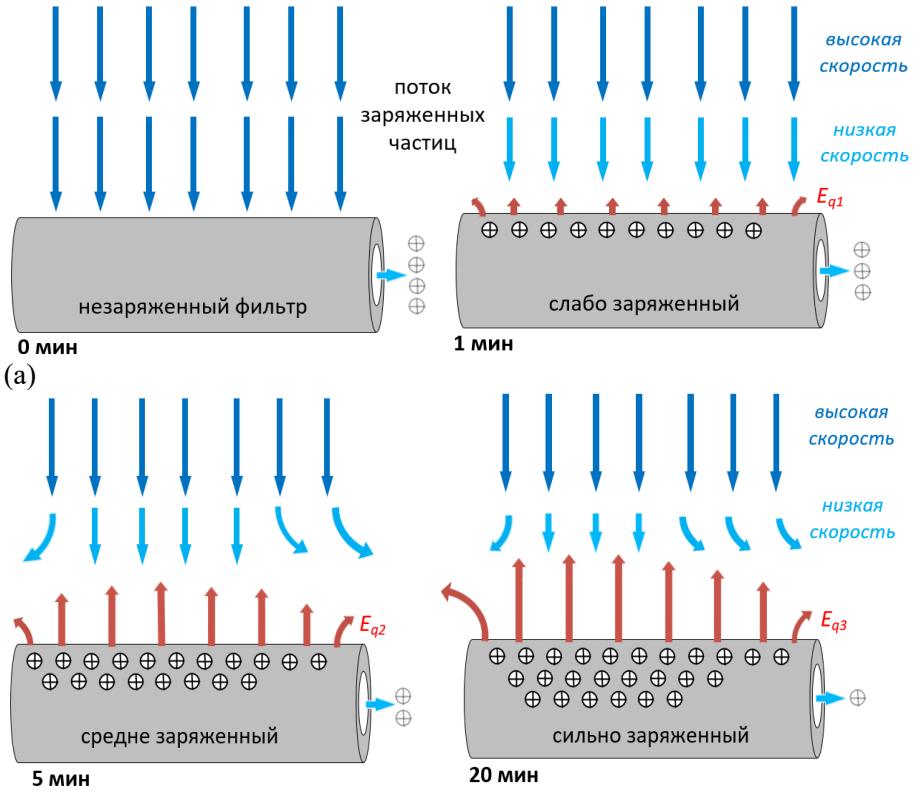

Рисунок. 10. Схематическое изображение влияния суммарного заряда на траекторию движения в зависимости от накопленного заряда

В случае наличия витков проволоки у поверхности волокна частицы «фокусируются» в область меньшего потенциала (рис. 11), что подтверждается как наличием темных полос в области витков проволоки, так и микроскопическими фотографиями запыленности волокна (рис 9).

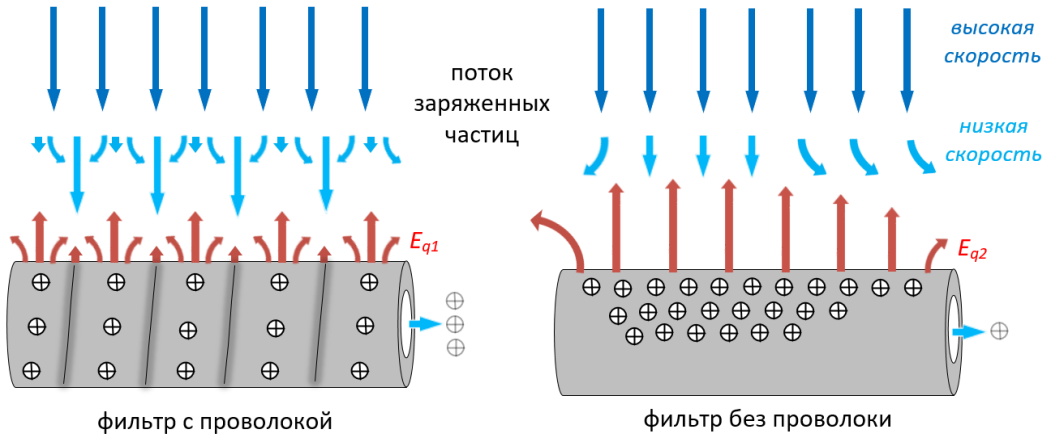

Рисунок 11. Схематическое изображение распределение напряженности (потенциала) электрического поля и траектории движения частиц для фильтра с проволокой и без проволок.

Ток заземления и параметры аэрозоля

При постоянной концентрации увеличение среднего размера частиц NiO с 56 до 100 нм приводило к росту тока заземления с 99 до 189 нА. Средний переносимый одной частицей заряд при этом увеличивался с $2{,}5\cdot10^{-19}$ до $4{,}7\cdot10^{-19}$ Кл. При постоянном среднем диаметре 80±5 нм увеличение концентрации частиц с $4{,}43\cdot10^{6}$ до $6{,}70\cdot10^{6}$ см$^{-3}$ сопровождалось ростом тока заземления с 96 до 128 нА и суммарного заряда фильтра с 99 до 145 нКл.

При изменении расхода воздуха от 215 до 550 м³/ч при неизменной производительности генератора ток заземления практически не изменялся и оставался в диапазоне около 175±15 нА. Полученный результат показывает, что определяющим фактором является не объемный расход воздуха как таковой, а поток электрического заряда, переносимый аэрозольными частицами.

Связь суммарного заряда и эффективности

Прямая связь между суммарным зарядом и проскоком была установлена при изменении концентрации NiO. При концентрациях 1,09; 4,13 и $6{,}56\cdot10^{6}$ частиц/см³ суммарный заряд фильтра составлял соответственно 31, 114 и 230 нКл, а проскок частиц 100–220 нм — 1,27; 0,67 и 0,51 %. Таким образом, увеличение суммарного заряда с 31 до 230 нКл привело к снижению проскока примерно в 2,5 раза (рис 12б)

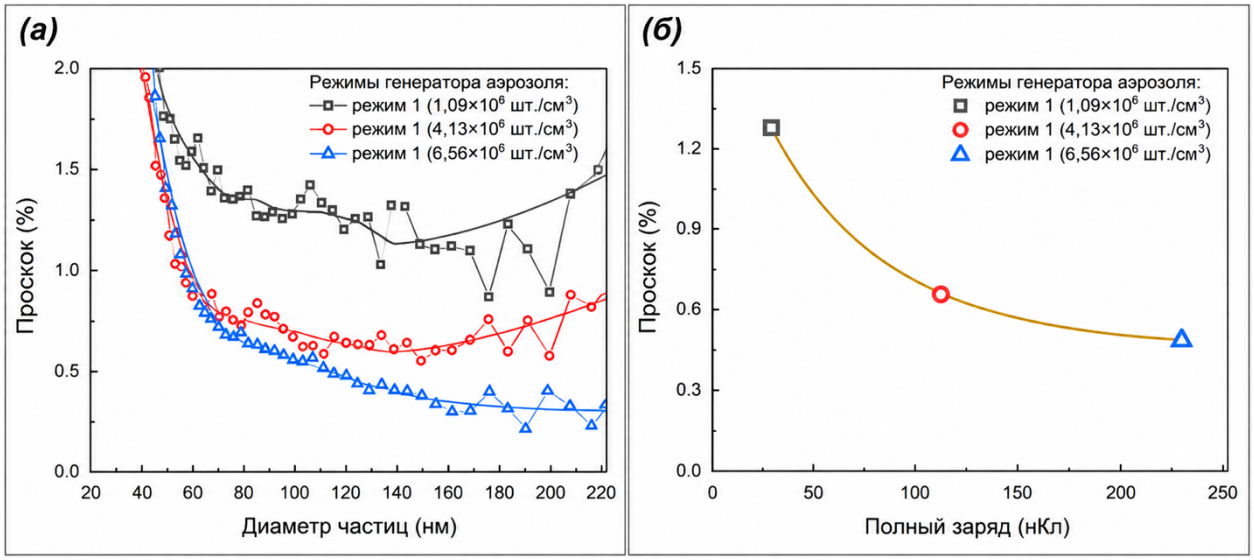

Рисунок 12 а) Зависимость проскока от размера частиц при различной концентрации на входе; б) зависимость проскока от суммарного заряда фильтра при различной концентрации частиц на входе

Влияние поверхностной проводимости при запылении

Для оценки долговременной устойчивости электрических свойств фильтр нагружали проводящими частицами оксида никеля. По мере накопления частиц поверхностная проводимость возрастала, а способность фильтра удерживать заряд снижалась. После накопления 720 мг NiO проводимость поверхности начала превышать 0,03 пСм. При увеличении массы осадка до 1680 мг проводимость достигла 1,03 пСм, суммарный заряд уменьшился со 108 до 18 нКл, а проскок частиц 100–220 нм вырос с 0,75 до 4,29 %. Следовательно, для длительного сохранения высокой эффективности фильтр должен сохранять диэлектрические свойства и препятствовать стеканию приобретенного заряда.

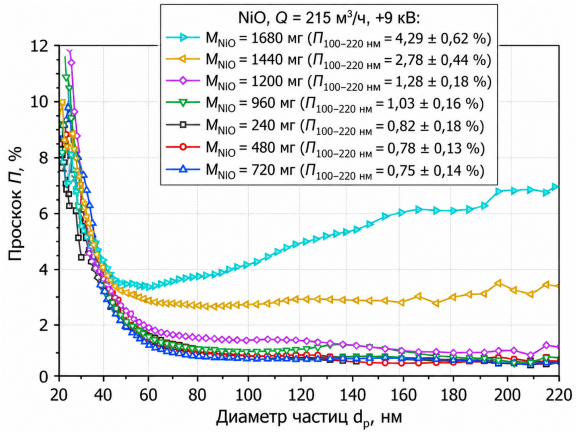

Рисунок 13. Зависимость проскока аэрозольных частиц от их размера для фильтров с различной аэрозольной нагрузкой (использовался фильтр без заземляющего электрода)

Модель электрических свойств фильтра

Для объяснения экспериментальных результатов волокнистая структура (рис 14а) представлена в виде сети электрических сопротивлений (рис 14б)) Для свежего фильтра без встроенного заземляющего электрода сопротивление вдоль длины значительно больше сопротивления по толщине, поэтому потенциал по толщине распределяется сравнительно равномерно. Заряд возрастает до установления баланса между током заряженных частиц и током утечки на корпус.

При наличии заземляющей проволоки (рис 14в) появляется дополнительный путь стока заряда. В стационарном состоянии выполняется условие $I_{частицы} = I_{проволока} + I_{корпус}$. Проволока, через которую течет $I_{проволока}$ создает локальные минимумы потенциала и тем самым формирует неоднородность электрического поля и распределения осажденных частиц.

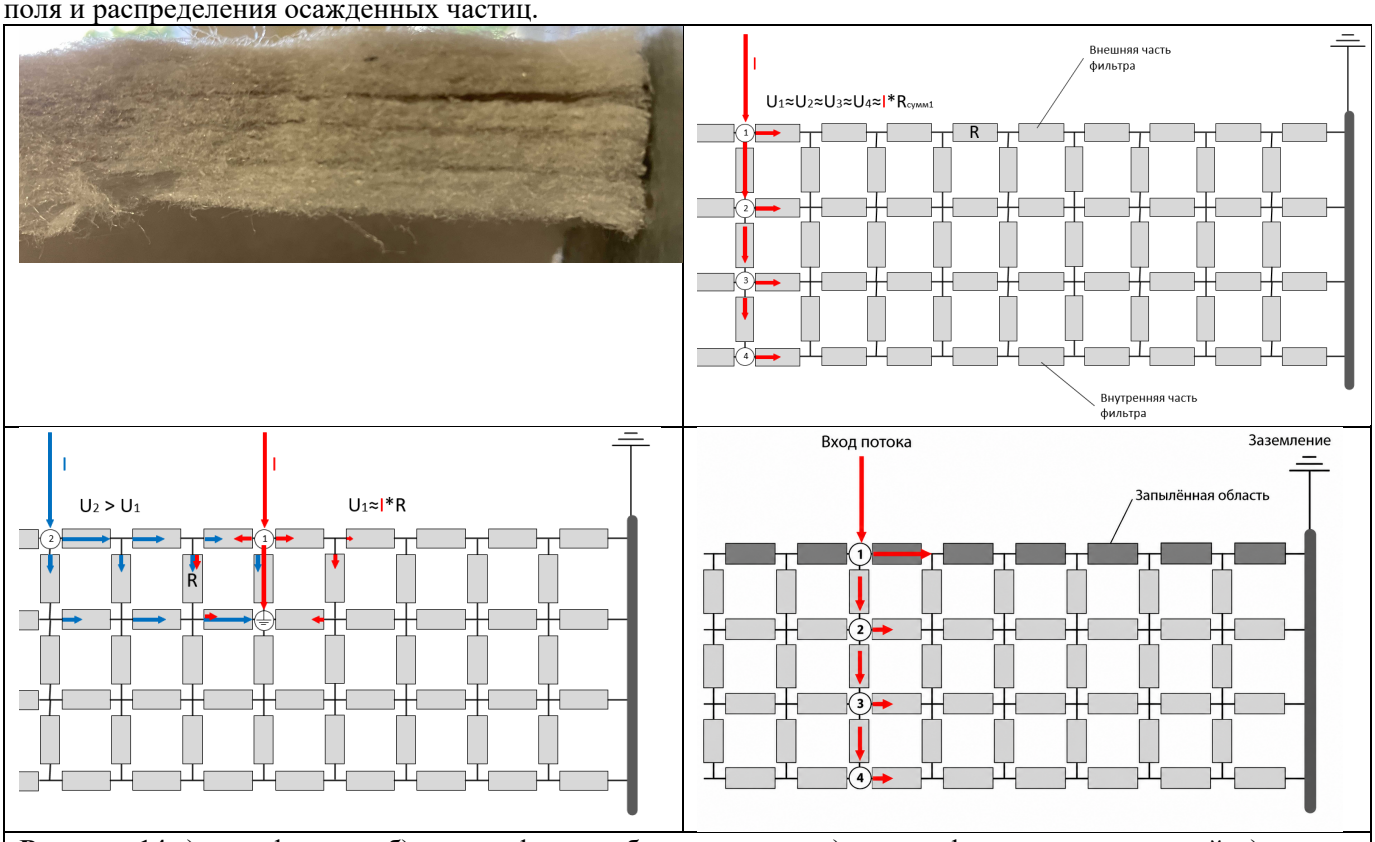

Рисунок 14 а) слои фильтра, б) модель фильтра без проволоки, в) модель фильтра с проволокой, г) модель запыленного фильтра

При накоплении проводящей пыли сопротивление поверхностного слоя уменьшается (рис 14г), поверхностный ток возрастает, суммарный заряд и абсолютные значения потенциала снижаются, а эффективность падает.

Каскадный фильтр

На основе предполагаемого механизма предложена, испытана и запатентована каскадная конструкция фильтра, предназначенная для ограничения перетока заряда из внутренних слоев во внешние загрязненные слои. Фильтр состоит не менее чем из двух коаксиальных диэлектрических фильтрующих цилиндров, разделенных воздушным промежутком. (рис 15) Межслойное пространство может быть заполнено сорбентом или катализатором разложения озона. Результаты испытаний приведены в таблице 6

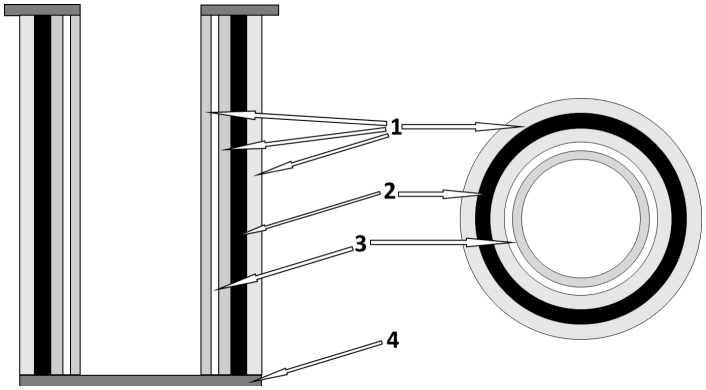

Рисунок 15. 1 – фильтрующий элемент, состоящий из диэлектрического волокнистого материала, сформированного волокнами из высокопористого гидрофобного диэлектрического материала, 2 – наполнитель, представляющий собой сорбент или катализатор разложения озона, 3 – зазор между слоями фильтра, 4 – глухой фланец фильтра.

Таблица 6. Эксплуатационные характеристики каскадного фильтра

Расход воздуха	80 м³/ч
Перепад давления	64 Па
Эффективность	99,99752 %
Проскок	0,00248 %
Класс фильтрации	H14
Фактор качества	0,1657 $Па^{-1}$
Эффективность удаления озона	>99,9 %

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. Возможность помещения гранулированной засыпки в межслойное пространство позволяет создавать фильтры, самостерилизующиеся в процессе работы озоном, создаваемым коронным разрядом.

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 ~70 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 публикаций по теме диссертации

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. 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
3. 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
4. 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.
5. 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