

НАНОТЕХНОЛОГИИ И НАНОМАТЕРИАЛЫ/NANOTECHNOLOGIES AND NANOMATERIALS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.14>

НАНОПОРИСТЫЕ МЕМБРАНЫ ИЗ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ (100 НМ) ДЛЯ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

Обзор

Похотько А.Г.¹, Бабичев С.А.², Захарченко И.С.^{3,*}, Ильина А.В.⁴, Маршалко Ю.В.⁵, Тарасов И.А.⁶⁴ORCID : 0000-0003-4884-5734;^{1, 2, 3, 4, 5} Кубанский государственный медицинский университет Минздрава России, Краснодар, Российская Федерация⁶ООО «АРТ ТЕХ КЕРАМИК», Славянск-на-Кубани, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ingaz[at]rambler.ru)

Аннотация

Проблема загрязнения воздуха представляет собой одну из наиболее острых глобальных угроз для здоровья населения и состояния окружающей среды, что делает разработку и внедрение технологий фильтрации, способных эффективно удалять широкий спектр загрязнителей особенно актуальной. Нанопористые мембраны из оксида алюминия с размером пор около 100 нм обладают рядом уникальных характеристик, таких как высокоупорядоченная структура пор, высокая термическая и химическая стабильность, а также возможность функционализации поверхности. Целью данного обзора является оценка применимости этих мембран в области очистки воздуха, проведение их всестороннего сравнения с технологией HEPA и определение их наиболее перспективной ниши. Основные выводы указывают на то, что прямая замена HEPA-фильтров мембранами Al₂O₃ (100 нм) в стандартных условиях очистки воздуха общего назначения нецелесообразна. Данные мембраны имеют значительные преимущества при эксплуатации в условиях высоких температур и агрессивных химических сред. Они являются превосходными носителями для катализаторов, обеспечивая возможность одновременного удаления твердых частиц и каталитического разложения газообразных токсикантов.

Ключевые слова: оксид алюминия, нанопористые мембраны, фильтрация воздуха, ультрамелкие частицы, HEPA, промышленные выбросы, городские загрязнители, каталитическая очистка, интегрированные системы очистки, термостойкость, химическая стойкость, давление на фильтре.

NANOPOROUS ALUMINIUM OXIDE MEMBRANES (100 NM) FOR AIR PURIFICATION

Review article

Pokhotko A.G.¹, Babichev S.A.², Zakharchenko I.S.^{3,*}, Ilina A.V.⁴, Marshalko Y.V.⁵, Tarasov I.A.⁶⁴ORCID : 0000-0003-4884-5734;^{1, 2, 3, 4, 5} Kuban State Medical University, Krasnodar, Russian Federation⁶Limited Liability Company "Art Tech Ceramic", Slavyansk-na-Kubani, Russian Federation

* Corresponding author (ingaz[at]rambler.ru)

Abstract

Air pollution is one of the most acute global threats to public health and the environment, making the development and implementation of filtration technologies capable of effectively removing a wide range of pollutants particularly relevant. Nanoporous aluminium oxide membranes with pore sizes of around 100 nm have a number of unique characteristics, such as a highly ordered pore structure, high thermal and chemical stability, and the possibility of surface functionalisation. The aim of this review is to assess the applicability of these membranes in the field of air purification, to conduct a comprehensive comparison with HEPA technology, and to identify their most promising niche. The main conclusions indicate that direct replacement of HEPA filters with Al₂O₃ (100 nm) membranes is not feasible under standard general-purpose air purification conditions. These membranes have significant advantages when used in high-temperature and aggressive chemical environments. They are excellent carriers for catalysts, providing the ability to simultaneously remove solid particles and catalytically decompose gaseous toxicants.

Keywords: aluminium oxide, nanoporous membranes, air filtration, ultrafine particles, HEPA, industrial emissions, urban pollutants, catalytic purification, integrated purification systems, heat resistance, chemical resistance, filter pressure.

Введение

Загрязнение воздуха признано одной из наиболее серьезных экологических проблем современности, оказывающей разрушительное воздействие на здоровье человека и экосистемы в глобальном масштабе [1]. Ежегодно миллионы людей преждевременно умирают из-за болезней, связанных с вдыханием загрязненного воздуха; по оценкам ВОЗ, эта цифра достигает 6,7–8,1 миллионов человек в год [1], [2]. К основным загрязнителям атмосферного воздуха относятся твердые частицы с аэродинамическим диаметром менее 10 мкм, ультрамелкие частицы (UFPs) с диаметром менее 100 нм (0,1 мкм), летучие органические соединения, оксиды азота (NO_x), оксиды серы (SO_x) и приземный озон (O₃) [1], [10]. Источниками этих загрязнителей являются промышленные предприятия, транспорт, энергетические установки, сжигание биомассы и сельскохозяйственная деятельность [10]. Длительное и кратковременное воздействие этих веществ вызывает широкий спектр заболеваний, включая сердечно-сосудистые и респираторные патологии, рак легких, а также негативное влияние на развитие плода и здоровье детей [1]. Особую озабоченность вызывают UFPs, которые благодаря своим малым размерам способны проникать глубоко в легочную ткань, преодолевать альвеоларно-капиллярный барьер и транслоцироваться в системный кровоток, достигая различных органов, вызывая системные

воспалительные реакции и токсические эффекты [9]. Эта особенность UFPs обуславливает необходимость разработки фильтрационных материалов и технологий, целенаправленно эффективных в нанометровом диапазоне размеров частиц.

Для борьбы с загрязнением воздуха применяется ряд технологий, включая волокнистые фильтры (например, НЕРА-фильтры), фильтры на основе активированного угля, электростатические осадители (ESP) и каталитические конвертеры [1]. Несмотря на их широкое использование, каждая из этих технологий имеет свои ограничения. НЕРА-фильтры, высокоэффективные в улавливании твердых частиц, включая многие UFPs, не способны удалять газообразные загрязнители [11]. Активированный уголь эффективен для адсорбции некоторых газов и паров, но его емкость ограничена, и он не улавливает твердые частицы. Существенным недостатком многих традиционных фильтров, является их низкая устойчивость к экстремальным условиям, таким как высокие температуры и агрессивные химические среды, что ограничивает их применение в ряде промышленных процессов [12]. Регенерация большинства стандартных фильтров затруднена или невозможна, что ведет к необходимости их частой замены, увеличению объемов отходов и эксплуатационных расходов. Некоторые технологии, такие как ионизаторы воздуха, могут генерировать побочные вредные продукты, например, озон. Компромисс между эффективностью фильтрации, перепадом давления и стоимостью для традиционных фильтров означает, что ни одна из существующих технологий не является универсальным решением, особенно для сложных промышленных газовых потоков, содержащих смеси твердых частиц и агрессивных газов при высоких температурах. Этот технологический пробел создает потребность в разработке новых, специализированных фильтрационных материалов.

В этом контексте наноструктурированные мембраны из оксида алюминия (Al_2O_3), в частности, анодный оксид алюминия (ААО) с размером пор около 100 нм, представляют значительный интерес в качестве перспективного материала для систем очистки воздуха [3]. Эти мембраны характеризуются рядом уникальных свойств:

1. *Регулируемая и упорядоченная пористость.* Метод анодирования позволяет получать мембраны с прямыми, цилиндрическими порами с узким распределением по размерам (типичный диапазон 10-200 нм, с возможностью прецизионного контроля в области 100 нм) и высокой плотностью пор [3].

2. *Высокая удельная поверхность.* Хотя данные по методу Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ) для ААО с порами 100 нм ограничены в предоставленных материалах [24], геометрическая площадь поверхности стенок нанопор значительна, что важно для каталитических применений.

3. *Термическая стабильность.* ААО мембраны способны функционировать при температурах до нескольких сотен градусов Цельсия (коммерческие образцы до 400°C [7]), а после отжига и перехода в $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ фазу — и при температурах до 1000°C и выше [8].

4. *Химическая стабильность.* Оксид алюминия, особенно в кристаллической α -фазе, обладает высокой устойчивостью к воздействию многих кислот, щелочей, растворителей и коррозионно-активных газов [4].

Несмотря на известные преимущества нанопористых Al_2O_3 мембран, точная ниша и условия их применения требуют четкого и всестороннего научного определения. Необходимо оценить их эффективность, эксплуатационные характеристики и экономическую целесообразность в различных условиях очистки воздуха.

Целью настоящего обзора является проведение всестороннего анализа и определение оптимальной ниши для применения воздушных фильтров из оксида алюминия с размером пор ~100 нм. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

- 1) провести сравнительный анализ фильтров из Al_2O_3 (100 нм) и НЕРА-фильтров по основным параметрам;
- 2) оценить преимущества Al_2O_3 фильтров для очистки воздуха от типичных городских и промышленных загрязнителей, уделяя особое внимание их работе в экстремальных условиях;
- 3) обосновать рациональность применения Al_2O_3 фильтров (100 нм) в составе комплексных (многоступенчатых) систем очистки воздуха;
- 4) определить наиболее перспективную и экономически оправданную нишу для данной технологии, учитывая ее уникальные свойства и существующие ограничения.

Основная часть. Характеристики фильтров из оксида алюминия (100 нм) и механизмы фильтрации

Основным и наиболее распространенным методом получения нанопористых мембран из оксида алюминия с высокоупорядоченной структурой пор является электрохимическое анодирование алюминия [3]. Этот процесс, часто проводимый в две стадии, позволяет формировать массив параллельных, цилиндрических наноканалов, перпендикулярных поверхности исходной алюминиевой подложки [15]. Ключевыми параметрами, определяющими геометрию пор (диаметр, межпоровое расстояние, толщину оксидного слоя), являются тип и концентрация электролита (например, серная, щавелевая, фосфорная кислоты), приложенное напряжение анодирования, температура электролита и продолжительность процесса [19]. Для получения пор с диаметром около 100 нм обычно используют щавелевую или фосфорную кислоту при определенных значениях напряжения и контролируемых температурах [19]. Первая стадия анодирования создает предварительную текстуру на поверхности алюминия, а после удаления этого первичного оксидного слоя вторая стадия анодирования приводит к формированию более упорядоченной пористой структуры [15]. Для точной настройки диаметра пор могут применяться дополнительные стадии химического травления [22]. Также возможно использование метода атомно-слоевого осаждения для нанесения тонких покрытий на стенки пор, что позволяет модифицировать их диаметр с высокой точностью и изменять химический состав поверхности [15]. Выбор параметров анодирования требует тщательной оптимизации, поскольку такие факторы, как эффект Джоулева нагрева при высоких напряжениях или температурах, могут негативно повлиять на однородность и регулярность пористой структуры, если их не контролировать должным образом [19].

Мембраны из ААО обладают следующими физико-химическими свойствами (табл. 1).

1. Структура пор:

– размер и распределение: для целевых мембран диаметр пор составляет ~100 нм. Коммерчески доступные и лабораторно синтезированные ААО мембраны могут иметь узкое распределение пор по размерам, часто с полной шириной на половине максимума менее 10% от среднего диаметра, что указывает на высокую степень монодисперсности [3];

– геометрия: поры обычно прямые, цилиндрические и ориентированы параллельно друг другу, образуя гексагональную или квазигексагональную решетку на поверхности мембраны (структура типа «пчелиных сот») [3];

– плотность пор: для пор диаметром 100 нм типичная плотность пор составляет около 2×10^9 пор/см² [7];

– межпоровое расстояние (период пор): для пор 100 нм это значение составляет примерно 250 нм [7].

2. *Пористость*: для ААО мембран толщиной 50 мкм с порами 100 нм пористость обычно составляет около 15%. Пористость может варьироваться в зависимости от условий анодирования и последующих обработок, таких как химическое травление для расширения пор [19].

3. *Удельная площадь поверхности (SSA)*: этот параметр критически важен для адсорбционных и каталитических приложений. Геометрическая площадь поверхности стенок нанопор значительна из-за их малого диаметра и большой длины. Однако, экспериментальные данные по БЭТ SSA для ААО мембран с порами 100 нм ограничены. В одном исследовании для ААО с порами в диапазоне 31–113 нм сообщалось значение SSA 2.59 м²/г [24], что является относительно низким по сравнению с некоторыми другими высокопористыми материалами, такими как активированный уголь или цеолиты. Для α -Al₂O₃ с высокой SSA, полученного золь-гель методом, сообщались значения 16–24 м²/г, но это, как правило, макропористые структуры [25]. Низкое значение БЭТ SSA для плотных стенок ААО может быть связано с тем, что основной вклад вносят именно стенки пор, а не внутренняя пористость самого материала стенок. Для каталитических применений часто более релевантной является доступная поверхность внутри пор.

4. *Термическая стабильность*:

– свежесинтезированные ААО мембраны, состоящие из аморфного или нанокристаллического γ -Al₂O₃ (или других переходных форм), стабильны при температурах до нескольких сотен градусов Цельсия. Коммерческие ААО мембраны обычно рассчитаны на максимальную рабочую температуру около 400°C [7];

– при отжиге при более высоких температурах (обычно в диапазоне 750–1200°C) происходят фазовые превращения: аморфная фаза $\rightarrow \gamma/\delta/\theta$ -Al₂O₃ $\rightarrow \alpha$ -Al₂O₃ (корунд) [8]. Фаза α -Al₂O₃ является наиболее термодинамически стабильной и может выдерживать температуры свыше 1000°C. Переход в α -Al₂O₃ обычно наблюдается при 1100–1250°C [8];

– пористая структура в значительной степени сохраняется при температурах до 950–1050°C [8]. Трансформация в α -Al₂O₃ при высокотемпературном отжиге важна для применений в экстремальных условиях, так как она улучшает термическую и химическую стабильность, но может вызвать усадку или изменение морфологии пор. Оптимизация процесса отжига для достижения желаемой стабильности без ущерба для целостности пористой структуры является ключевым моментом для высокотемпературных применений.

5. *Химическая стойкость*:

– ААО мембраны обладают хорошей устойчивостью к большинству органических растворителей [7];

– диапазон pH для стабильной работы свежесинтезированных ААО составляет 5–8 [7];

– фаза α -Al₂O₃ демонстрирует превосходную химическую стабильность, особенно по отношению к сильным кислотам и щелочам [16]. Коррозия в кислых и щелочных растворах обычно начинается на границах зерен [17];

– устойчивость к промышленным газам, таким как NO_x, SO_x, O₃, при высоких температурах является одним из ключевых потенциальных преимуществ, особенно для мембран на основе α -Al₂O₃ [26].

6. *Механические свойства*:

– как и все керамические материалы, ААО мембраны являются хрупкими по сравнению с полимерными фильтрами;

– прочность на изгиб и модуль упругости при изгибе зависят от пористости, толщины мембраны и наличия/ориентации барьерного слоя. Барьерный слой значительно увеличивает прочность, если он подвергается растягивающим напряжениям [22];

– разрушение может сопровождаться локализованной пластической деформацией, что нетипично для объемной керамики и связано с наноструктурой материала [22].

Таблица 1 - Физико-химические и механические свойства мембран из Al₂O₃ с порами ~100 нм

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.14.1>

Свойство	Типичное значение/Диапазон	Источники
Диаметр пор	~100 нм	[7]
Распределение пор по размерам	<10%	[3]
Плотность пор	$\sim 2 \times 10^9$ см ⁻²	[7]
Межпоровое расстояние	~250 нм	[7]
Пористость	~15% (для толщины 50 мкм)	[7]
Типичная толщина	50 мкм (коммерческие образцы)	[7]
Макс. рабочая температура (свежесинтез.)	~400°C	[7]

Свойство	Типичное значение/Диапазон	Источники
Макс. рабочая температура (отожженная α - Al_2O_3)	$>1000^\circ\text{C}$	[8]
Диапазон pH стабильности (свежесинтез.)	5–8	[7]
Стойкость к растворителям	Отличная (к большинству органических растворителей)	[7]
Химическая стойкость (к газам NO_x, SO_x)	Хорошая, особенно для α - Al_2O_3 при высоких температурах	[26]
Прочность на изгиб (пористая сторона)	48–182 МПа (для пористости 23–52%, толщина 57 мкм)	[22]
Модуль упругости при изгибе	18–83 ГПа (для пористости 23–52%, толщина 57 мкм)	[22]
Удельная площадь поверхности (БЭТ)	Ограниченные данные; 2.59 м ² /г (для пор 31–113 нм)	[24]

Улавливание аэрозольных частиц на нанопористых мембранах, таких как ААО, происходит за счет комбинации нескольких фундаментальных механизмов фильтрации [30]:

1. **Прямое задержание.** Частицы, размер которых превышает или очень близок к размеру пор мембраны, физически блокируются на ее поверхности. Для ААО мембран с порами ~100 нм этот механизм является доминирующим для частиц с диаметром около 100 нм и более. Благодаря прямым цилиндрическим порам, эффект просеивания в ААО мембранах более предсказуем по сравнению с извилистыми путями в волокнистых фильтрах [31].

2. **Инерционное осаждение.** Более крупные и плотные частицы, обладающие достаточной инерцией, не могут следовать за искривленными линиями тока воздуха при обтекании препятствий (например, при входе в пору) и по инерции сталкиваются со стенками пор или поверхностью мембраны. Этот механизм более значим для частиц размером $>0,5$ –1 мкм и при высоких скоростях потока [32]. Его вклад в улавливание UFPs в порах 100 нм при типичных скоростях фильтрации воздуха, вероятно, будет менее значительным по сравнению с прямым задержанием или диффузией.

3. **Диффузионное осаждение.** Мелкие частицы, особенно <100 –200 нм, подвержены интенсивному броуновскому движению из-за столкновений с молекулами газа. Это случайное движение значительно увеличивает вероятность их контакта со стенками пор и последующего осаждения, даже если их размер значительно меньше диаметра пор [32]. Диффузия является ключевым механизмом улавливания UFPs в каналах ААО мембран.

Следовательно, для частиц с размерами, близкими к 100 нм доминирующим механизмом фильтрации будет прямое задержание. Для UFPs, значительно меньших 100 нм основной вклад будет вносить диффузионное осаждение. Для частиц в промежуточном диапазоне будет наблюдаться комбинация эффектов перехвата и диффузии.

Эффективность фильтрации как функция размера частиц часто описывается V-образной кривой, где существует так называемый наиболее проникающий размер частиц (Most Penetrating Particle Size, MPPS), для которого эффективность фильтрации минимальна [34]. Для мембранных фильтров с определенным размером пор, MPPS может быть близок к размеру пор для механизма просеивания или находиться в области, где ни диффузия, ни инерционное осаждение не являются достаточно эффективными. В отличие от НЕРА-фильтров, где диффузия доминирует в улавливании UFPs в широком диапазоне размеров благодаря специфической укладке волокон, ААО мембраны с порами 100 нм будут демонстрировать более резкий переход: сильное просеивание/перехват для частиц ~100 нм и диффузионный захват для значительно меньших UFPs. Это может предоставлять возможности для селективной фильтрации, если различные фракции UFPs требуют различного подхода к улавливанию или анализу [32].

2.1. Сравнительный анализ Al_2O_3 фильтров (100 нм) и НЕРА-фильтров

НЕРА-фильтры (табл. 2) являются общепризнанным стандартом в области высокоэффективной очистки воздуха от твердых частиц и широко используются в различных сферах, от бытовых воздухоочистителей до медицинских учреждений и чистых производственных помещений.

1. Технология НЕРА:

– материалы: НЕРА-фильтры обычно изготавливаются из мата случайно расположенных волокон боросиликатного стекла или полимерных волокон диаметром от 0,5 до 2,0 мкм [14];

– структура: представляют собой глубинный фильтр, где волокна создают извилистый лабиринт для прохождения воздуха, обеспечивая большую площадь для контакта с частицами;

– принцип действия: улавливание частиц происходит за счет комбинации инерционного осаждения (для крупных частиц), прямого перехвата (для частиц среднего размера) и диффузионного осаждения (для очень мелких частиц). Эффективность диффузионного механизма возрастает с уменьшением размера частиц, что делает НЕРА-фильтры эффективными для улавливания наноразмерных частиц, несмотря на то, что их номинальная эффективность определяется для частиц большего размера;

– стандарты эффективности: согласно стандартам, таким как EN 1822 (Европа) или ISO 29463 (международный) НЕРА-фильтр должен удалять не менее 99,97% или 99,95% частиц с размером, соответствующим наиболее проникающему размеру частиц (MPPS), который обычно составляет около 0,3 мкм [6].

2. Сильные стороны НЕРА:

– высокая эффективность для широкого спектра частиц. НЕРА-фильтры эффективно улавливают пыль, пылцу, споры плесени, перхоть животных, бактерии и многие вирусы, а также значительную долю UFPs;

– относительно низкий перепад давления. По сравнению с мембранными фильтрами, обеспечивающими сопоставимую эффективность для очень мелких частиц, НЕРА-фильтры обычно имеют более низкое начальное сопротивление потоку воздуха [6]. Типичный перепад давления для чистого НЕРА-фильтра составляет около 245 Па, а для более новых моделей — приблизительно 59–127 Па при номинальной скорости потока [6];

– экономическая доступность и широкое применение. Благодаря налаженному массовому производству и использованию относительно недорогих материалов, НЕРА-фильтры являются экономически доступным решением для множества применений [38].

Эффективность НЕРА-фильтров в отношении UFPs, несмотря на то, что их МППС составляет ~0,3 мкм, обусловлена тем, что механизм диффузии становится все более действенным для частиц, размер которых меньше МППС. Это является важным аспектом при сравнении с ААО мембранами, где для частиц, близких к размеру пор, доминирует механизм просеивания.

Несмотря на уникальные свойства нанопористых Al_2O_3 мембран, их использование в качестве прямой и универсальной замены НЕРА-фильтров в стандартных условиях очистки воздуха (например, в бытовых или офисных системах вентиляции и кондиционирования) представляется нецелесообразным по ряду ключевых причин.

1. *Перепад давления.* Мембранные фильтры, такие как ААО, как правило, создают более высокий перепад давления по сравнению с волокнистыми глубинными фильтрами типа НЕРА при сопоставимых скоростях потока и эффективности улавливания UFPs [7], [34]. Хотя прямые поры ААО могут показаться преимуществом, их малый диаметр и низкая пористость приводят к более высокому сопротивлению потоку для заданной площади фильтра и скорости воздуха.

2. *Стоимость производства и эксплуатации.* Производство ААО мембран представляет собой сложный, многостадийный и прецизионно контролируемый электрохимический процесс, часто требующий использования высокочистого алюминия для получения оптимальной структуры пор, специализированного оборудования и, возможно, дополнительных этапов для модификации пор. Это делает их производство изначально более дорогим по сравнению с массовым производством НЕРА-фильтрующих материалов [5]. Эксплуатационные расходы для систем с ААО фильтрами также могут быть выше из-за повышенного энергопотребления, связанного с большим перепадом давления.

3. *Энергоэффективность системы.* Энергоэффективность системы очистки воздуха напрямую связана с перепадом давления на фильтре. Более высокий перепад давления требует большей мощности вентилятора для прокачки необходимого объема воздуха, что ведет к снижению общей энергоэффективности системы.

Таким образом для общих задач очистки воздуха в неагрессивных средах (жилые помещения, офисы), где основными загрязнителями являются твердые частицы, аллергены и некоторая доля UFPs, НЕРА-фильтры предлагают более оптимальный баланс высокой эффективности фильтрации, низкого перепада давления (и, следовательно, более низкого энергопотребления), а также более низкой начальной стоимости и стоимости замены.

Таблица 2 - Сравнительный анализ фильтров из Al_2O_3 (100 нм, ААО) и НЕРА-фильтров

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.160.14.2>

Параметр	Al_2O_3 (100 нм, ААО)	НЕРА-фильтр
Механизм улавливания UFPs	Просеивание/перехват (для ~100нм), Диффузия (для <100нм)	Преимущественно Диффузия
МППС (Наиболее проникающий размер частиц)	Зависит от размера пор и скорости потока; вероятно, близок к размеру пор для просеивания	~0,3 мкм [6]
Типичная эффективность по МППС	Потенциально очень высокая для просеивания при размере пор	99,95% – 99,97% [6]
Перепад давления (чистый фильтр)	Выше (например, 39-58 Па при 1 см/с для мембранных фильтров [34])	Ниже (например, 60-250 Па [6])
Материал	Керамика (Al_2O_3)	Стекловолокно, полимерные волокна [14]
Макс. рабочая температура	Высокая (400°C+ для ААО, >1000°C для $\alpha-Al_2O_3$) [7]	Низкая-Умеренная (~120°C для некоторых стекловолокон, ниже для полимеров) [14]
Химическая стойкость	Высокая (особенно $\alpha-Al_2O_3$) [4]	Ограниченная (полимеры чувствительны к растворителям, некоторым газам) [14]
Удаление летучих	Низкое (если не	Низкое (требуется слой

Параметр	Al ₂ O ₃ (100 нм, ААО)	НЕРА-фильтр
соединений/газов	функционализирован)	активированного угля) [11]
Возможность регенерации	Высокая (термическая, химическая)	Обычно отсутствует (одноразовые)
Стоимость производства	Высокая [5]	Низкая-Умеренная [38]

Несмотря на нецелесообразность прямой замены НЕРА-фильтров в стандартных условиях, нанопористые мембраны из Al₂O₃ с порами ~100 нм обладают рядом уникальных преимуществ, которые делают их незаменимыми в сложных промышленных и городских условиях, при высоких температурах и в атмосфере агрессивных химических веществ.

Одним из наиболее значимых преимуществ керамических Al₂O₃ мембран является их способность сохранять структурную целостность и фильтрационную эффективность при высоких температурах (400-1250°C) [8]. Это свойство кардинально отличает их от НЕРА-фильтров, которые обычно ограничены температурами ниже 120-150°C для стекловолоконных вариантов и еще более низкими для полимерных [14]. Следовательно, мембраны из Al₂O₃ могут применяться для очистки горячих промышленных выбросов в металлургии, стекольной промышленности, на мусоросжигательных заводах [43], а также для фильтрация выхлопных газов двигателей внутреннего сгорания или газовых турбин.

Мембраны из Al₂O₃, особенно в форме α-Al₂O₃, обладают высокой устойчивостью к широкому спектру коррозионно-активных газов, кислот, щелочей и органических растворителей, которые могут быстро разрушать материалы традиционных НЕРА-фильтров, особенно их полимерные компоненты и связующие вещества [4]. Оксид алюминия используется в качестве носителя катализаторов в агрессивных средах, что подтверждает его инертность [26]. Высокая химическая устойчивость позволяет использовать мембраны из Al₂O₃ для фильтрации технологических газов в химической промышленности, очистки воздуха на гальванических производствах, удаления агрессивных компонентов из дымовых газов.

Жесткая керамическая структура ААО мембран обеспечивает хорошую механическую прочность и устойчивость к перепадам давления, хотя их хрупкость требует аккуратного обращения и монтажа [22].

Важнейшим преимуществом является возможность многократной регенерации с использованием агрессивных методов, недоступных для НЕРА-фильтров:

1. *Термическая регенерация.* Выжигание уловленных органических частиц и сажи при высоких температурах.
2. *Химическая очистка.* Использование сильных кислот, щелочей или окислителей для растворения или удаления неорганических и стойких органических загрязнителей.
3. *Обратная продувка.* Удаление слоя уловленных частиц с поверхности фильтра путем подачи потока чистого газа в обратном направлении [42].

Способность к регенерации значительно продлевает срок службы Al₂O₃ фильтров, снижает эксплуатационные расходы и сокращает объемы образующихся отходов, что имеет важные экономические и экологические преимущества, особенно в промышленных применениях с высокими концентрациями загрязнителей или при использовании дорогостоящих каталитических покрытий. Эта возможность смещает экономическую оценку с первоначальной стоимости фильтра на общую стоимость владения.

Мембраны из Al₂O₃ и НЕРА-фильтры в стандартных условиях проявляют различную эффективность в отношении специфических загрязнителей.

1. *Улавливание ультрамелких частиц.* Благодаря прецизионно сформированным порам размером ~100 нм, ААО мембраны демонстрируют высокую эффективность улавливания UFPs с размерами, близкими к диаметру пор, за счет механизма прямого задержания [15]. Частицы, значительно меньшие 100 нм, эффективно улавливаются за счет диффузионного осаждения на стенках длинных наноканалов [9]. В то время как НЕРА-фильтры также эффективны для многих UFPs благодаря диффузии, четко определенная структура пор ААО предлагает иной, потенциально более целенаправленный механизм захвата для частиц в районе 100 нм.

2. *Функция каталитического носителя.* Высокая удельная поверхность стенок пор, отличная термическая стабильность и химическая инертность делают Al₂O₃ превосходным материалом-носителем для иммобилизации различных катализаторов [19]. На поверхность или внутрь нанопор могут быть нанесены наночастицы благородных металлов (Pt, Pd, Au), оксидов переходных металлов (TiO₂, MnO_x, CeO₂) или другие каталитически активные вещества. Это позволяет создавать реакционно-фильтрующие мембраны, способные одновременно удалять твердые частицы из потока газа и каталитически разлагать или преобразовывать газообразные токсиканты в менее вредные соединения.

2.2. Примеры из исследований

1. Использование фильтра на основе Pt/ZnO/SiC (где SiC выступает в роли носителя, но концепция применима и к Al₂O₃) для окисления толуола [48].

2. Разработка иерархической структуры для каталитического сжигания толуола и метана. Такая система показала высокую эффективность (>99% конверсии толуола при 250°C) и стабильность, что объясняется монолитоподобной структурой массива нанотрубок ААО, способствующей равномерному распределению катализатора и диффузии реагентов [48].

3. Применение MnO_x/Al₂O₃ для конверсии NO [27].

4. Использование γ-Al₂O₃ в сочетании с низкотемпературной плазмой для одновременного удаления SO₂ и NO_x [28].

Способность сочетать фильтрацию UFPs и каталитическую очистку газов в одном прочном, термо- и химически стойком устройстве, работающем при повышенных температурах, является уникальным и мощным преимуществом

мембран из Al_2O_3 . Это открывает перспективы для интенсификации процессов и потенциального сокращения размеров и сложности систем контроля загрязнения воздуха, поскольку отпадает необходимость в отдельных стадиях для улавливания частиц и каталитической обработки газов, особенно если эти процессы требуют различных температурных режимов или материалов.

Сложный состав загрязнителей воздуха, включающий твердые частицы различных размеров и разнообразные газообразные компоненты, часто требует комплексного подхода к очистке, поскольку одноступенчатые системы редко могут обеспечить требуемую эффективность и экономичность для всех типов загрязнителей одновременно.

Каждый тип загрязнителя может требовать специфического механизма удаления. Например, крупные частицы эффективно удаляются циклонами или тканевыми фильтрами грубой очистки, основная масса твердых частиц диаметром до 2,5 мкм — HEPA фильтрами или электростатическими осадителями, а газообразные компоненты — адсорбентами или каталитическими системами. Попытка удалить все загрязнители одной универсальной ступенью часто приводит либо к неполной очистке, либо к чрезмерно высоким затратам и энергопотреблению.

Многоступенчатая система очистки предполагает последовательное прохождение загрязненного воздуха через несколько специализированных стадий, каждая из которых оптимизирована для удаления определенных фракций или типов загрязнителей. Компоненты системы работают синергически, повышая общую эффективность и надежность.

В рамках такой концепции нанопористые Al_2O_3 фильтры (100 нм) рассматриваются как высокотехнологичный специализированный компонент, предназначенный для выполнения конкретных задач, с которыми не справляются другие технологии. Их сильные стороны — термостойкость, химическая инертность, способность улавливать UFPs в жестких условиях и служить каталитическим носителем — определяют их место в интегрированной системе. Истинная ценность Al_2O_3 (100 нм) фильтров раскрывается при их размещении в интегрированной системе, которая использует их сильные стороны и одновременно компенсирует их недостатки (стоимость, перепад давления) за счет других, более дешевых стадий предварительной очистки. Они выступают в роли «специалистов», а не «универсалов» в мире фильтрации.

Возможными примерами использования Al_2O_3 (100 нм) фильтров в комплексной очистке могут быть:

1. *Промышленная газоочистка (например, отходящие газы мусоросжигательных заводов, металлургических предприятий):*

01-я ступень: грубая очистка для удаления крупных частиц и частичного охлаждения/нейтрализации (например, циклон, скруббер Вентури, рукавный фильтр из термостойкого материала) [12].

02-я ступень: керамический Al_2O_3 фильтр (100 нм) для тонкой очистки от UFPs и мелкодисперсных частиц из горячего и/или химически агрессивного потока. Эта ступень может быть функционализирована катализатором для одновременного разложения, например, NO_x или ЛОС [43].

03-я ступень: дополнительный каталитический реактор или адсорбер для удаления остаточных газовых загрязнителей. В исследовании [43] описана система очистки выбросов стекольного завода, где керамические каталитические фильтры используются для удаления PM , SO_x и NO_x в сочетании с инъекцией сухого сорбента (гашеной извести) для DeSO_x и водного раствора аммиака для DeNO_x перед фильтрацией.

2. *Специализированные чистые помещения с жесткими протоколами стерилизации:* в условиях, где требуется частая высокотемпературная стерилизация фильтров (например, автоклавируемые), Al_2O_3 мембраны могут быть предпочтительнее HEPA-фильтров, которые не выдерживают таких условий [7].

Преимуществами интегрированного подхода к фильтрации являются:

- повышение общей эффективности и надежности системы;
- продление срока службы дорогостоящих компонентов. Префильтры защищают последующие ступени, включая дорогостоящие Al_2O_3 фильтры, от быстрого засорения крупными и абразивными частицами, тем самым увеличивая их ресурс и снижая частоту регенерации или замены;
- оптимизация капитальных и эксплуатационных затрат: использование более дешевых технологий для удаления основной массы загрязнителей позволяет резервировать применение дорогих Al_2O_3 фильтров для наиболее сложных задач, что может быть экономически более оправданным в долгосрочной перспективе;
- возможность адаптации системы к специфическому составу загрязнителей. Модульная конструкция многоступенчатых систем позволяет гибко подбирать и комбинировать различные технологии очистки в зависимости от конкретного состава и концентрации загрязнителей в очищаемом воздухе.

Обсуждение конструктивных аспектов и критериев выбора компонентов для интегрированных систем должно учитывать совместимость материалов, температурные режимы, скорости потоков и требования к общей производительности.

Несмотря на значительный потенциал нанопористых Al_2O_3 мембран для очистки воздуха, существует ряд технологических и научных проблем, решение которых необходимо для их широкого практического применения.

Технологическими вызовами, требующими решения, являются:

1. *Масштабирование производства и снижение стоимости.* Одной из главных проблем является разработка методов крупномасштабного и экономически эффективного производства высококачественных Al_2O_3 (AAO) мембран с однородной структурой пор ~100 нм и воспроизводимыми характеристиками [5]. Необходимо снизить зависимость от дорогостоящего высокочистого алюминия путем дальнейшего развития процессов, таких как гибридная импульсная анодизация (НРА) или однократное потенциостатическое отделение (ОТР), для работы с алюминием более низкой чистоты [19]. Также важно минимизировать отходы материалов и использование агрессивных химикатов на некоторых этапах производства [40]. Преодоление разрыва между лабораторным изготовлением ААО с точным контролем пор и промышленным производством прочных, экономичных фильтрующих модулей является ключевой задачей, требующей совместных усилий в области материаловедения, химической инженерии и разработки производственных процессов.

2. *Снижение перепада давления.* Высокий перепад давления на ААО мембранах является существенным недостатком, приводящим к увеличению энергопотребления. Необходимы исследования по созданию ультратонких ААО мембран, нанесенных на прочные, крупнопористые подложки, которые бы обеспечивали механическую поддержку при минимальном дополнительном сопротивлении потоку. Разработка иерархических пористых структур, где более крупные поры подложки плавно переходят в нанопоры активного слоя, также может способствовать снижению общего перепада давления.

3. *Повышение механической прочности и долговечности:* керамические мембраны по своей природе хрупки. Требуется улучшение их механической прочности, гибкости и устойчивости к разрушению, термическим ударам и вибрациям, особенно в жестких промышленных условиях эксплуатации [22]. Исследование композитных ААО структур или защитных покрытий может привести к созданию более прочных и долговечных фильтров.

4. *Разработка эффективных и экономичных методов регенерации:* хотя возможность регенерации является преимуществом, необходимо разработать более эффективные, менее разрушительные для структуры мембраны и экономически выгодные методы регенерации для различных типов загрязнителей. Важно минимизировать деградацию фильтра в течение многочисленных циклов «загрязнение-регенерация» в реальных условиях.

Для преодоления технологических сложностей необходимо решение следующих научных задач:

1) дальнейшее исследование механизмов фильтрации и засорения пор для более глубокого понимания механизмов улавливания различных типов частиц и аэрозолей в специфической геометрии 100 нм пор ААО [32];

2) разработка новых методов функционализации поверхности. Создание новых, стабильных и высокоактивных каталитических покрытий или методов химической модификации поверхности Al_2O_3 для повышения адсорбционной емкости или каталитической активности в отношении целевых газообразных загрязнителей (например, стойких ЛОС, специфических соединений NO_x или SO_x) [15];

3) создание композитных и гибридных мембран для достижения синергетических свойств, таких как улучшенная селективность, электропроводность для электростатических эффектов или повышенные механические характеристики;

4) проведение комплексных исследований долговечности и жизненного цикла Al_2O_3 фильтров в реальных условиях эксплуатации, подверженных длительным воздействиям (термоциклирование, химическая агрессия, загрузка частицами). Важна оценка экологического воздействия производства, использования и утилизации/переработки ААО фильтров. Будущие исследования должны все больше фокусироваться на взаимодействии материала ААО с реальной средой применения — как сложные газовые потоки (многокомпонентные загрязнители, переменная влажность, колебания температуры) влияют на долговременную производительность, засорение и каталитическую активность, выходя за рамки идеализированных лабораторных испытаний;

5) моделирование и оптимизация конструкций. Развитие передовых методов вычислительного моделирования (CFD, молекулярная динамика) для симуляции процессов фильтрации, каталитических реакций и явлений переноса в структурах ААО. Это поможет в проектировании и оптимизации фильтрующих элементов и модулей для конкретных приложений [32].

Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что нанопористые мембраны из оксида алюминия с размером пор около 100 нм, в частности анодный оксид алюминия, представляют собой перспективный, но узкоспециализированный класс фильтрационных материалов для очистки воздуха. Сравнительный анализ с НЕРА-фильтрами показывает, что Al_2O_3 мембраны не являются прямой заменой НЕРА-фильтров для очистки воздуха общего назначения. Более высокий перепад давления и значительно более высокая стоимость производства делают их менее конкурентоспособными в стандартных условиях, где НЕРА-фильтры обеспечивают оптимальный баланс эффективности, энергопотребления и цены. Однако, Al_2O_3 фильтры (100 нм) обладают рядом уникальных преимуществ, которые определяют их специфическую и важную нишу:

1. *Исключительная термостойкость:* способность работать при температурах, значительно превышающих пределы для НЕРА-фильтров.

2. *Высокая химическая инертность:* устойчивость к агрессивным химическим средам, которые разрушают традиционные фильтрующие материалы.

3. *Возможность каталитической функционализации:* структура и свойства Al_2O_3 делают его превосходным носителем для катализаторов, позволяя совмещать фильтрацию твердых частиц с каталитическим разложением газообразных загрязнителей в одном устройстве.

4. *Эффективность улавливания UFPs в жестких условиях:* способность эффективно удалять ультрамелкие частицы благодаря четко определенному размеру пор.

5. *Регенерируемость:* возможность многократной регенерации агрессивными методами продлевает срок службы и снижает эксплуатационные расходы в промышленных условиях.

Исходя из этого, эффективная ниша для воздушных фильтров из оксида алюминия с размером пор ~100 нм формулируется следующим образом: фильтры из оксида алюминия с размером пор ~100 нм оптимально подходят для применения в системах очистки воздуха, функционирующих в условиях высоких температур (>200-1000°C) и/или агрессивных химических сред (например, кислотные газы, растворители), характерных для промышленных выбросов. Их ценность также высока, когда требуется сочетание высокоэффективной фильтрации ультрамелких частиц с возможностью каталитического разложения газообразных загрязнителей при повышенных температурах. Наиболее рациональное и экономически перспективное использование данных фильтров лежит в области создания высокопроизводительных компонентов многоступенчатых интегрированных систем очистки, а не в качестве прямой замены стандартных фильтров типа НЕРА в бытовых вентиляционных системах.

Финансирование

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030» при поддержке администрации Краснодарского края.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The work was carried out as part of the “Priority-2030” strategic academic leadership programme with the support of Krasnodar Krai administration.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Ambient (outdoor) air pollution // World Health Organization (WHO). — URL: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health) (accessed: 01.06.2025).
2. Health Impacts of Air Pollution // State of Global Air. — URL: <https://www.stateofglobalair.org/hap> (accessed: 01.06.2025).
3. Isotropic AAO Membranes // InRedox. — URL: <https://www.inredox.com/product/aa0-membranes-iso/> (accessed: 01.06.2025).
4. Nanoporous membranes for medical and biological applications // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3684197/> (accessed: 01.06.2025).
5. Fabrication of Low Cost Anodic Aluminum Oxide (AAO) Tubular Membrane and their Application for Hemodialysis // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/236014926_Fabrication_of_Low_Cost_Anodic_Aluminum_Oxide_AAO_Tubular_Membrane_and_their_Application_for_Hemodialysis (accessed: 01.06.2025).
6. HEPA Filters // U.S. Environmental Protection Agency. — URL: <https://www3.epa.gov/ttnecat1/cica/files/ff-hepa.pdf> (accessed: 01.06.2025).
7. Anodic Aluminum Oxide Isotropic membrane filters, 100nm pore, 13mm dia, pk20 // SPI Supplies. — URL: <https://www.2spi.com/item/aa0i10013-ca/> (accessed: 01.06.2025).
8. Assessment of the thermal stability of anodic alumina membranes at high temperatures // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/257079282_Assessment_of_the_thermal_stability_of_anodic_alumina_membranes_at_high_temperatures (accessed: 01.06.2025).
9. Acute health effects of ambient air pollution including ultrafine particles in a semi-experimental setting in young, healthy individuals // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC12102956/> (accessed: 01.06.2025).
10. Air pollution is responsible for 6.7 million premature deaths every year // World Health Organization (WHO). — URL: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants> (accessed: 01.06.2025).
11. Air Purifiers Fact Sheet // UMass Amherst. — URL: <https://ehs.umass.edu/air-purifiers-fact-sheet> (accessed: 01.06.2025).
12. Air and Gas Filtration // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7161406/> (accessed: 01.06.2025).
13. A review of air filtration technologies for sustainable and healthy building ventilation // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/316472615_A_review_of_air_filtration_technologies_for_sustainable_and_healthy_building_ventilation (accessed: 01.06.2025).
14. Alternative High-Performance Fibers for Nonwoven HEPA Filter // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9579614/> (accessed: 01.06.2025).
15. Nanoporous Membranes for the Filtration of Proteins from Biological Fluids // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9571538/> (accessed: 01.06.2025).
16. Recent Advances in Nanoporous Anodic Alumina: Principles, Engineering, and Applications // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7914664/> (accessed: 01.06.2025).
17. Corrosion Behavior of Al₂O₃ Ceramics in the Acid and Alkaline Solutions // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/269380229_Corrosion_Behavior_of_Al2O3_Ceramics_in_the_Acid_and_Alkaline_Solutions (accessed: 01.06.2025).
18. Fabrication of γ -Al₂O₃ Nanoarrays on Aluminum Foam Assisted by Hydroxide for Monolith Catalysts // ACS Omega. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.2c07237> (accessed: 01.06.2025).
19. Advances in the Fabrication of Nanoporous Anodic Aluminum Oxide and Its Applications to Sensors // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10650129/> (accessed: 01.06.2025).
20. The effect of anodizing temperature to the thickness of AAO film // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/figure/The-effect-of-anodizing-temperature-to-the-thickness-of-AAO-film_fig3_236784446 (accessed: 01.06.2025).
21. Characterization of Porous Anodic Aluminium Oxide Film on Aluminium Templates Formed in Anodizing Process // ResearchGate. — URL:

https://www.researchgate.net/publication/236784446_Characterization_of_Porous_Anodic_Aluminium_Oxide_Film_on_Aluminium_Templates_Formed_in_Anodizing_Process (accessed: 01.06.2025).

22. Flexural Properties and Fracture Behavior of Nanoporous Alumina // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6190219/> (accessed: 01.06.2025).

23. Structural and chemical modification of porous alumina membranes // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/223777392_Structural_and_chemical_modification_of_porous_alumina_membranes (accessed: 01.06.2025).

24. The nanoporous anodic alumina oxide formed by two-step anodization // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/322362483_The_nanoporous_anodic_alumina_oxide_formed_by_two-step_anodization (accessed: 01.06.2025).

25. Towards Macroporous α -Al₂O₃—Routes, Possibilities and Limitations // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7179033/> (accessed: 01.06.2025).

26. The influence of Pt oxide formation and Pt dispersion on the reactions NO₂ ↔ NO + 1/2 O₂ over Pt/Al₂O₃ and Pt/BaO/Al₂O₃ // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/223568220_The_influence_of_Pt_oxide_formation_and_Pt_dispersion_on_the_reactions_NO2_NO12_O2_over_PtAl2O3_and_PtBaOAl2O3 (accessed: 01.06.2025).

27. Packed bed reactors // Science.gov. — URL: <https://www.science.gov/topicpages/p/packed+bed+reactors> (accessed: 01.06.2025).

28. Simultaneous removal of SO₂ and NO_x by catalytic adsorption using γ -Al₂O₃ under the irradiation of non-thermal plasma // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/337717516_Simultaneous_removal_of_SO2_and_NOx_by_catalytic_adsorption_using_g-Al2O3_under_the_irradiation_of_non-thermal_plasma_Competitiveness_kinetic_and_equilibrium (accessed: 01.06.2025).

29. Synergistic effect between NO₂ and SO₂ in their adsorption and reaction on gamma-alumina // PubMed. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18578482/> (accessed: 01.06.2025).

30. Aerosol particle collection mechanisms // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/figure/Aerosol-particle-collection-mechanisms-Different-types-of-filters-have-different_fig4_302513560 (accessed: 01.06.2025).

31. Membrane filter procedure // Science.gov. — URL: <https://www.science.gov/topicpages/m/membrane+filter+procedure> (accessed: 01.06.2025).

32. Mechanisms of Pharmaceutical Aerosol Deposition in the Respiratory Tract // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4037474/> (accessed: 01.06.2025).

33. Illustration of particle capture due to Brownian diffusion // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/figure/Illustration-of-particle-capture-due-to-Brownian-diffusion_fig8_282469050 (accessed: 01.06.2025).

34. Removal of Airborne Nanoparticles by Membrane Coated Filters // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3185152/> (accessed: 01.06.2025).

35. Modeling transport and filtration of nanoparticle suspensions in porous media // Physical Review E. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.107.034121> (accessed: 01.06.2025).

36. Development of Filter Media by Electrospinning for Air Filtration of Nanoparticles from PET Bottles // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8073527/> (accessed: 01.06.2025).

37. Sand filtration process // Science.gov. — URL: <https://www.science.gov/topicpages/s/sand+filtration+process> (accessed: 01.06.2025).

38. Which one to choose? A cost-effectiveness analysis between different technologies of air purifiers // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9594161/> (accessed: 01.06.2025).

39. Evaluating the Potential of Superhydrophobic Nanoporous Alumina Membranes for Direct Contact Membrane Distillation // KAUST Repository. — URL: <https://repository.kaust.edu.sa/bitstream/10754/628491/1/1-s2.0-S0021979718309706-main.pdf> (accessed: 01.06.2025).

40. A Rapid, Efficient Method for Anodic Aluminum Oxide Membrane // MDPI. — URL: <https://www.mdpi.com/2079-4991/14/14/1216> (accessed: 01.06.2025).

41. Advancing Nanopore Technology: Anodic Aluminum Oxide Membranes with Anisotropic Pores through Controlled Stretching for Applications in Nanopatterning // ACS Publications. — URL: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsanm.4c02257> (accessed: 01.06.2025).

42. Methods for regeneration and storage of ceramic membranes // CBI Pro-Akademia. — URL: https://www.proakademia.eu/gfx/baza_wiedzy/480/nr_28_72-81_2.pdf (accessed: 01.06.2025).

43. Using a Ceramic Catalytic Filter System to Control Industrial Discharge of Particulate Matter, SO_x and NO_x // Oregon State University. — URL: https://gradschool.oregonstate.edu/sites/gradschool.oregonstate.edu/files/lin_psm_executive_summary.pdf (accessed: 01.06.2025).

44. High Recovery of Ceramic Membrane Cleaning Remediation by Ozone Nanobubble Technology // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC10938438/> (accessed: 01.06.2025).

45. Electrospun membranes filtering 100 nm particles from air flow by means of the van der Waals and Coulomb forces // PubMed Central. — URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9759630/> (accessed: 01.06.2025).

46. Biodegradable filtration systems: Cellulose materials for sustainable particulate matter control // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/391762888_Biodegradable_filtration_systems_Cellulose_materials_for_sustainable_particulate_matter_control_-_A_critical_review (accessed: 01.06.2025).

47. Three-way catalytic converter // Science.gov. — URL: <https://www.science.gov/topicpages/t/three-way+catalytic+converter> (accessed: 01.06.2025).
48. Novel Synthesis of a High-Performance Pt/ZnO/SiC Filter for the Oxidation of Toluene // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/320642791_Novel_Synthesis_of_a_High-Performance_PtZnOSiC_Filter_for_the_Oxidation_of_Toluene (accessed: 01.06.2025).
49. Recent Progress of Fabrication, Characterization, and Applications of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Membrane // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/362250391_Recent_Progress_of_Fabrication_Characterization_and_Applications_of_Anodic_Aluminum_Oxide_AAO_Membrane_A_Review (accessed: 01.06.2025).
50. Evaluation of the performance characteristics of aerostatic bearing with porous alumina (Al₂O₃) membrane // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/publication/379814139_Evaluation_of_the_performance_characteristics_of_aerostatic_bearing_with_porous_alumina_Al_2_O_3_membrane_using_theoretical_and_experimental_methods (accessed: 01.06.2025).
51. Gas flow rate versus pressure change across three different membranes // ResearchGate. — URL: https://www.researchgate.net/figure/Gas-flow-rate-versus-pressure-change-across-three-different-membranes_fig7_226584605 (accessed: 01.06.2025).
52. EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollutant Control Symposium: the Mega Symposium // EPA NEPIS. — URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=9100LOW5.TXT> (accessed: 01.06.2025).