EDN: TUKRGG DOI: https://doi.org/10.65912/2782-5507.2026.23.4.003

УДК 621.396.6:621.372.852 *2.2.8*

МНОГОСЛОЙНЫЙ ЭЛЕКТРЕТНЫЙ ФИЛЬТРУЮЩИЙ МАТЕРИАЛ И КИБЕРФИЗИЧЕСКАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ФИЛЬТРА ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖИДКИХ СРЕД ОТ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ И БИОЗАГРЯЗНЕНИЙ

Л.Р. Галеева [1], М.Ф. Галиханов [2,3]

[1]Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68

[2]Российская инженерная академия, Российская Федерация, 125009, г. Москва, Газетный пер., д. 9, стр. 4

[3]Институт прикладных исследований Академии наук Республики Татарстан, Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Лево-Булачная, д. 36а

Аннотация. Разработаны многослойные фильтрующие материалы и фильтры на их основе, которые предлагаются для очистки жидких сред. Фильтр представляет собой сложную конструкцию, состоящую из нескольких слоев полимерных и бумажных фильтровальных материалов (сеток, нетканых полотен, мембран, листов с перфорацией и т.п.), обеспечивающих высокую механическую фильтрацию. Часть полимерных слоев находится в электретном состоянии, что способствует задержке загрязняющих частиц, включая наночастицы, за счет электростатического притяжения. Дополнительно электретные слои обладают антибактериальными свойствами, что актуально для предотвращения микробного загрязнения фильтруемых жидкостей. Фильтрующий материал и фильтр на его основе обладают высокой эффективностью, долговечностью и могут применяться в химической, пищевой и фармацевтической промышленности. Обоснована возможность перехода от пассивного фильтра к интеллектуальной фильтрующей системе, функционирующей как киберфизический объект. Киберфизическая архитектура системы должна включать фильтрующий элемент, сенсорный слой, систему сбора и передачи данных, алгоритм обработки измерений и модуль принятия решения о регенерации или замене фильтра. В качестве основных диагностических параметров могут быть определены перепад давления, расход фильтруемой среды, время фильтрации заданного объема и параметры электретного состояния (потенциал поверхности, эффективная поверхностная плотность заряда и/или напряженность электрического поля электрета). Непосредственными индикаторами деградации фильтрационных свойств являются рост перепада давления, снижение расхода при постоянном перепаде давления, увеличение времени фильтрации и уменьшение электретного заряда, сопровождающееся снижением эффективности удержания мелкодисперсных частиц.

Ключевые слова: фильтр, аддитивные технологии, полимерные композиты, полипропиленовое нетканое полотно, целлюлозно-бумажный материал, электрет, антибактериальный эффект, киберфизическая система.

Введение

Современные фильтрующие материалы развиваются в направлении комплексного сочетания высокой эффективности улавливания частиц, минимального сопротивления потоку фильтруемой среды и антибактериальной активности. Особое значение это направление приобрело в связи с ростом требований к средствам индивидуальной защиты, системам вентиляции и очистки воздушных и водных сред, а также к промышленным фильтрационным установкам, работающим в условиях высокой аэрозольной и биологической нагрузки.

Фильтр перестает быть исключительно пассивным барьером и все чаще рассматривается как функциональный материал с управляемыми свойствами и предсказуемым сроком службы [1-4].

Одним из наиболее перспективных классов фильтроматериалов являются электретные фильтры [5-8]. Эффективность таких материалов определяется не только структурой (размером межволоконных ячеек), но и устойчивостью заряда. В работе [1] также показано, что для оптимизации эффективности и временной стабильности фильтров может использоваться численное моделирование, что приближает фильтр к логике киберфизической системы, в которой поведение объекта описывается и прогнозируется цифровыми средствами.

Другой современный тренд связан с развитием антибактериальных фильтрующих материалов. В обзоре [2] показано, что в качестве антибактериальных нетканых фильтрующих материалов используются melt-blown-материалы, электроспининговые нановолокнистые мембраны, содержащие в качестве функциональных добавок синтетические неорганические, органические и природные соединения. Эти добавки позволяют осуществить переход от однокомпонентной фильтрации к многоуровневым системам, совмещающим барьерную, сорбционную и биостатическую функции. Экспериментальные работы подтверждают, что такие материалы способны обеспечивать не только высокую степень очистки от загрязняющих частиц, но и подавление жизнеспособности бактерий *E. coli* и *S. aureus* при сохранении приемлемого перепада давления [4].

Важным направлением является разработка электретных фильтров с сохранением эффективности при высокой влажности (в т.ч. для жидких сред) в условиях длительной эксплуатации. Исследование [8] показало, что поведение электретных сред для аэрозолей существенно зависит от относительной влажности. В работе [7] показана возможность использования электретных полипропиленовых нетканых полотен для фильтрации парфюмерных жидкостей. Однако отмечено, что при переводе фильтроматериалов в электретное состояние время фильтрации увеличивается, что связано с возникновением поляризационного заряда как энергетического барьера, на преодоление которого расходуется движущая сила растекания жидкости по поверхности волокон, и с повышением динамической вязкости жидких сред в электрическом поле электрета.

Отдельного внимания заслуживают нановолокнистые мембраны, в которых ультратонкие волокна позволяют существенно увеличить площадь взаимодействия с аэрозолем и снизить сопротивление среды при заданной эффективности фильтрации. При этом авторы работы [4] наблюдали и значительный антибактериальный эффект. В работе [4] в 2024 году аналогичный подход был развит в фильтрующих структурах с серебряными наночастицами, где достигались высокая эффективность, низкое сопротивление и выраженные антимикробные свойства [9]. Приданию фильтроматериалам антибактериальных свойств посвящены работы [10-12].

Интересным выглядит рассмотрение фильтрующей системы как фильтрующей среды [13]. Описанная фильтрующая среда содержит по меньшей мере два слоя нетканого материала, соединенных между собой, причем волокна имеют средний диаметр от 600 до 1200 нм, которые электрически заряжают. Такую фильтрующую среду применяют в качестве жидкостного фильтра, воздушного фильтра, фильтра для воздухотехнических установок, фильтра для газовых турбин, внутреннего фильтра в помещении, фильтра тонкой фильтрации пыли из наружного воздуха или фильтра для пылесоса [13].

Целью настоящей работы является разработка многослойного электретного фильтрующего материала для очистки жидких сред и разработка киберфизической архитектуры фильтрующей системы, обеспечивающей непрерывный мониторинг перепада давления, расхода и электретного состояния фильтра, а также расчетную оценку степени загрязнения и остаточного ресурса с последующим принятием решения о регенерации или замене фильтрующего элемента.

Материалы и методы

Объектами исследования в данной работе являются фильтрующие материалы на целлюлозной основе (обеззоленные фильтры «Красная лента» массой одного кв. метра 84 г) и полипропиленовые нетканые полотна (полученные методом «Спанбонд» плотностью 17 г/м^2 и полученные методом «Мелтблаун» плотностью 25 г/м^2).

Заряжение (электретирование) бумажных и полимерных фильтроматериалов осуществляли с помощью постоянного коронного разряда. Для этого материалы предварительно выдерживались в термошкафу при 105 ºС в течение 10 минут, поле чего помещались в коронирующую ячейку (рис. 1), состоящую из электрода в виде 196 заостренных игл, равномерно расположенных на площади 49 см^2 в виде квадрата. Расстояние между материалом 2 и электродом 1 составляло 2 см, напряжение, подаваемое на коронирующий электрод, – 30 кВ, время обработки – 30 с.

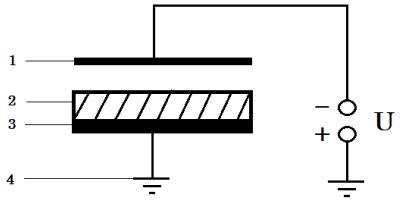


Рис. 1. Схема коронатора: 1 – коронирующий электрод; 2 – фильтроматериал; 3 – нижний электрод; 4 – заземление; U – источник высокого напряжения

Разделительную способность фильтроматериалов определяли согласно ГОСТ 7584-89 – устанавливали процент задержанных частиц или компонентов в общем потоке жидкости, проходящей через материал. Скорость фильтрации (фильтрующую способность) определяли согласно методике ГОСТ 7584-89 – определяли время прохождения жидкости определенного объема через испытуемый фильтроматериал.

Падение давления ΔP измеряли с использованием чистого фильтра при номинальной скорости воздушного потока. Проницаемость для аэрозоля хлорида натрия D_{NaCl} и масляного спрея D_{oil} определялась по следующему уравнению:

$$D = C_i / C_N \times 100\%,$$

Где C_i – содержание NaCl или масляного спрея в канале, расположенном после фильтра; C_N – содержание NaCl или масляного спрея в канале, расположенном перед фильтром.

Влияние фильтроматериалов на микроорганизмы проводили по клиническим рекомендациям «Определение чувствительности микроорганизмов к антимикробным препаратам» диско-диффузионным методом. Для этого в боксе, в стерильных условиях на питательную среду – агар Мюллера-Хинтон, находящуюся в чашке Петри наносили суспензию микроорганизмов *Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermidis, Haemophilus influenza, Haemophilus parainfluenzae, Streptococcus pyogenes, Streptococcus viridians, Enterococcus faecalis* или *Enterococcus faecium*, соответствующую плотности 0,5 по стандарту мутности МакФарланда. Далее на поверхность агара помещали электретированные и контрольные образцы нетканых полипропиленовых полотен и выдерживали 20 часов при 37 °С в обычной атмосфере. После этого определяли наличие зоны полного подавления роста микроорганизмов вокруг пленки, видимой невооруженным глазом, при расположении чашки на расстоянии

примерно 30 см от глаз. Четкие края зоны подавления роста микроорганизмов свидетельствовали о бактерицидном действии испытуемого материала на конкретную культуру.

Результаты и обсуждение

Предлагаемая фильтрующая система (многослойный материал) представляет собой сложную конструкцию, состоящую из нескольких слоев полипропиленовых нетканых полотен и бумажных фильтровальных материалов, обеспечивающих высокую механическую фильтрацию. Часть полимерных слоев находится в электретном состоянии, полученном посредством обработки постоянным коронным разрядом. Эта обработка увеличивает шероховатость поверхности волокон, расширяет площадь их поверхности и усиливает адсорбционный механизм фильтрации. Электретное состояние способствует задержке загрязняющих частиц, включая наночастицы, за счет электростатического притяжения. Дополнительно электретные слои обладают антибактериальными свойствами, что актуально для предотвращения микробного загрязнения фильтруемых жидкостей.

Особенности многослойных фильтрующих материалов для жидкостной фильтрации заключаются в следующем:

- наличие полимерных и бумажных компонентов;
- некоторые полимерные и бумажные слои являются электретными, полученными наложением постоянного коронного разряда;
- электростатическое удержание наночастиц в жидкой фазе;
- антибактериальные свойства фильтра;
- целевое применение в химической, пищевой и фармацевтической промышленности (в частности – для синтетических моющих средств и парфюмерных жидкостей).

Такой подход выходит за рамки известных решений и предлагает новый технический результат в повышении стабильности конечного продукта, защиту оборудования и обеспечение микробиологической чистоты за счет уникальной структуры и функциональности фильтрующего материала. Его отличительные признаки для оптимизации многослойных фильтрующих материалов в жидкостной фильтрации можно сформулировать таким образом:

1. Многослойная конструкция, объединяющая:
- полимерные материалы в виде нетканых полотен;
- бумажные материалы;
- электретные полимерные и бумажные слои, полученные наложением постоянного коронного разряда.

2. Комбинированный механизм фильтрации, включающий:
- механический механизм (размерное удержание);
- адсорбционный механизм (увеличение площади поверхности за счет увеличения шероховатости в процессе обработки постоянным коронным разрядом);
- электростатический механизм (удержание наночастиц и коллоидов за счет сил кулоновского притяжения).

3. Антибактериальные свойства электретных слоев фильтра (важны для пищевой и фармацевтической промышленности).

4. Целевое применение в жидких средах, включая:
- синтетические моющие средства;
- парфюмерно-косметические жидкости;
- фармацевтические растворы.

В таблице 1 представлена информация по сравнению предлагаемого фильтроматериала с уровнем существующих решений.

Табл. 1.Сравнение предлагаемого фильтроматериала с существующими аналогами

Признак	Известность	Комментарий
Многослойность (полимерные и бумажные слои)	Частично	Используется в воздушных фильтрах, но не адаптировано для жидкостной фильтрации с агрессивными/вязкими средами
Электризация коронным разрядом	Да	Применяется, но в основном для сухих сред (воздух) и полимерных фильтров; не описано применение для бумажных слоёв, работающих в жидких средах
Антибактериальный эффект электретов	Нет	Не подтверждён; не используется как функциональное преимущество в фильтрах для жидкостей
Удержание наночастиц в жидкостях за счет электростатики	Нет	Наноразмерные загрязнения в жидких средах не удаляются с применением электретных фильтров
Применение в СМС/парфюмерии для предотвращения расслоения и засорения дозаторов	Нет	Такая прикладная задача не решается существующими решениями

В качестве примера можно описать следующее расположение слоев в фильтроматериале. Первым слоем является полипропиленовое нетканое полотно, полученное методом «Мелтблаун», толщиной 0,3 мм, которое служит предварительным фильтром и предназначено для улавливания крупных частиц, волокон и осадка, чтобы предотвратить преждевременное засорение последующих слоев. Далее идут основные фильтрующие слои, изготовленные из полипропилена методом «Мелтблаун», которые обладают толщиной 0,4 мм и размером пор 0,5 микрон, которые задерживают микронные частицы, включая бактерии и микроорганизмы. Далее идут электретированные обеззоленный фильтр «Красная лента» и полипропиленовое полотно «Спанбонд». Эта последовательность слоев обеспечивает многоступенчатую фильтрацию и продолжительный срок службы фильтра.

Конструкция фильтра с описанным материалом может выглядеть в виде, представленном на рисунке 2.



Рис. 2. Схематичное изображение фильтра: 1 – внешний сетчатый корпус; 2 – предварительный фильтр; 3, 4 – основные фильтрующие слои; 5 – электретированный обеззоленный бумажный фильтр; 6 – электретированный поддерживающий слой из полипропиленового нетканого полотна; 7 – центральная перфорированная трубка

Фильтрующие характеристики предлагаемого фильтра представлены в таблице 2. Видно, что функциональные характеристики фильтра довольно высоки. Представляется, что электретные слои фильтра играют ключевую роль в высокоэффективной очистке благодаря возможности удерживать частицы малого размера (меньше геометрических размеров ячеек фильтроматериала) за счет электростатического взаимодействия. Современные исследования показывают, что электретный эффект может существенно повышать эффективность при низком перепаде давления, однако его устойчивость зависит от технологии заряжения, влажности, состава материала и режима эксплуатации [4-8].

Табл. 2. Фильтрующие характеристики фильтра с многослойным материалом

Показатель	Фильтрующий многослойный материал
Разделительная способность парфюмерной жидкости, %	4
Скорость фильтрации, с	1740
Коэффициент проникания D_{NaCl}, %	11,07
Коэффициент проникания D_{oil}, %	1,50
Бактериостатический эффект по отношению к микроорганизмам *Staphylococcus aureus, Staphylococcus epidermidis, Haemophilus influenza, Haemophilus parainfluenzae, Streptococcus pyogenes, Streptococcus viridians, Enterococcus faecalis, Enterococcus faecium*	Есть

Предлагаемая киберфизическая фильтрующая система может представлять собой совокупность физического фильтрующего элемента, сенсорного слоя, аппаратуры сбора данных, вычислительного модуля и блока принятия эксплуатационного решения. В отличие от пассивного фильтра, такая система обеспечивает не только очистку жидкой среды, но и получение информации о текущем состоянии фильтрующего элемента, степени его загрязнения, сохранности электретного заряда и прогнозируемом остаточном ресурсе.

Физическим объектом системы является многослойный фильтр (рис. 2), расположение слоев в котором обеспечивает последовательное удаление загрязнений различного размера. Предварительный слой задерживает крупные частицы и волокна, основные фильтрующие слои обеспечивают механическое удержание микронных частиц, а электретные слои повышают вероятность удержания дисперсных и коллоидных частиц за счет электростатического взаимодействия.

В таком случае можно предложить структурную схему киберфизической системы, представленную на рисунке 3.

Для мониторинга состояния фильтра предлагается использовать следующие параметры: перепад давления ΔP, расход фильтруемой среды Q, температура T, время фильтрации заданного объема τ и параметры электретного состояния: потенциал поверхности V_s, эффективная поверхностная плотность заряда σ_{ef} и/или напряженность электрического поля E.



Рис. 3. Структурная схема киберфизической фильтрующей системы

Спад фильтрационных свойств проявляется через несколько взаимосвязанных процессов. При накоплении твердых частиц и биозагрязнений уменьшается эффективная площадь проходного сечения пор, возрастает гидравлическое сопротивление и увеличивается перепад давления. При постоянном расходе этот параметр является наиболее непосредственным индикатором загрязнения. При постоянном перепаде давления загрязнение фильтра приводит к уменьшению расхода фильтруемой среды. Поэтому снижение расхода может использоваться как альтернативный диагностический признак, особенно в системах с насосом, работающим при стабилизированном давлении. Для заданного объема жидкости рост времени фильтрации указывает на снижение пропускной способности фильтрующего элемента. Этот параметр удобен для лабораторных испытаний и может использоваться для калибровки онлайн-датчиков. Наконец, снижение уровня электретных свойств (релаксации электретного состояния фильтрующих материалов) может быть связано с воздействием влаги, температуры, состава фильтруемой среды, механической нагрузкой и длительностью эксплуатации. Снижение электретного заряда должно рассматриваться как фактор уменьшения эффективности удержания мелких частиц, даже если перепад давления еще не достиг критического значения.

Для реализации киберфизического мониторинга измеряемые параметры должны регистрироваться синхронно с проведением фильтрационного эксперимента. Перепад давления необходимо определять двумя датчиками давления, установленными до и после фильтрующего элемента:

$$\Delta P = P_{in} - P_{out}.$$

Расход фильтруемой среды как правило измеряют расходомером, установленным на входе или выходе фильтра. Температуру определяют термодатчиком, размещенным в зоне фильтрующего элемента либо в потоке перед ним.

Электретное состояние фильтроматериалов можно оценивать бесконтактным измерителем параметров электростатического поля до начала фильтрации, после заданного числа циклов и после воздействия контролируемой среды.

Измерения планируется выполнять с установленным временным интервалом, что позволяет рассчитывать индекс состояния I_f и прогноз остаточного ресурса.

Работа алгоритма принятия решения может быть организована следующим образом:

1) система выполняет измерение ΔP, Q, T, τ, V_s (и/или σ_{ef} и E);

2) полученные сигналы проходят статистическую обработку от выбросов и температурно-вязкостную коррекцию;

3) значения нормируются относительно параметров чистого фильтра и допустимых пределов;

4) рассчитывается индекс состояния I_f;

5) определяется скорость изменения индекса dI_f/dt;

6) рассчитывается прогнозируемый остаточный ресурс;

7) формируется одно из решений:

- продолжить эксплуатацию,
- перейти в режим усиленного мониторинга,
- выполнить регенерацию,
- заменить фильтрующий элемент;

8) результаты измерений и принятое решение сохраняются в журнале эксплуатации.

Регенерация может рассматриваться только при условии, что загрязнение обратимо, целостность слоев не нарушена, а электретные свойства могут быть восстановлены. Если после регенерации значения ΔP, Q, T, τ, V_s (и/или σ_{ef} и E) не возвращаются к установленному диапазону, фильтр подлежит замене.

Заключение

Таким образом, в работе представлен многослойный фильтрующий материал и фильтр на их основе, который предлагается для очистки жидких сред. Наличие нескольких слоев полимерных и бумажных фильтровальных материалов, часть из которых находится в электретном состоянии, обеспечивает высокую механическую фильтрацию, антибактериальные свойства, высокую эффективность, долговечность. Фильтры могут применяться
в химической, пищевой и фармацевтической промышленности.

Перспективным направлением дальнейшей работы является поиск путей перехода от пассивного фильтра к интеллектуальной фильтрующей системе, функционирующей как киберфизический объект. Киберфизическая архитектура системы должна включать фильтрующий элемент, сенсорный слой, систему сбора и передачи данных, алгоритм обработки измерений и модуль принятия решения о регенерации или замене фильтра. В качестве основных диагностических параметров могут быть определены перепад давления, расход фильтруемой среды, время фильтрации заданного объема и параметры электретного состояния (потенциал поверхности, эффективная поверхностная плотность заряда и/или напряженность электрического поля электрета). Непосредственными индикаторами деградации фильтрационных свойств являются рост перепада давления, снижение расхода при постоянном перепаде давления, увеличение времени фильтрации и уменьшение электретного заряда, сопровождающееся снижением эффективности удержания мелкодисперсных частиц.

Такой подход особенно актуален для медицинских и промышленных сфер применения, где важны не только фильтрационные характеристики, но и безопасность, долговечность и адаптивность работы фильтров.

Список литературы

1. Kerner M. Electret Filters—From the Influence of Discharging Methods to Optimization Potential / M. Kerner, K. Schmidt, S. Schumacher et al. // Atmosphere. – 2021. – V. 12. – 65. DOI: https://doi.org/10.3390/atmos12010065

2. Chen M. A review on recent trends of the antibacterial nonwovens air filter materials: Classification, fabrication, and application / M. Chen, Q. Hu, X. Wang, W. Zhang // Separation and Purification Technology. – 2024. – V. 330, Part B. – 125404. DOI: https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125404

3. Shao Z. Multistage-Split Ultrafine Fluffy Nanofibrous Membrane for High-Efficiency Antibacterial Air Filtration / Z. Shao, Y. Chen, J. Jiang et al. // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2022. – DOI: https://doi.org/10.1021/acsami.2c04700

4. Shao Z. Semi-transparent and eco-friendly face masks for $PM_{0.3}$ filtration via biomimetic-fractal nanofibers / Shao Z., Liu Y., Huo Sh. et al. // Nature Communications. – 2026. – V. 17. – 4743. – DOI: https://doi.org/10.1038/s41467-026-71413-z

5. Cai R.-R. Progress and perspective of polymer electret-based $PM_{2.5}$ filtration: Efficiencies, regeneration, and energy implications / R.-R. Cai, L.-Z. Zhang // Energy. – 2023. – V. 283. – 128504. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128504

6. Guliakova A.A. Investigation of electret and filtering properties of polypropylene-based nonwoven fabrics and its composites with 2 vol.% of silicon dioxide inclusions / A.A. Guliakova, M.F. Galikhanov, L.R. Galeeva et al. // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020. – V. 27 (5). – 9215118. – P. 1656-1661. DOI: https://doi.org/10.1109/TDEI.2020.008454

7. Galikhanov M.F. Unipolar Corona Discharge Effect on Filtering Capacity of Polypropylene Non-Woven Fabrics / M.F. Galikhanov // Fibre Chemistry. – 2017. – V. 48. – № 6. – P. 473-477. DOI: https://doi.org/10.1007/s10692-017-9820-z

8. Zhou X., Lin Z., Zhang W., Zhang S. Investigation of the filtration performance of electret media for deliquescent and non-deliquescent aerosols under different relative humidity / Zhou X., Lin Z., Zhang W., Zhang S. // Indoor and Built Environment. – 2025. – V. 34(5). – 1021-1035. DOI: https://doi.org/10.1177/1420326X251318707

9. Sun Zh. Bead-on-String-Like Nanofibrous Membrane for High-Efficiency, Low-Pressure Drop Air Filters with Antimicrobial Properties / Zh. Sun, Ya. Ju, Yu. Xiong et al. // ACS Applied Polymer Materials. – 2024. – 6(11). DOI: https://doi.org/ 10.1021/acsapm.4c00988.

10. Liu Ch. Preparation, characterization and antibacterial properties of hydro-charged melt-blown nonwovens coated with an N –halamine / Ch. Liu, J. Shi, F. Luo et al. // JNew Journal of Chemistry. – 2024. – 48(45): 19355-19363. DOI: https://doi.org/10.1039/D4NJ01962H

11. Zhong Zh. Unusual Air Filters with Ultrahigh Efficiency and Antibacterial Functionality Enabled by ZnO Nanorods / Zh. Zhong, Zh. Xu, T. Sheng et al. // ACS Appl Mater Interfaces. – 2015. – Sep 30; 7(38): 21538-44. DOI: https://doi.org/10.1021/acsami.5b06810.

12. Kalani S., Islam M.Sh., Li J.Scalable antimicrobial air filters: polypropylene/rose bengal melt-blown nonwoven filters. – 2025. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2025.144514.

13. Патент RU 2790319 C2. Фильтрующая среда. Шмальц Э., Заявка: 2020124287, 19.02.2019, Опубликовано: 16.02.2023, Бюл. №5.

14. Eun J., Lee H., Jeon S. Regeneration of an electret filter by contact electrification / J.Eun, H. Lee, S. Jeon // RSC Advances. – 2021. – 11(8):4610-4615. DOI: https://doi.org/10.1039/D0RA09769A

MULTILAYER ELECTRET FILTERING MATERIAL AND A CYBER-PHYSICAL MONITORING SYSTEM FOR THE PURIFICATION OF LIQUID MEDIA FROM SOLID PARTICLES AND BIOCONTAMINANTS

L.R. Galeeva [1], M.F. Galikhanov [2,3]

[1]Kazan National Research Technological University,
68, K. Marx St., Kazan, 420015, Russian Federation

[2]Russian Academy of Engineering
9, Bldg. 4, Gazetny Lane, Moscow, 125009, Russian Federation

[3]Institute of Applied Research of the Tatarstan Academy of Sciences,
36a, Levo-Bulachnaya St., Kazan, 420111, Russian Federation

Absrtact. Multilayer filtering materials and filters based on them have been developed; they are proposed for the purification of liquid media. The filter is a complex structure consisting of several layers of polymer and paper filtering materials (meshes, non-woven fabrics, membranes, perforated sheets, etc.) that provide high mechanical filtration. Some of the polymer layers are in an electret state, which helps to retain contaminating particles, including nanoparticles, due to electrostatic attraction. Additionally, electret layers possess antibacterial properties, which is important for preventing microbial contamination of the liquids being filtered. The filtering material and the filter based on it are highly effective and durable, and can be used in the chemical, food, and pharmaceutical industries. The possibility of transitioning from a passive filter to an intelligent filtering system functioning as a cyber-physical object has been substantiated. The cyber-physical architecture of the system should include a filter element, a sensor layer, a data acquisition and transmission system, a measurement processing algorithm, and a module for making decisions about filter regeneration or replacement. The main diagnostic parameters can be the pressure drop, the flow rate of the filtered medium, the filtration time of a given volume, and the parameters of the electret state (surface potential, effective surface charge density, and/or the electric field strength of the electret). The direct indicators of degradation of filtration properties are an increase in pressure drop, a decrease in flow rate with a constant pressure drop, an increase in filtration time and a decrease in electret charge, accompanied by a decrease in the retention efficiency of fine particles.

Keywords: filter, additive technologies, polymer composites, polypropylene non-woven fabric, cellulose-paper material, electret, antibacterial effect, cyber-physical system.

Материалы представлены на Научно-практическом семинаре с международным участием «Актуальные научные и прикладные задачи в области фильтроматериалов» (г. Казань, 17-18 августа 2026 года).

Статья представлена в редакцию 21 августа 2026 г.