

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2025, Том 8, № 2 / 2025, Vol. 8, Iss. 2 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 54-31

DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-2-3

Оксид алюминия для жидкостных фильтров

¹ Похотько А.Г.,

¹ Бабичев С.А.,

¹ Мелконян К.И.,

¹ Захарченко И.С.*,

² Тарасов И.А.,

¹ Кубанский государственный медицинский университет Минздрава России,

² ООО «АРТ ТЕХ КЕРАМИК», г. Славянск-на-Кубани,

* Ответственный автор E-mail: ingaz@rambler.ru

Аннотация: жидкостная фильтрация является важным процессом во многих высокотехнологичных и критически важных производственных секторах. Традиционные фильтрующие материалы обладают рядом ограничений. Анодный оксид алюминия выделяется благодаря своей уникальной высокоупорядоченной нанопористой структуре, высокой термической и химической стойкости, а также возможность функционализации поверхности. Основными областями успешного использования нанопористых фильтров из оксида алюминия являются фармацевтика и биотехнологии, микроэлектроника, пищевая промышленность, а также другие специализированные экологические и промышленные задачи. Всесторонняя оценка жидкостных фильтров из оксида алюминия с размером пор 100 нм, сравнение с альтернативными технологиями фильтрации показала их неоспоримые преимущества в условиях высоких температур и агрессивной химической среды. Однако сохраняются и существенные проблемы, в первую очередь связанные со стоимостью, загрязнением, потенциальной хрупкостью, а также необходимостью дальнейшего улучшения долговременной стабильности некоторых фаз оксида алюминия или в экстремально жестких условиях эксплуатации.

Ключевые слова: оксид алюминия, нанопористые мембраны, жидкостная фильтрация

Для цитирования: Похотько А.Г., Бабичев С.А., Мелконян К.И., Захарченко И.С., Тарасов И.А. Оксид алюминия для жидкостных фильтров // Chemical Bulletin. 2025. Том 8. № 2. 3. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-2-3

Поступила в редакцию: 15 января 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 20 марта 2025 г.; Принята к публикации: 22 мая 2025 г.

Aluminum oxide for liquid filters

¹ Pokhotko A.G.,
¹ Babichev S.A.,
¹ Melkonyan K.I.,
¹ Zakharchenko I.S.*,
² Tarasov I.A.,

¹ *Kuban State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation,*

² *LLC "ART TECH CERAMICS", Slavyansk-on-Kuban,*

* Corresponding author E-mail: ingaz@rambler.ru

Abstract: liquid filtration is an important process in many high-tech and critical manufacturing sectors. Traditional filter materials have a number of limitations. Anodic aluminum oxide stands out due to its unique highly ordered nanoporous structure, high thermal and chemical resistance, and the possibility of surface functionalization. The main areas of successful use of nanoporous aluminum oxide filters are pharmaceuticals and biotechnology, microelectronics, food industry, as well as other specialized environmental and industrial tasks. A comprehensive evaluation of 100 nm alumina liquid filters and comparison with alternative filtration technologies has shown their undeniable advantages in high temperature and aggressive chemical environments. However, significant challenges remain, primarily related to cost, contamination, potential fragility, and the need to further improve the long-term stability of some alumina phases or under extremely harsh operating conditions.

Keywords: aluminum oxide, nanoporous membranes, liquid filtration

For citation: Pokhotko A.G., Babichev S.A., Melkonyan K.I., Zakharchenko I.S., Gumenyuk I.S., Tarasov I.A. Aluminum oxide for liquid filters. Chemical Bulletin. 2025. 8 (2). 3. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-2-3

The article was submitted: January 15, 2025; Approved after reviewing: March 20, 2025; Accepted for publication: May 22, 2025.

Введение

Жидкостная фильтрация является важным процессом во многих высокотехнологичных и критически важных производственных секторах. Ее основная функция заключается в удалении твердых частиц и микробных загрязнителей для обеспечения чистоты, безопасности и эффективности продукции. В фармацевтической и биотехнологической промышленности фильтрация жизненно важна для стерилизации лекарственных растворов, очистки биофармацевтических продуктов (белков, вакцин), удаления бактерий, эндотоксинов, вирусов и других микроорганизмов, а также для обеспечения безопасности и качества инъекционных и других лекарственных препаратов [2]. Выбор фильтра имеет решающее значение, поскольку неправильный выбор может привести к загрязнению продукта, потере выхода и снижению эффективности [3].

Микроэлектронная промышленность требует сверхчистой воды и химикатов, поскольку даже субмикронные частицы могут вызывать дефекты при производстве полупроводников, влияя на выход продукции и производительность устройств [27]. Усовершенствованная фильтрация имеет решающее значение для суспензий химико-механической планаризации, фоторезистов и раз-

личных этапов очистки/промывки [27]. Тенденция к созданию все более мелких и сложных чипов налагает все более строгие требования к чистоте и контролю за загрязнением частицами [27, 68].

В производстве специальных и тонких химических веществ фильтрация необходима для регенерации катализаторов, очистки продуктов, удаления нежелательных побочных продуктов и обеспечения стабильного качества продукции [64]. Часто первостепенное значение имеет потребность в фильтрах, устойчивых к растворителям и высоким температурам.

Эти примеры подчеркивают потребность в высокоэффективной фильтрации в различных, экономически значимых отраслях, устанавливаются строгие стандарты чистоты продукции и уровней загрязняющих веществ, что способствует внедрению передовых материалов [2].

Традиционные фильтрующие материалы, особенно полимерные мембраны (из ацетата целлюлозы, нейлона, полиэфирсульфона (ПЭС), политетрафторэтилена (ПТФЭ)), несмотря на их широкое применение, обладают ограничениями при использовании в требовательных промышленных условиях.

Многие полимеры подвержены деградации, набуханию или выщелачиванию при воздействии

агрессивных растворителей, сильных окислителей или определенных технологических химикатов, что нарушает целостность мембраны и потенциально загрязняет фильтрат [72]. Такие природные полимеры, как карбоксиметилцеллюлоза, деградируют при высоких температурах [69]. Проблемой также является пластификация и деградация полимеров из-за химических стрессоров и циклов очистки [60]. Полимерные мембраны обычно обладают ограниченной термостойкостью, что делает их непригодными для высокотемпературной фильтрации или агрессивных методов стерилизации, таких как стерилизация паром при высоких температурах [59, 72, 76]. Некоторые полимерные мембраны могут обладать недостаточной механической прочностью, что приводит к их уплотнению под давлением, сокращению срока службы или подверженности повреждениям [72].

Загрязнение фильтров является серьезной проблемой, и химические и термические ограничения полимеров сужают выбор протоколов очистки, что часто приводит к неполной регенерации и сокращению срока службы [31].

Эти ограничения подчеркивают острую необходимость в альтернативных фильтрующих материалах. Компромисс для полимерных мембран часто заключается в выборе между начальной стоимостью и долгосрочной производительностью в суровых условиях [31, 41], что открывает нишу для таких материалов, как наноструктурированные керамические мембраны, особенно изготовленные из оксидов металлов, таких как оксид алюминия (Al_2O_3), диоксид циркония (ZrO_2) и диоксид титана (TiO_2).

Керамические мембраны обладают высокой химической инертностью, термической стабильностью (выдерживают температуры до 500 °C и выше [1, 6, 59]) и механической прочностью [1]. Эти свойства делают их пригодными для агрессивных сред и жестких режимов очистки [1]. Достижения в области изготовления позволяют точно контролировать размер пор (вплоть до нанометрового масштаба), распределение пор и общую архитектуру мембраны, обеспечивая высокоточ-

ное разделение [47]. Рынок керамических мембран растет [41], и они все шире применяются там, где полимерные мембраны достигают предела своих возможностей [1, 73].

Среди керамических материалов анодный оксид алюминия (АОА) выделяется благодаря своей уникальной самоорганизующейся нанопористой структуре, которая может быть изготовлена с высокооднородными и параллельными цилиндрическими порами [36, 47]. Это делает его идеальным кандидатом для прецизионной нанофильтрации. Мембраны АОА с номинальным размером пор 100 нм представляют особый интерес для решения сложных задач разделения в критически важных отраслях.

Целью настоящего обзора является всесторонняя оценка жидкостных фильтров из оксида алюминия с размером пор 100 нм, сравнение их с альтернативными технологиями фильтрации.

Материалы и методы исследований

В данном обзоре использовались открытые электронные ресурсы на английском и русском языках включая статьи в научных журналах, диссертационные исследования, данные производителей керамических материалов, отраслевые исследования за период с 2000 по 2025 годы.

Результаты анализа были систематизированы и представлены в виде описательного текста и таблиц.

Данный обзор отражает текущее состояние исследований по возможностям применения жидкостных фильтров из оксида алюминия с размером пор 100 нм, с учетом их свойств, преимуществ и недостатков, освещает технологические и научные проблемы, решение которых необходимо для повышения их эффективности и расширения сфер применения.

Результаты и обсуждения

Мембраны из АОА обычно получают путем электрохимического анодирования высокочистого алюминия в кислотном электролите (например, серной, щавелевой, фосфорной кислоте) [5, 47, 49].

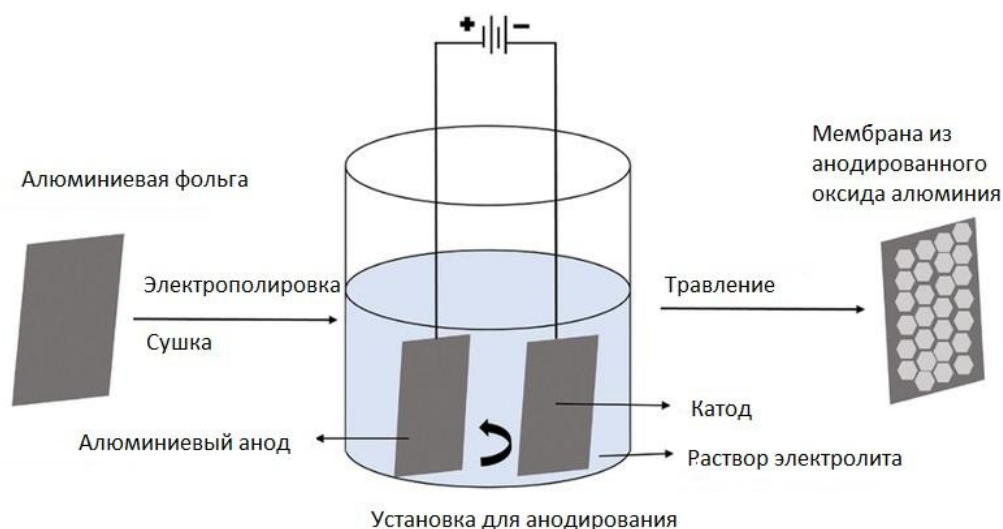


Рис. 1. Схема процесса анодирования [49].

Fig. 1. Schematic diagram of the anodizing process [49].

Во время анодирования образуется пористый слой оксида алюминия, состоящий из самоорганизованного гексагонального массива столбчатых ячеек, каждая из которых содержит центральную цилиндрическую пору, ориентированную перпендикулярно алюминиевой подложке (рис. 2) [36,

49]. Процесс включает окисление алюминия на аноде и растворение образовавшегося оксида электролитом [45]. Самоорганизующийся характер процесса анодирования является фундаментальной причиной высокой однородности и контролируемости поровых структур [36, 45].

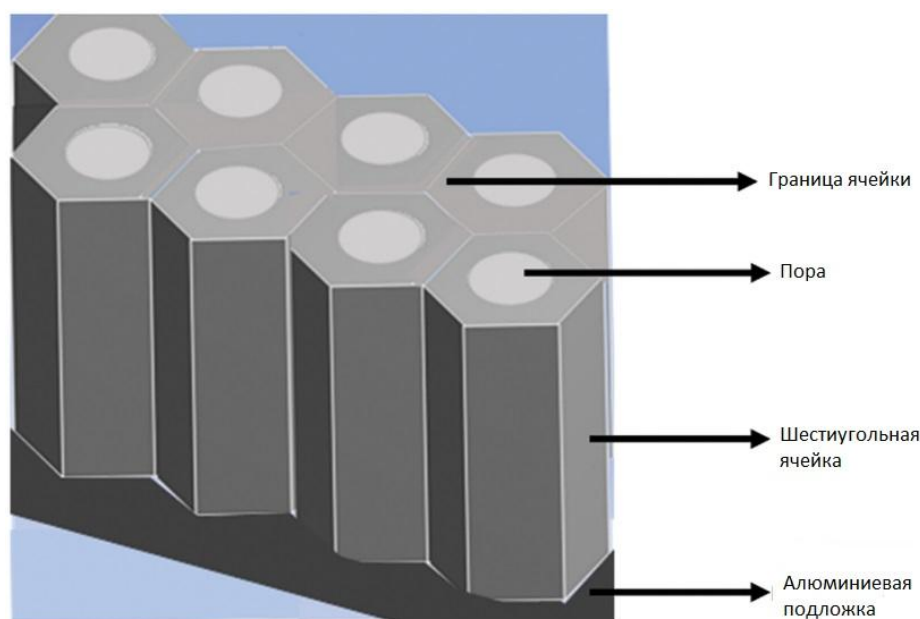


Рис. 2. Трехмерный вид идеальной мембраны ААО [49].

Fig. 2. Three-dimensional view of an ideal AAO membrane [49].

Для получения высокоупорядоченных поровых структур часто применяется двухстадийный процесс анодирования [47]. Тонкий, непористый барьерный слой оксида алюминия существует у основания пор и обычно удаляется химическим травлением для создания сквозных мембран [47].

Сложные взаимодействия во время формирования АОО требуют тщательного контроля параметров анодирования (напряжение, тип/концентрация электролита, температура, время) для достижения воспроизводимых геометрий пор [45].

Диаметр пор в основном определяется напряжением анодирования и типом электролита [47]. Расширение пор (химическое травление после анодирования, например, в фосфорной кислоте)

является обычным этапом для увеличения пор до желаемого размера [47, 61]. Размеры пор зависят от продолжительности процесса, как показано на рис. 3.

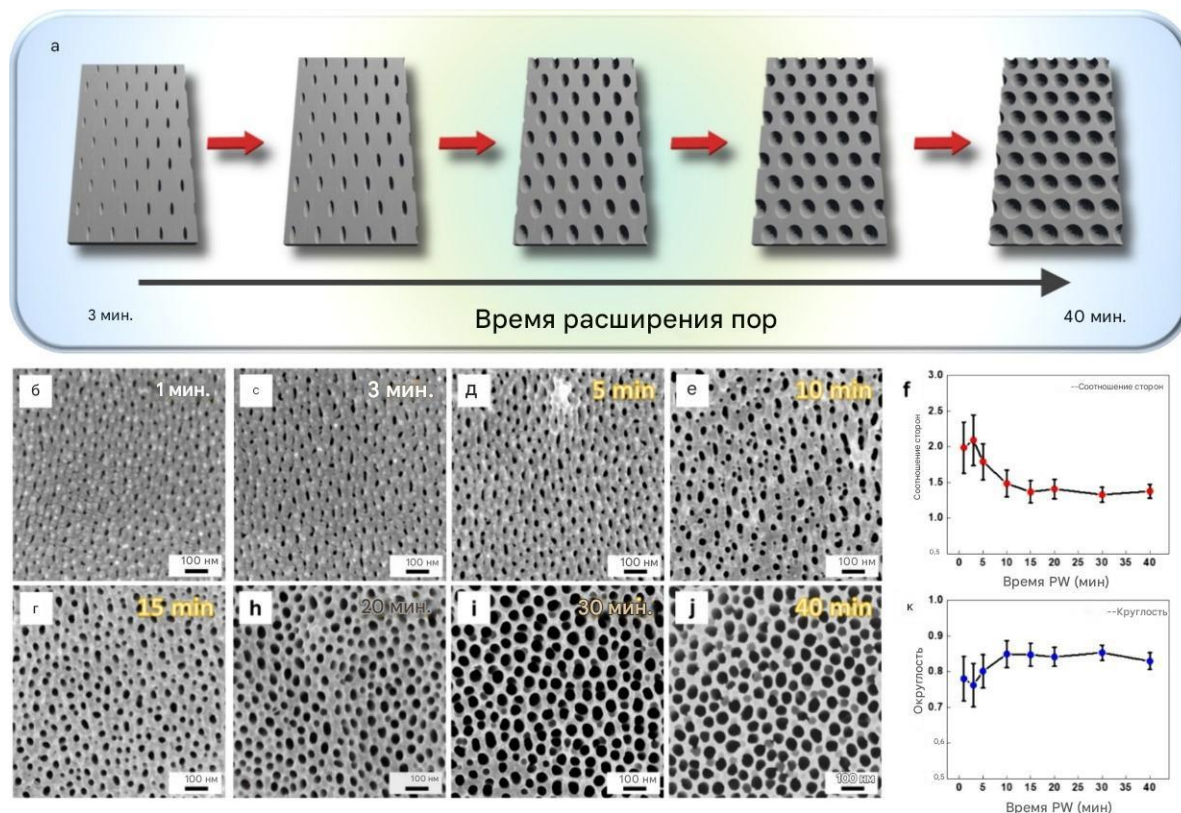


Рис. 3. (а) Схематическое изображение изменения формы пор в зависимости от времени расширения пор. (b–e, g–j) Изображения эллиптических мембран ААО для различного времени расширения пор полученные путем сканирующей электронной микроскопии: (b) 1, (c) 3, (d) 5, (e) 10, (g) 15, (h) 20, (i) 30 и (j) 40 мин. Графики соотношения сторон (f) и округлости (k) нанопор при различном времени расширения пор [47].
Fig. 3. (a) Schematic representation of the pore shape change with pore expansion time. (b–e, g–j) Scanning electron microscopy images of elliptical AAO membranes for different pore expansion times: (b) 1, (c) 3, (d) 5, (e) 10, (g) 15, (h) 20, (i) 30, and (j) 40 min. Plots of aspect ratio (f) and circularity (k) of nanopores for different pore expansion times [47].

В настоящее время доступны коммерческие мембраны из Al_2O_3 с порами в диапазоне 20–200 нм, что включает 100 нм [12, 59, 65]. Межпоровое расстояние в основном зависит от напряжения анодирования [47]. Длина пор (толщина) контролируется продолжительностью процесса анодирования [36, 49]. Плотность пор обратно пропорциональна квадрату межпорового расстояния [47].

Достижение номинального диаметра пор 100 нм обычно включает выбор подходящего электролита и тщательный контроль напряжения и времени расширения пор. В табл. 1 представлены типичные параметры для изготовления АОА мембран с порами около 100 нм.

Таблица 1
Параметры изготовления и результирующие структурные характеристики мембран АОА с порами ~100 нм.

Table 1

Manufacturing parameters and resulting structural characteristics of AOA membranes with pores of ~100 nm.

Параметр изготовления/характеристика	Типичные значения/Условия для ~100 нм пор	Источники
Тип электролита	Щавелевая кислота, Серная кислота, Фосфорная кислота	[47]
Напряжение анодирования (В)	Зависит от электролита (например, 40-60 В для щавелевой кислоты, может требовать корректировки для 100 нм)	[47]
Время анодирования (мин/ч)	Определяет толщину; от минут до часов	[49]
Реагент и время расширения пор	Фосфорная кислота (например, 5 мас.%, 25-35 °С, время варьируется)	[47]
Результирующий диаметр пор (нм)	~100	[12, 36, 59]
Межпоровое расстояние (нм)	~100-250 (для щавелевой кислоты, зависит от напряжения)	[47]
Плотность пор (пор/мкм ²)	10 ⁹ –10 ¹⁰	
Пористость (%)	10-50	
Толщина мембраны (мкм)	10-100	[36, 49]

Однородные, прямые цилиндрические поры АОА обеспечивают более высокую селективность по сравнению с извилистыми полимерными мембранами [47]. Размер пор 100 нм (0.1 мкм) относит эти фильтры к диапазону микрофильтрации [1, 3].

Размеры пор 100 нм позволяют эффективно удалять многие вирусы [2], разделять крупные белки, их агрегаты или инженерные наночастицы [15, 58], удалять мелкие твердые частицы в биопереработке, синтезе специальных химикатов или в микроэлектронике [2]. В некоторых случаях применение фильтров с порами 100 нм могут способствовать достижению стерильности [1, 3].

Мембраны АОА 100 нм демонстрируют узкое распределение пор по размерам, высокую однородность пор и их расположения, что обеспечивает предсказуемую производительность [12, 47]. Плотность пор высока - 10⁹–10¹¹ пор/см² [22].

Пористость АОА регулируется (например, 10-60%) и влияет на проницаемость. Уникальной особенностью микроструктуры АОА является высокий процент содержания сквозных пор с очень малой извилистостью, что является важным преимуществом перед другими мембранными материалами [4] и способствует высоким скоростям потока.

Оксид алюминия является твердым и жестким материалом. Мембраны АОА обладают хорошей механической стабильностью, выдерживают значительные трансмембранные давления без уплотнения [47]. Высокая твердость придает стойкость к истиранию [1]. Однако их хрупкость по сравнению с полимерами требует осторожного обращения при проектировании модулей [35]. Высокая

механическая прочность АОА [47] позволяет работать при более высоких давлениях и скоростях потока [1].

Мембраны АОА обладают высокой термической стабильностью. Они могут работать при температурах до 350-400°C и выше [1, 12, 35, 59], что обеспечивает возможность их применения в экстремальных температурных условиях.

Оксид алюминия химически стабилен и обладает высокой химической стойкостью к окислителям, органическим растворителям, кислотам и основаниям [1, 36]. Ограничения включают очень сильные кислоты и щелочи (например, горячий концентрированный NaOH [10]). Диапазон pH-стабильности достаточно широк (например, pH 5-8 для стандартных АОА [12], но может еще более быть расширен для α-Al₂O₃ [50]). АОА не выщелачивают органические соединения [12, 59]. Широкая химическая стойкость АОА позволяет использовать их в агрессивных процессах и применять агрессивные чистящие химикаты для регенерации [1, 65].

Исходная поверхность оксида алюминия обычно гидрофильна из-за поверхностных гидроксильных групп (-OH) [12, 73]. Изoeлектрическая точка (ИЭТ) Al₂O₃ в диапазоне pH 7-9; ниже ИЭТ поверхность заряжена положительно, выше – отрицательно, что влияет на взаимодействия с заряженными частицами [25]. Хотя гидрофильность может противостоять загрязнению, взаимодействия с заряженными частицами или адсорбатами могут приводить к блокировке пор [8, 73]. Поверхностные -ОН группы на АОА предоставляют центры для химической модификации для

настройки поверхностных свойств [22, 23, 36, 47]. Контролируемый поверхностный заряд АОА может быть использован для повышения селективности.

В настоящее время для жидкостной фильтрации использует глубинные фильтры, полимерные и керамические мембраны. Для объективного сравнения этих фильтрующих элементов используется набор стандартизированных ключевых показателей эффективности (КПЭ): проницаемость/поток [41], эффективность удержания/отклонения [39], селективность, склонность к загрязнению/устойчивость [31], очищаемость/эффективность регенерации [65], механическая прочность [47], химическая стабильность [47], термическая стабильность [47], срок эксплуатации [31] и стоимость [41]. Ни один показатель не определяет «лучшую» мембрану, важна комплексная оценка. Относительная важность КПЭ варьируется в зависимости от применения [1, 2, 27].

Глубинные фильтры (намоточные, из расплава полимера и др.) удерживают частицы по всей толщине слоя и обладают высокой грязеемкостью [70]. Однако они обычно имеют «номинальный» рейтинг удержания, в отличие от «абсолютного» у АОА [67]. Для 100 нм фильтрации большинство стандартных глубинных фильтров не обеспечивают требуемую точность и используются как предфильтры [70], за исключением некоторых современных плиссированных глубинных фильтров (до 0.1 мкм) [70]. Глубинные фильтры дешевле [70], но при точной 100 нм фильтрации требуется их более частая замена. «Номинальный» рейтинг обусловлен сложной структурой пор и механизмами адсорбции/захвата [7], что недопустимо в критических применениях. Возможна миграция среды из некоторых глубинных фильтров, что отсутствует у АОА [12].

Полимерные мембраны (ПЭС, ПТФЭ, ПВДФ, нейлон, ацетат целлюлозы) широко используются из-за низкой стоимости и универсальности [26, 59], служа основным ориентиром для АОА.

АОА характеризуются высокой однородностью пор и прецизионной селективностью, часто превосходящей полимерные аналоги [26, 36]. Поток через АОА может быть значительным благодаря прямым порам и контролируемой пористости [42].

Полимерные мембраны могут обеспечивать хороший поток, но их структура пор более извилистая [9]. Гидрофильные АОА могут быть более устойчивы к некоторым загрязнениям [30]; полимеры часто требуют модификации (ПВДФ гидрофобен, ПЭС гидрофилен, но устойчивость варьируется) [26, 53].

АОА значительно превосходят полимеры по термостойкости (до 400°C стандартные АОА и выше - α - Al_2O_3) [36] и химической инертности ко многим растворителям (α - Al_2O_3 к сильным кислотам/щелочам) [36]. Полимеры имеют более низкие пределы температурной устойчивости (ПЭС до ~200°C, ПВДФ до ~260°C) и могут деградировать [26, 75].

Начальная стоимость керамических мембран (включая АОА) выше полимерных (\$175-600/м² против \$12-35/м²) [40]. Однако совокупная стоимость владения, включающая эксплуатационные расходы и срок службы, [29] у керамических мембран ниже. Они служат дольше (15-20 лет [40] против 2-5 лет для полимеров в жестких условиях), выдерживают агрессивную очистку [41]. Превосходная стабильность АОА позволяет использовать более жесткие протоколы очистки [30]. Низкая реакционная способность АОА с образцами минимизирует потери продукта [26, 36].

Керамические мембраны из различных материалов демонстрируют разные положительные свойства. Мембраны из SiC выделяются наилучшей химической стабильностью (pH 0-14), термостойкостью (>800°C), механической прочностью, гидрофильностью и проницаемостью по сравнению с Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 [19, 75]. ZrO_2 также очень стабилен [19]. Al_2O_3 (не АОА) уступает SiC и ZrO_2 в стабильности и проницаемости [19]. TiO_2 обычно наименее стабилен и проницаем [19]. В экстремальных условиях SiC и ZrO_2 предпочтительнее стандартных АОА (pH 5-8 [12]), хотя α - Al_2O_3 значительно улучшает стойкость Al_2O_3 [50]. Стоимость SiC и ZrO_2 может быть выше из-за более сложных процессов изготовления [40].

Уникальность АОА – легкость получения высокоупорядоченной структуры пор наноразмера (включая 100 нм) анодированием, обеспечивающая прецизионную селективность, недостижимую для порошковых керамик [9].

Таблица 2

Сравнительные характеристики 100 нм Al_2O_3 (АОА) фильтров и альтернативных технологий.

Table 2

Comparative characteristics of 100 nm Al_2O_3 (AOA) filters and alternative technologies.

Параметр	100 нм Al_2O_3 (АОА)	Глубинный фильтр (плиссированный ~0.1 мкм)	Полимерный (ПЭС/ПВДФ ~100 нм)	Керамический SiC (~100 нм)	Керамический ZrO_2 (~100 нм)	Источники
Механизм фильтрации	Поверхностный/ситовой	Глубинный	Поверхностный (преимущ.)/глубинный	Поверхностный/ситовой	Поверхностный/ситовой	[36], [26], [70]
Точность удержания	Абсолютная/Очень высокая	Номинальная/Средняя	Абсолютная/Высокая	Абсолютная/Очень высокая	Абсолютная/Очень высокая	[36], [26], [67]
Однородность пор	Очень высокая (самоорганизация)	Низкая/Средняя	Средняя/Высокая	Высокая (зависит от произв.)	Высокая (зависит от произв.)	[9], [26], [36]
Грязеёмкость	Низкая/Средняя	Очень высокая	Низкая/Средняя	Средняя	Средняя	[26], [70]
Макс. рабочая $t^\circ\text{C}$	400 (АОА), >1200 ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)	<150 (зависит от мат-ла)	ПЭС: ~200, ПВДФ: ~260	>800	~400-600	[19], [26], [36], [50], [59], [75]
Хим. стойкость (общая)	Хорошая (АОА, pH 5-8), Отличная ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)	Зависит от мат-ла	ПЭС: умеренная, ПВДФ: хорошая	Отличная (pH 0-14)	Очень хорошая	[12], [19], [26], [50], [59], [75]
Механическая прочность	Высокая	Средняя/Высокая	Низкая/Средняя	Очень высокая	Высокая	[19], [26], [41], [47]
Регенерация/Очистка	Да, агрессивные методы (особенно $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)	Ограниченная/Нет	Ограниченная/Да (щадящие)	Да, агрессивные методы	Да, агрессивные методы	[30], [41], [50], [75]
Начальная стоимость	Средняя/Высокая	Низкая	Низкая/Средняя	Очень высокая	Высокая	[26], [36], [40], [70]
Срок службы (схожие условия)	Длительный (особенно $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$)	Короткий/Средний	Короткий/Средний	Очень длительный	Длительный	[31], [40], [50]

Жидкостные фильтры из АОА с порами 100 нм могут эффективно использоваться в фармацевтической, биотехнологической, пищевой, микроэлектронной, оптоволоконной промышленности и иных производствах.

АОА мембраны 100 нм обеспечивают высокий уровень удаления микроорганизмов [32]. Их химическая стойкость (особенно $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [12]) к агрессивным растворителям и компонентам лекарств превосходит полимерные аналоги [32]. Термостойкость АОА позволяет многократно автоклавируют фильтры, что экономически выгодно [36]. Использование АОА минимизирует риск экстракции веществ в препарат [12], обеспечивая чистоту и стабильность. Экономическая эффективность складывается из снижения брака, увеличения срока службы фильтров и возможности их

повторного использования [36]. Точный размер пор 100 нм АОА [12] надежнее удаляет микроорганизмы [32].

В клинической практике для лечения сердечно-сосудистых, онкологических, дерматологических и ряда других заболеваний используются липосомальные лекарственные средства. Липосомы и наночастицы требуют точного контроля размера для эффективности их применения [66]. Экструзия через АОА мембраны с высокооднородными порами 100 нм [36] позволяет получать монодисперсные популяции, чего значительно труднее достичь с поликарбонатными мембранами [13]. Использование АОА мембраны позволяет сократить время экструзии, экономить энергию, улучшить воспроизводимость, минимизировать потери материала [13]. Однородность пор АОА [36] ведет к

получению липосом с лучшей фармакокинетикой и терапевтической эффективностью.

АОА мембраны является привлекательной платформой для иммобилизации ферментов благодаря большой удельной площади, контролируемой пористости и биосовместимости [21]. Химическая и термическая стабильность АОА (особенно $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [36]) позволяет использовать иммобили-

зованные ферменты в агрессивных средах и при высоких температурах, защищая ферменты и продлевая срок их службы [21, 62]. Возможность создания многоферментных систем и захвата ферментов из неочищенных лизатов на функционализированные АОА мембраны значительно снижает затраты [21].



Рис. 4. Процесс иммобилизации фермента на Au-электродах у входов в поры АОА [21].

Fig. 4. The process of enzyme immobilization on Au electrodes at the entrances to the pores of AOA [21].

АОА фильтры возможно использовать для предварительной фильтрации в хроматографии. Колонки для высокоэффективной и ультра высокоэффективной жидкостной хроматографии дороги и чувствительны к загрязнению частицами [37]. АОА фильтры 100 нм эффективно удаляют частицы, продлевая срок службы колонок и снижая затраты [37, 38].

В пищевой промышленности керамические мембраны (включая Al_2O_3) выбирают для фильтрации масел из-за термо- и химической стойкости, долговечности и инертности [16, 44]. Керамические мембраны с размером пор 100 нм эффективны для осветления соков и вина, хорошо удаляют взвеси, коллоиды, дрожжи и бактерии без химических реагентов в кислой среде [33, 44, 57]. Их используют в молочной промышленности для снижения микробной обсемененности, фракционирования белков [44]. Они менее склонны к загрязнению и легче очищаются, чем полимеры [36, 44]. Керамические мембраны (~50-100 нм) удаляют несахаристые примеси из сиропов, улучшая последующие процессы производства сахара [34, 56].

В производстве микроэлектроники используются сильные кислоты, основания, окислители. Частицы в них вызывают дефекты и износ оборудования. АОА мембраны (особенно $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ [36]) химически стойки ко многим из этих сред [10, 56].

Фильтрация через АОА 100 нм удаляет частицы, обеспечивая чистоту и защищая оборудование [12]. Возможность фильтрации горячих агрессивных растворов расширяет технологические возможности [12].

В полупроводниковой промышленности для выравнивания поверхности кремниевых пластин применяют СМР суспензии. В СМР суспензиях используются абразивные наночастицы, образование агломератов различных частиц вызывает дефекты на кремниевых пластинах [20, 24]. Фильтрация СМР суспензий для удаления крупных частиц (>0,5 мкм), без задержки рабочих наночастиц делает процесс химико-механической полировки более эффективным [28]. АОА 100 нм обеспечивают более четкое разделение в сравнении с глубинными фильтрами [28, 36]. Химическая стойкость АОА важна для агрессивных СМР суспензий [20, 36].

В производстве полупроводников необходима сверхчистая вода. АОА 100 нм эффективно удаляют наночастицы в процессе ее изготовления [54, 63, 71].

Керамические мембраны (включая Al_2O_3) благодаря стабильности и возможности агрессивной очистки перспективны для разделения нефтеводяных эмульсий [73].

Более полный спектр возможного применения АОА фильтров 100 нм представлен в табл. 3.

Таблица 3

Области применения АОА фильтров 100 нм.

Table 3

Application areas of 100 nm AOA filters.

Область применения	Конкретный случай использования	Роль 100 нм АОА фильтра	Ключевые используемые свойства АОА	Преимущества и экономическое/техническое влияние
Спец. химикаты и фармацевтика	Регенерация гомогенных катализаторов	Удержание наночастиц катализаторов	Хим. инертность, термостойкость, точный размер пор	Снижение потерь катализаторов, энергосбережение, "зеленая химия"
	OSN для АФИ	Разделение АФИ от примесей/растворителя	Устойчивость к растворителям, точный размер пор	Энергоэффективность, повышение чистоты АФИ
	Стерильная фильтрация агрессивных сред	Удаление микроорганизмов	Хим./термостойкость, отсутствие экстрагируемых веществ	Снижение брака, многократная стерилизация
	Экструзия липосом/наночастиц	Формирование монодисперсных частиц	Точность и однородность пор, хим. инертность	Эффективность экструзии, улучшение воспроизводимости и качества продукта
	Мембранные биореакторы (иммобилизация ферментов)	Носитель для ферментов	Хим./термостойкость, большая площадь поверхности, контролируемая пористость	Увеличение срока службы ферментов, интенсификация процесса
	Предварительная фильтрация в хроматографии (ВЭЖХ/УВЭЖХ)	Защита аналитических колонок	Точность пор, хим. инертность, отсутствие экстрагируемых веществ	Продление срока службы колонок, повышение надежности анализа
Микроэлектроника и оптоэлектроника	Фильтрация CMP суспензий	Удаление агломератов	Точность пор, хим. стойкость	Снижение дефектности пластин, увеличение выхода годной продукции
	Полировка ультрачистой воды (UPW)	Удаление наночастиц	Устойчивость к озону, отсутствие выделения частиц/ионов	Обеспечение качества UPW, снижение контаминации, долговечность фильтров
	Фильтрация агрессивных химикатов и растворителей	Удаление механических примесей	Хим./термостойкость ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), отсутствие экстрагируемых веществ	Чистота тех. сред, защита оборудования, стабильность процессов
Пищевая и питьевая промышленность	Осветление пищевых масел при повышенных температурах	Удаление субмикронных частиц	Термо- и хим. стабильность, инертность	Долговечность, сохранение качества масла
	Осветление и стерилизация кислых продуктов (соки, вино)	Удаление взвесей, коллоидов, микроорганизмов	Стабильность в кислой среде, устойчивость к СІР	Улучшение прозрачности и стабильности, снижение потребности в ферментах
	Применения в молочной промышленности	Снижение микробной обсемененности, отделение бактерий	Низкая склонность к загрязнению, автоклавируемость	Меньшее загрязнение, легкая очистка
	Осветление сахарных сиропов	Удаление несхаристых примесей	Точный размер пор, хим. стабильность	Улучшение последующих процессов, автоматизация

Продолжение таблицы 3
Continuation of Table 3

Биомедицинские и биосепарационные применения	Разделение наночастиц и биомолекул	Разделение по размеру	Точность пор, однородность, низкое загрязнение	Резкие пределы отсеечения, высокая эффективность
	Шаблоны для нанопаттернирования	Формирование наноструктур	Высокоупорядоченная структура	Простое получение наноструктур
	Платформы для биосенсорики	Подложка для иммобилизации, компонент диагностики	Высокая площадь поверхности, геометрия пор, функционализуемость	Повышение чувствительности сенсоров, выделение биомаркеров
Передовая аналитическая пробоподготовка	Предварительная фильтрация для ВЭЖХ/ГХ-МС (агрессивные образцы)	Удаление частиц из агрессивных/горячих образцов	Устойчивость к растворителям, термостойкость, низкое содержание экстрагируемых веществ	Продление срока службы колонок/приборов, надежность данных
Экологические и промышленные применения	Обработка геотермальных рассолов	Предварительная фильтрация частиц	Прочность, устойчивость к высоким t° и химикатам	Обеспечение работы последующих стадий, извлечение ресурсов
	Разделение нефтewодяных эмульсий	Отделение капель нефти от воды	Хим., терм., мех. стабильность, возможность агрессивной очистки	Эффективная очистка сточных вод в жестких условиях
	Очистка воды в местах потребления	Удаление бактерий и простейших	Хим. инертность, долговечность	Обеспечение безопасной питьевой водой

АОА фильтры эффективно сочетаются с другими технологиями (табл. 4), что часто приводит к повышению производительности [34]. В настоящее время исследуется возможная интеграция АОА фильтров для очистки жидкостей с ионным обменом или электрокоагуляцией [17].

АОА фильтры благодаря долговечности и стойкости можно эффективно использовать в

многостадийных системах фильтрации в качестве предфильтров [18]. Удаление частиц более 100 нм защищает последующие мембраны [18, 43]. Это продлевает срок службы и поддерживает производительность всей системы. Надежная предварительная фильтрация АОА позволяет последующим процессам работать эффективнее [18].

Таблица 4

Стратегии интеграции 100 нм АОА фильтров.

Table 4

Integration strategies for 100 nm AOA filters.

Тип системы	Роль 100 нм АОА фильтра	Ключевые используемые свойства АОА	Преимущества интеграции	Проблемы/Соображения
Носители катализаторов в проточных реакторах	Микроструктурированный носитель для иммобилизации катализатора	Высокая площадь поверхности, однородные прямые поры (100 нм), функционализуемость, хим./терм. стабильность	Интенсификация процесса, повышение каталитической активности и селективности, снижение OPEX	Загрузка и стабильность катализатора, масштабирование, стоимость

Продолжение таблицы 4
Continuation of Table 4

Предварительный фильтр для ОО/НФ	Удаление мелких частиц, коллоидов, микроорганизмов для защиты последующих мембран	Долговечность, хим./терм. стойкость, точный размер пор, устойчивость к жестким потокам	Продление срока службы ОО/НФ мембран, снижение частоты очистки, повышение стабильности системы, снижение ТСО	Начальная стоимость АОА, хрупкость, оптимизация очистки
Гибридная система с активированным углем	Удаление коллоидных частиц, предотвращающих загрязнение актив. угля	Точный размер пор, хим. инертность	Повышение эффективности и срока службы актив. угля, улучшение качества конечного продукта	Совместимость потоков, общая стоимость системы
Гибридная система с ионным обменом/ЭК	Предварительная или промежуточная фильтрация для удаления взвесей	Прочность, хим. стойкость	Повышение общей эффективности очистки, защита последующих стадий от загрязнения	Интеграция потоков, управление отходами

В перспективе области применения жидкостных АОА фильтров могут значительно расширяться за счет внедрения инноваций в изготовление и модификацию мембран (табл. 5). Создание многослойных пористых архитектур в АОА (разветвленные поры, периодические структуры) обеспечит больший контроль над фильтрацией [14]. Модификация поверхности АОА -ОН группами повысит селективность и противозагрязняющие свойства [36], УФ-клик химия придаст амфифильность [46].

Для повышения эффективности фильтрации жидкостей возможно создание композитных мембраны на основе сочетания АОА с другими материалами: полимерами [52], углеродными нанотрубками [14], оксидами [44].

Несмотря на значительный потенциал жидкостных АОА фильтров существует ряд технологических и научных проблем, решение которых необходимо для повышения их эффективности и расширения сфер применения:

- Загрязнение мембран. Модификации поверхности для изменения смачиваемости [73],

снижение адгезии, разработка эффективных протоколов очистки [44].

- Механическая прочность и хрупкость. Применение композитных материалов [44], поддерживающих конструкций, оптимизация спекания [33].

- Снижение стоимости. Использование алюминия более низкой чистоты, масштабируемые методы производства [20].

- Долговременная стабильность. Изготовление АОА из стабильных фаз (α -Al₂O₃), использование защитных покрытий [14]. Стандартные АОА стабильны до 400°C, pH 5-8 [36].

- Экстрагируемые и вымываемые вещества. Использование высокочистого Al₂O₃ и контроль процессов [36].

Многие проблемы взаимосвязаны. Решение об использовании АОА зависит от анализа компромиссов для конкретного применения [36].

Таблица 5

Перспективы и проблемы для 100 нм АОА фильтров.

Table 5

Prospects and challenges for 100 nm AOA filters.

Аспект (Инновация/Проблема)	Конкретный фокус	Текущий статус/Ключевые результаты	Направление будущих исследований/Стратегия смягчения	Потенциальное влияние
Инновации				
Иерархические пористые структуры	Многослойные, разветвленные поры	Существуют анизотропные мембраны [11]	Разработка контролируемых методов создания сложных 3D-структур пор	Улучшенный контроль фильтрации, новые механизмы разделения, повышенная проницаемость
Передовая функционализация	Повышение селективности, противозагрязняющие свойства	-ОН группы для модификации [36]; УФ-клик химия [46]; АСО для покрытий [74]	Разработка специфических функциональных групп, стабильных противозагрязняющих покрытий	Высокоселективное разделение, снижение загрязнения, продление срока службы
Композитные мембраны АОА	Улучшение мех. прочности, каталит. активности, противозагрязняющих св-в	АОА/полимер [52], АОА/УНТ [14]	Оптимизация совместимости компонентов, масштабируемые методы производства	Повышенная прочность, многофункциональность, снижение стоимости
Интеграция сенсорных возможностей	"Умная" фильтрация, мониторинг в реальном времени	АОА как платформа для сенсоров [49]; интеграция с биосенсорами [48]	Разработка надежных, миниатюрных сенсоров, интегрируемых в модули	Самодиагностика мембран, оптимизация процесса, раннее обнаружение проблем
Проблемы				
Загрязнение, регенерация	Органические/неорганические загрязнители	Загрязнение снижает поток [44]; модификация поверхности [73]; агрессивная очистка [44]	Разработка универсальных противозагрязняющих покрытий, оптимизация СІР	Увеличение срока службы, снижение ОРЕХ, стабильная производительность
Механическая прочность, хрупкость	Хрупкость керамики	АОА может быть хрупким [36]; композиты [44]	Разработка более прочных композитов АОА, улучшение конструкции модулей	Повышение надежности, упрощение эксплуатации, возможность создания крупных систем
Снижение стоимости	Высококачественное сырье, сложные процессы, масштабируемость	Начальная стоимость выше полимеров; использование низкочистого Al [49]	Процессы с менее чистым сырьем, оптимизация энергопотребления, непрерывное пр-во	Расширение областей применения за счет экономической доступности
Долговременная стабильность	Стабильность γ - Al_2O_3 в воде, в жестких условиях	γ - Al_2O_3 нестабилен [14]; α - Al_2O_3 стабильнее [16]; покрытия АСО [14]	Производство АОА из стабильных фаз, долговечные защитные покрытия	Надежная работа в течение длительного времени, снижение затрат на замену
Экстрагируемые вещества	Загрязнение фильтра	Изотропные АОА не имеют экстрагируемых [12]	Высококачественные материалы, строгий контроль процессов, стандартные протоколы очистки	Гарантия чистоты продукта, соответствие нормам

Продолжение таблицы 5
Continuation of Table 5

Экономическая целесообразность	Соотношение затрат и выгод	Рост рынка АОА; ТСО может быть ниже [44]	Комплексные ТЭО для конкретных применений, снижение производственных затрат	Определение оптимальных ниш, стимулирование более широкого внедрения
--------------------------------	----------------------------	--	---	--

Выводы

Жидкостные фильтры из анодного оксида алюминия с размером пор 100 нм представляют собой высокотехнологичный класс мембранных материалов, находящихся все более широкое применение в критически важных отраслях промышленности. Их уникальная, строго упорядоченная нанопористая структура, получаемая методом электрохимического анодирования, позволяет с высокой точностью контролировать геометрию пор, обеспечивая прецизионное разделение на наноуровне.

Ключевыми областями их успешного использования являются фармацевтика и биотехнологии (стерильная фильтрация, экструзия липосом, иммобилизация ферментов, хроматографическая пробоподготовка), микроэлектроника (фильтрация СМР суспензий, полировка UPW, очистка агрессивных химикатов), пищевая промышленность (осветление масел, соков, вина, молока, сиропов), а также специализированные экологические и промышленные задачи (обработка геотермальных рассолов, разделение нефтеводяных эмульсий).

Неоспоримые преимущества 100 нм АОА фильтров, такие как точно заданный и узко рас-

пределенный размер пор, исключительная термическая и химическая стабильность [36], а также механическая прочность, лежат в основе их успеха в специализированных областях. Однако сохраняются и существенные проблемы, в первую очередь связанные со стоимостью, загрязнением и образованием отложений [51], потенциальной хрупкостью [36], а также необходимостью дальнейшего улучшения долговременной стабильности некоторых фаз оксида алюминия или в экстремально жестких условиях эксплуатации [14].

Жидкостные фильтры из АОА с размером пор 100 нм можно рассматривать как состоявшуюся технологию, обладающую значительным потенциалом для более широкого внедрения по мере устранения текущих ограничений. Наблюдается тенденция к созданию более сложных АОА мембран (функционализированных, композитных, иерархических, интеллектуальных), которые выходят за рамки простой фильтрации и становятся активными, многофункциональными компонентами в передовых системах разделения и реакционных системах.

Финансирование

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

Список источников

1. Дейнега Г.И., Кузьмина И.Г., Битюцкая О.Н., Нарский А.Р. Пенокерамические фильтры на основе отечественных огнеупорных материалов. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2023. № 11. С. 2. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25
2. Каталевский А.Д., Смирнов К.В., Смирнова Н.Н. Мембраны в биотехнологии: современное состояние и перспективы // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2025. Т. 68. Вып. 1. С. 6 – 22. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7075
3. Лебедева О.А., Седелкин В.М., Потехина Л.Н. Технология получения и характеристики хитозановых нано-фильтрационных мембран // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 58 – 65. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6340
4. Пятков Е.С. Мезопористые керамические мембраны для фракционирования низкомолекулярных углеводородов: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2017. 111 с. (<https://www.imet.ac.ru/upload/dissertations/ДиссертацияПятковфин2017-10-12-14.pdf>)
5. Тилеуберди Т., Цзи С., Пань М., Люй А., Хуан Ц., Воронова Г.А. Получение наноструктурных пористых материалов электрохимическим анодированием алюминия // Вестник Томского государственного университета. Химия. 2020. № 20. С. 30 – 37.

6. Фадеева Н.П., Павлов В.М., Харченко И.А., Симунин М.М., Шабанова К.А., Павлов В.Ф., Рыжков И.И. Высокопрочные керамические подложки на основе перлита и пеносиликатов для фильтрационных мембран // Мембраны и мембранные технологии. 2022. Т. 12. № 3. С. 192 – 199.

7. 5 Things You Need to Know About Depth Filters [Электронный ресурс] // PoreFiltration. URL: <https://www.porefiltration.co.uk/resources/articles/5-things-you-need-to-know-about-depth-filters> (дата обращения: 02.01.2025)

8. Abuwatfa W.H., AlSawaftah N., Darwish N., Pitt W.G., Husseini G.A. A Review on Membrane Fouling Prediction Using Artificial Neural Networks (ANNs) [Электронный ресурс] // Membranes (Basel). 2023. Vol. 13 (7). P. 685. doi: 10.3390/membranes13070685. PMID: 37505052; PMCID: PMC10383311. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10383311/> (дата обращения: 02.01.2025)

9. Adiga S.P., Jin C., Curtiss L.A., Monteiro-Riviere N.A., Narayan R.J. Nanoporous membranes for medical and biological applications [Электронный ресурс] // Int J Nanomedicine/ 2013. Vol. 8. P. 2421 – 2433. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3684197/> (дата обращения: 02.01.2025)

10. Aluminium oxide [Электронный ресурс] // Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide (дата обращения: 02.01.2025) and Isabell Thomann

11. Anodic Aluminum Oxide Anisotropic membrane filters, 2-4nm pore, 13mm dia, pk20 [Электронный ресурс] // SPI Supplies. URL: <https://www.2spi.com/item/aaoa213-ca/> (дата обращения: 02.01.2025)

12. Anodic Aluminum Oxide Isotropic membrane filters, 100nm pore, 13mm dia, pk20 [Электронный ресурс] // SPI Supplies. URL: <https://www.2spi.com/item/aaoi10013-ca/> (дата обращения: 02.01.2025)

13. AU649293B2 – Liposome extrusion process [Электронный ресурс] // Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/AU649293B2/en> (дата обращения: 02.01.2025).

14. Bauer R.A., Qiu M., Schillo-Armstrong M.C. Snider M.T., Yang Z., Zhou Y., Verweij H. Ultra-Stable Inorganic Mesoporous Membranes for Water Purification [Электронный ресурс] // Membranes. 2024. Vol. 14. № 2. P. 34. <https://www.mdpi.com/2077-0375/14/2/34> (дата обращения: 02.01.2025)

15. Bezelya A., Küçüktürkmen B., Bozkır A. Microfluidic Devices for Precision Nanoparticle Production [Электронный ресурс] // Micro. 2023. Vol. 3. № 4. P. 696 – 715. URL: <https://www.mdpi.com/2673-8023/3/4/58> (дата обращения: 02.01.2025)

16. Bolto B., Zhang J., Wu X., Xie Z. A Review on Current Development of Membranes for Oil Removal from Wastewaters // Membranes. 2020.-10(4).-P.65. <https://doi.org/10.3390/membranes10040065> [Электронный ресурс] <https://www.mdpi.com/2077-0375/10/4/65> (дата обращения: 02.01.2025)

17. Ceramic Membrane Filtration [Электронный ресурс] // Water & Wastewater. URL: <https://www.waterandwastewater.com/ceramic-membrane-filtration/> (дата обращения: 02.01.2025)

18. Ceramic Membrane Filtration System [Электронный ресурс] // Water & Wastewater. URL: <https://www.waterandwastewater.com/ceramic-membrane-filtration-system/> (дата обращения: 02.01.2025)

19. Ceramic Membrane Technology [Электронный ресурс] // LiqTech. URL: <https://liqtech.com/filters/our-core-technology/> (дата обращения: 02.01.2025)

20. Chemical Mechanical Polishing [Электронный ресурс] // Malvern Panalytical. URL: <https://www.malvernpanalytical.com/en/industries/electronics/cmp-slurry> (дата обращения: 02.01.2025)

21. Chen Z., Zhang J., Singh S., Peltier-Pain P., Thorson J.S., Hinds B.J. Functionalized anodic aluminum oxide membrane-electrode system for enzyme immobilization [Электронный ресурс] // ACS Nano. 2014. Vol. 26. P. 8104 – 8112. doi: 10.1021/nn502181k. PMID: 25025628; PMCID: PMC4148145. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4148145/> (дата обращения: 02.01.2025)

22. Chen Y.-F., Hu Y.-H., Chou Y.-I., Lai S.-M., Wang C.-C. Surface modification of nano-porous anodic alumina membranes and its use in electroosmotic flow [Электронный ресурс] // Sensor Actuators B: Chem. 2010. Vol. 145. P. 575 – 582, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.12.061>

23. Chu C.W., Tsai C.H. Surface Modification of Nanopores in an Anodic Aluminum Oxide Membrane through Dopamine-Assisted Codeposition with a Zwitterionic Polymer [Электронный ресурс] // Langmuir. 2024. Vol. 12. P. 5245 – 5254. doi: 10.1021/acs.langmuir.3c03654. Epub 2024 Feb 26. PMID: 38408434; PMCID: PMC10938887. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38408434/> (дата обращения: 02.01.2025)

24. CMP Filtration Application [Электронный ресурс] // Membrane Solutions. URL: https://www.membrane-solutions.com/application_cmp_filtration.htm (дата обращения: 02.01.2025)

25. Dashtban Kenari S.L., Mortazavi S., Mosadeghsedghi S. Atallah C., Volchek K. Advancing Ceramic Membrane Technology for Sustainable Treatment of Mining Discharge: Challenges and Future Directions [Электронный ресурс] // Membranes. 2025. Vol. 15. № 4. P. 112. <https://doi.org/10.3390/membranes15040112> URL: <https://www.mdpi.com/2077-0375/15/4/112> (дата обращения: 02.01.2025)

26. Difference Between PES and PVDF Filter Membrane [Электронный ресурс] // Hawach. URL: <https://www.hawachmembrane.com/difference-between-pes-and-pvdf-filter-membrane/> (дата обращения: 02.01.2025)
27. Exploring Consumer Shifts in Semiconductor Liquid Filters Market 2025-2033 [Электронный ресурс] // Data Insights Market. URL: <https://www.datainsightsmarket.com/reports/semiconductor-liquid-filters-1660691> (дата обращения: 02.01.2025)
28. Filtration characteristics of CMP slurries [Электронный ресурс] // Entegris. URL: <https://www.entegris.com/content/dam/web/resources/application-notes/appnote-filtration-characteristics-of-cmp-slurries-7590.pdf> (дата обращения: 02.01.2025)
29. Filtration Total Cost of Ownership – What you need to know. [Электронный ресурс] // Midwest Air Filter. URL: <https://www.midwestairfilter.com/blogs/articles/filtration-total-cost-of-ownership-what-you-need-to-know> (дата обращения: 02.01.2025)
30. Food Processes with Ceramic Membranes [Электронный ресурс] // Messinger Engineering. URL: https://www.messinger.engineering/keramik_lebensmittel.php (дата обращения: 02.01.2025)
31. Foorginezhad S., Zerafat M.M., Ismail A.F., Gohc P.S. Emerging membrane technologies for sustainable water treatment [Электронный ресурс] // Environ. Sci.: Adv. 2025. № 4. P. 530 – 570 URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/va/d4va00378k> (дата обращения: 02.01.2025)
32. Gulyakin I.D., Nikolaeva L.L., Sanarova E.V., Lantsova A.V., Oborotova N.A. Use of Membrane Filters in Production Technology for Sterile Drugs [Электронный ресурс] // Pharmaceutical Chemistry Journal. 2016. Т. 50. № 1. С. 33 – 37. doi: 10.1007/s11094-016-1394-1
33. Gutiérrez-Docio A., Ruiz-Rodríguez A., Prodanov M. Clarification of olive juice by α -alumina microfiltration membranes with enhanced packing density [Электронный ресурс] // Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2025. Vol. 102. P. 104031. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104031> (дата обращения: 02.01.2025)
34. Hang F., Xu H., Xie C., Li K., Wen T., Meng L. Pretreatment of Glucose-Fructose Syrup with Ceramic Membrane Ultrafiltration Coupled with Activated Carbon [Электронный ресурс] // Membranes (Basel). 2024. Vol. 23. № 3. P. 57. doi: 10.3390/membranes14030057. PMID: 38535276; PMCID: PMC10972182. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10972182/> (дата обращения: 02.01.2025)
35. High Temperature Filtration Solutions: A Comprehensive Guide for Industrial Applications [Электронный ресурс] // Griffin Filters. URL: <https://griffinfilters.com/blogs/news/high-temperature-filtration-solutions-a-comprehensive-guide-for-industrial-applications> (дата обращения: 02.01.2025)
36. High-Quality AAO Filters at the Price of Standard Polymer Filters! [Электронный ресурс] // Anodic Aluminum Oxide Membrane. URL: <https://aaomembrane.com/product/> (дата обращения: 02.01.2025)
37. How to Extend Liquid Chromatography Column Life: Regenerate or Use Guard Columns [Электронный ресурс] // Sigma-Aldrich. URL: <https://www.sigmaaldrich.com/US/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/small-molecule-hplc/how-to-extend-liquid-chromatography-column-life> (дата обращения: 02.01.2025)
38. How to Extend the Lifetime of HPLC Columns? [Электронный ресурс] // Phenomenex. URL: <https://www.phenomenex.com/knowledge-center/hplc-knowledge-center/how-to-extend-the-lifetime-hplc-columns> (дата обращения: 02.01.2025)
39. Itaya K., Sugawara S., Arai K., Sait S. Properties of porous anodic aluminum oxide films as membranes [Электронный ресурс] // J. Chem. Eng. Japan. 1984. Vol. 17. № 5. P. 514 – 520. J-Stage. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcej1968/17/5/17_5_514/_article (дата обращения: 02.01.2025)
40. Jarvis P., Carra I., Jafari M., Judd S.J. Ceramic vs polymeric membrane implementation for potable water treatment [Электронный ресурс] // Water Res. 2022. Vol. 15.-P.118269. doi: 10.1016/j.watres.2022.118269. Epub 2022 Mar 8. PMID: 35298992. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35298992/> (дата обращения: 02.01.2025)
41. Jarvis P., Carra I., Jafari M., Judd S.J. Development of a Techno-Economic Model to Compare Ceramic and Polymeric Membranes [Электронный ресурс] // Water Research. 2022. Vol. 215. // ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/254359000_Development_of_a_Techno-Economic_Model_to_Compare_Ceramic_and_Polymeric_Membranes (дата обращения: 02.01.2025)
42. Kang G.-S., Baek Y., Yoo J.-B. Relationship between surface hydrophobicity and flux for membrane separation [Электронный ресурс] // RSC Adv. 2020. Vol. 10. P. 40043 – 40046. RSC Publishing. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ra/d0ra07262a> (дата обращения: 02.01.2025)

43. Kehrein P., Jafaria M., Slagtb M., Emile Cornelissenc E., Osseweijera P., John Posadaa J., van Loosdrechta M. A techno-economic analysis of membrane-based advanced treatment processes for the reuse of municipal wastewater [Электронный ресурс] // Water Reuse.-2021. Vol. 11. № 4. P. 705 – 725. URL: [https://api.kwrwater.nl/uploads/2022/01/Kehrein-A-techno-economic-analysis-of-membrane-based-advanced-treatment-processes-for-the-reuse-of-municipal-Water-Reuse-11\(2021\)4-705.pdf](https://api.kwrwater.nl/uploads/2022/01/Kehrein-A-techno-economic-analysis-of-membrane-based-advanced-treatment-processes-for-the-reuse-of-municipal-Water-Reuse-11(2021)4-705.pdf) (дата обращения: 02.01.2025)
44. Kotobuki M., Gu Q., Zhang L., Wang J. Ceramic-Polymer Composite Membranes for Water and Wastewater Treatment: Bridging the Big Gap between Ceramics and Polymers [Электронный ресурс] // Molecules. 2021. Vol. 26 (11). P. 3331. doi: 10.3390/molecules26113331. PMID: 34206052; PMCID: PMC8198361 (дата обращения: 02.01.2025)
45. Ku C.-A., Yu C.-Y., Hung C.-W., Chung C.-K. Advances in the Fabrication of Nanoporous Anodic Aluminum Oxide and Its Applications to Sensors: A Review [Электронный ресурс] // Nanomaterials (Basel). 2023. Vol. 13 (22) URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10650129/> (дата обращения: 02.01.2025)
46. Lee L.R., Fan P.H., Chen Y.F., Chang M.H., Liu Y.C., Chang C.C., Chen J.T. Structurally Defined Amphiphilic AAO Membranes Using UV-Assisted Thiol-Yne Chemistry: Applications in Anti-Counterfeiting and Electronics [Электронный ресурс] // ACS Appl Mater Interfaces. 2024. Vol. 16 (36). P. 48073 – 48084. doi: 10.1021/acsami.4c09040. Epub 2024 Aug 27. PMID: 39189834; PMCID: PMC11403548. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11403548/> (дата обращения: 02.01.2025)
47. Lin Y.-C., Lee L.-R., Liu Y.-C., Gautam B., Ho J.-H., Tsai T.-H., Lin J., Zheng Y.-H., Chen J.-T. Advancing Nanopore Technology: Anodic Aluminum Oxide [Электронный ресурс] // ACS Appl. Nano Mater. 2024. Vol. 7. P. 14707 – 14718 [Электронный ресурс]. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsanm.4c02257> (дата обращения: 02.01.2025).
48. Liu L., Ayupova T., Umrao S., Akin L.D., Lee H.K., Tibbs J., Wang X., Demirci U., Cunningham B.T. A biosensor-integrated filtration device for nanoparticle isolation and label-free imaging [Электронный ресурс] // Lab Chip. 2025. Vol. 25 (8). P. 2073 – 2084. doi: 10.1039/d5lc00089k. PMID: 40105290; PMCID: PMC11921766. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11921766/> (дата обращения: 02.01.2025)
49. Manzoor S., Ashraf M.W., Tayyaba S., Tariq M.I., Hossain M. K., Recent Progress of Fabrication, Characterization, and Applications of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Membrane: A Review [Электронный ресурс] // CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences. 2022. Vol. 135. № 2. P. 1007 – 1052. <https://doi.org/10.32604/cmes.2022.022093>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526149222003113>)
50. McQuaig M.K., Toro A., Van Geertruyden W., Wojciech Z. Misiolk The effect of high temperature heat treatment on the structure and properties of anodic aluminum oxide [Электронный ресурс] // J Mater Sci. 2011. 46. P. 243 – 253 <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4966-6> (дата обращения: 02.01.2025)
51. Membrane technology [Электронный ресурс] // VITO. URL: <https://vito.be/en/applications/membrane-technology> (дата обращения: 02.01.2025)
52. Mijangos C., Martin J. Polymerization within Nanoporous Anodized Alumina Oxide Templates (AAO): A Critical Survey [Электронный ресурс] // Polymers (Basel). 2023. Vol. 15 (3). P. 525. doi: 10.3390/polym15030525. PMID: 36771824; PMCID: PMC9919978. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9919978/> (дата обращения: 02.01.2025)
53. Moaness M., El-Sayed S.A.M., Beherei H.H., Mabrouk M. Enhancing the Antifouling Properties of Alumina Nanoporous Membranes by GO/MOF Impregnated Polymer Coatings: In Vitro Studies [Электронный ресурс] // Journal of Functional Biomaterials. 2024. Vol. 15 (3). P. 50. <https://doi.org/10.3390/jfb15030050> URL: <https://www.mdpi.com/2079-4983/15/3/50> (дата обращения: 02.01.2025)
54. Nguyen D.T., Lee S., Lopez K.P., Lee J., Straub A.P. Pressure-driven distillation using air-trapping membranes for fast and selective water purification [Электронный ресурс] // Science. Advance. 2023. Vol. 9. DOI:10.1126/sciadv.adg6638
55. Niazi F.K., Umer M.A., Ahmed A., Hafeez M.A., Khan Z., Butt M.S., Razzaq A., Luo X., Park Y.-K. Nanoporous Alumina Membranes for Sugar Industry: An Investigation of Sintering Parameters Influence on Ultrafiltration Performance [Электронный ресурс] // Sustainability. 2021. Vol. 13. P. 7593. <https://doi.org/10.3390/su13147593> (дата обращения: 02.01.2025)
56. Oh J., Myoung J., Bae J. S., Lim S. Etch behavior of ALD Al₂O₃ on HfSiO and HfSiON stacks in acidic and basic etchants [Электронный ресурс] // Journal of the Electrochemical Society. 2011. Vol. 158 (4). P. 217 – 222. <https://doi.org/10.1149/1.3554729>

57. Oro C.E.D., Puton B.M.S., Venquiaruto L.D., Dallago R.M., Arend G.D., Tres M.V. The Role of Membranes in Modern Winemaking: From Clarification to Dealcoholization [Электронный ресурс] // *Membranes* (Basel). 2025. Vol. 15 (1). P. 14. doi: 10.3390/membranes15010014. PMID: 39852255; PMCID: PMC11766575
58. Patel Y., Janusas G., Palevicius A., Vilkauskas A. Development of Nanoporous AAO Membrane for Nano Filtration Using the Acoustophoresis Method [Электронный ресурс] // *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10. № 14. P. 4941. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7412301/> (дата обращения: 02.01.2025)
59. Polymeric and Inorganic Membrane Disc Filters [Электронный ресурс] // *Sterlitech*. URL: <https://www.sterlitech.com/membrane-disc-filters.html> (дата обращения: 02.01.2025)
60. Pulido B., Chisca S., Nunes S.P. Solvent and thermal resistant ultrafiltration membranes from alkyne-functionalized high-performance polymers [Электронный ресурс] // *Journal of Membrane Science*. 2018. Мшд Т. 564. P. 361 – 371. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.07.025> (дата обращения: 17.07.2025)
61. Qasim F., Ashraf M.W., Tayyaba S., Tariq M.I., Herrera-May A.L., Simulation, Fabrication and Microfiltration Using Dual Anodic Aluminum Oxide Membrane [Электронный ресурс] // *Membranes*. 2023. Vol. 13. P. 825. <https://doi.org/10.3390/membranes13100825> URL: <https://www.mdpi.com/2077-0375/13/10/825> (дата обращения: 02.01.2025)
62. Ranieri G., Mazzei R., Wu Z., Li K., Giorno L. Use of a Ceramic Membrane to Improve the Performance of Two-Separate-Phase Biocatalytic Membrane Reactor [Электронный ресурс] // *Molecules*. 2016. Mar 14. № 21 (3). P. 345. doi: 10.3390/molecules21030345. PMID: 26985887; PMCID: PMC6274081. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26985887/> (дата обращения: 02.01.2025)
63. Robatjazi H., Macfarlan L.H., Shah Bahauddin M., Fu S. Ultrathin AAO Membrane as a Generic Template for Sub-100 nm Nanostructure Fabrication [Электронный ресурс] // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. Vol. 28. № 13. P. 4546 – 4553. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b00722> (дата обращения: 02.01.2025)
64. Shao L., Huang X., Teschner D., Zhang W. Gold Supported on Graphene Oxide: An Active and Selective Catalyst for Phenylacetylene Hydrogenations at Low Temperatures [Электронный ресурс] // *ACS Catal.* 2014. Vol. 4. № 7. P. 2369 – 2373 ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/263938962_Gold_Supported_on_Graphene_Oxide_An_Active_and_Selective_Catalyst_for_Phenylacetylene_Hydrogenations_at_Low_Temperatures (дата обращения: 02.01.2025)
65. Shim S. Design, construction and evaluation of an experimental ceramic membrane facility with investigation into fouling control [Электронный ресурс] // *Figshare*. URL: https://figshare.com/articles/thesis/Design_construction_and_evaluation_OFAN_experimental_ceramic_membrane_facility_with_investigation_into_fouling_control/14648892/1 (дата обращения: 02.01.2025) (Примечание: Тезис диссертации).
66. Smart Drug Delivery System [Электронный ресурс]. URL: <https://scispace.com/pdf/smart-drug-delivery-system-1a61u83vmz.pdf> (дата обращения: 02.01.2025)
67. The Differences Between Membrane and Depth Filters in Microfiltration [Электронный ресурс] // *PoreFiltration*. URL: <https://www.porefiltration.co.uk/resources/articles/the-differences-between-membrane-and-depth-filters-in-microfiltration> (дата обращения: 02.01.2025)
68. The Future of Microelectronics Wastewater Treatment: Challenges and Innovations [Электронный ресурс] // *Veolia Water Technologies UK Blog*. URL: <https://blog.veoliawatertechnologies.co.uk/the-future-of-microelectronics-wastewater-treatment-challenges-and-innovations-1> (дата обращения: 02.01.2025)
69. Tian M., Yang C., Huang Q., Wang R., Su X., Xu P., Peng T. Synthesis and Evaluation of High-Temperature-Resistant and Environmentally Friendly Polymer Filter Loss Additives [Электронный ресурс] // *Polymers*. 2025. Vol. 17. № 6. P. 792. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/6/792> (дата обращения: 02.01.2025)
70. Understanding Depth Filters [Электронный ресурс] // *PoreFiltration*. URL: <https://www.porefiltration.co.uk/resources/articles/understanding-depth-filters> (дата обращения: 02.01.2025)
71. US5518624A – Ultra pure water filtration [Электронный ресурс] // *Google Patents*. URL: <https://patents.google.com/patent/US5518624A/en> (дата обращения: 02.01.2025)
72. Valappil R.S.K., Ghasem N., Al-Marzouqi M. Current and future trends in polymer membrane-based gas separation technology: A comprehensive review [Электронный ресурс] // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 2021. Vol. 98. P. 103 – 129. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.030> (дата обращения: 02.01.2025)
73. Wei T., Chen X., Guo Z. Ceramic membrane composites for highly efficient oil–water separation: a review [Электронный ресурс] // *J. Mater. Chem. A*. 2024. Vol. 12. P. 20803 – 20837. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/ta/d4ta04208e> (дата обращения: 02.01.2025)

74. Westermann T., Melin T. Flow-through catalytic membrane reactors – Principles and applications [Электронный ресурс] // Chemical Engineering & Processing: Process Intensification. 2009. Vol. 48. № 1. P. 17 – 28. https://www.researchgate.net/publication/223363267_Flow-through_catalytic_membrane_reactors-Principles_and_applications (дата обращения: 02.01.2025)

75. Why Use Ceramic Membranes [Электронный ресурс] // LiqTech. URL: <https://liqtech.com/filters/silicon-carbide-membranes/why-use-ceramic-membranes/> (дата обращения: 02.01.2025)

76. Xu B., Gao W., Liao B., Bai H., Qiao Y., Turek W. A Review of Temperature Effects on Membrane Filtration [Электронный ресурс] // Membranes (Basel). 2024. Vol. 14 (1). P. 23. [Электронный ресурс] URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10819527/> (дата обращения: 02.01.2025)

References

1. Deinega G.I., Kuzmina I.G., Bityutskaya O.N., Narskiy A.R. Foam ceramic filters based on domestic refractory materials. Part 1. Proceedings of VIAM. 2023. No. 11. P. 2. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-11-17-25

2. Katalevsky A.D., Smirnov K.V., Smirnova N.N. Membranes in biotechnology: current state and prospects. News of universities. Chemistry and chemical technology. 2025. Vol. 68. Issue. 1. P. 6 – 22. DOI: 10.6060/ivkkt.20256801.7075

3. Lebedeva O.A., Sedelkin V.M., Potekhina L.N. Technology of obtaining and characteristics of chitosan nanofiltration membranes. Izvestiya Universiteta. Chemistry and Chemical Technology. 2022. Vol. 65. Issue 1. P. 58 – 65. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6340

4. Pyatkov E.S. Mesoporous ceramic membranes for fractionation of low-molecular hydrocarbons: dis. ... Cand. of Engineering Sciences. Moscow, 2017. 111 p. (<https://www.imet.ac.ru/upload/dissertations/ДиссертацияПятковfin2017-10-12-14.pdf>)

5. Tileuberdi T., Ji S., Pan M., Lyu A., Huang Q., Voronova G.A. Production of nanostructured porous materials by electrochemical anodizing of aluminum. Bulletin of Tomsk State University. Chemistry. 2020. No. 20. P. 30 – 37.

6. Fadeeva N.P., Pavlov V.M., Kharchenko I.A., Simunin M.M., Shabanova K.A., Pavlov V.F., Ryzhkov I.I. High-strength ceramic substrates based on perlite and foam silicates for filtration membranes. Membranes and membrane technologies. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 192 – 199.

7. 5 Things You Need to Know About Depth Filters [Electronic resource]. PoreFiltration. URL: <https://www.porefiltration.co.uk/resources/articles/5-things-you-need-to-know-about-depth-filters> (accessed: 02.01.2025)

8. Abuwatfa W.H., AlSawaftah N., Darwish N., Pitt W.G., Hussein G.A. A Review on Membrane Foul-ing Prediction Using Artificial Neural Networks (ANNs) [Electronic resource]. Membranes (Basel). 2023. Vol. 13 (7). P. 685. doi: 10.3390/membranes13070685. PMID: 37505052; PMCID: PMC10383311. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10383311/> (date of access: 01.02.2025)

9. Adiga S.P., Jin C., Curtiss L.A., Monteiro-Riviere N.A., Narayan R.J. Nanoporous membranes for medical and biological applications [Electronic resource]. Int J Nanomedicine. 2013. Vol. 8. P. 2421 – 2433. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3684197/> (date of access: 02.01.2025)

10. Aluminum oxide [Electronic resource]. Wikipedia. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Aluminium_oxide (date of access: 02.01.2025) and Isabell Thomann

11. Anodic Aluminum Oxide Anisotropic membrane filters, 2-4nm pore, 13mm dia, pk20 [Electronic resource]. SPI Supplies. URL: <https://www.2spi.com/item/aaoa213-ca/> (date of access: 02.01.2025)

12. Anodic Aluminum Oxide Isotropic membrane filters, 100nm pore, 13mm dia, pk20 [Electronic resource]. SPI Supplies. URL: <https://www.2spi.com/item/aaoi10013-ca/> (date of access: 02.01.2025)

13. AU649293B2 – Liposome extrusion process [Electronic resource]. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/AU649293B2/en> (date of access: 02.01.2025)

14. Bauer R.A., Qiu M., Schillo-Armstrong M.C. Snider M.T., Yang Z., Zhou Y., Verweij H. Ultra-Stable Inorganic Mesoporous Membranes for Water Purification [Electronic resource]. Membranes. 2024. Vol. 14. No. 2. P. 34. <https://www.mdpi.com/2077-0375/14/2/34> (date of access: 02.01.2025)

15. Bezelya A., Küçüktürkmen B., Bozkır A. Microfluidic Devices for Precision Nanoparticle Production [Electronic resource]. Micro. 2023. Vol. 3. No. 4. P. 696 – 715. URL: <https://www.mdpi.com/2673-8023/3/4/58> (date of access: 02.01.2025)

16. Bolto B., Zhang J., Wu X., Xie Z. A Review on Current Development of Membranes for Oil Removal from Wastewaters. *Membranes*. 2020.-10(4).-P.65. <https://doi.org/10.3390/membranes10040065> [Electronic resource] <https://www.mdpi.com/2077-0375/10/4/65> (date of access: 02.01.2025)
17. Ceramic Membrane Filtration [Electronic resource]. Water & Wastewater. URL: <https://www.waterandwastewater.com/ceramic-membrane-filtration/> (date of access: 01.02.2025)
18. Ceramic Membrane Filtration System [Electronic resource]. Water & Wastewater. URL: <https://www.waterandwastewater.com/ceramic-membrane-filtration-system/> (date of access: 01.02.2025)
19. Ceramic Membrane Technology [Electronic resource]. LiqTech. URL: <https://liqtech.com/filters/our-core-technology/> (access date: 01.02.2025)
20. Chemical Mechanical Polishing [Electronic resource]. Malvern Panalytical. URL: <https://www.malvernpanalytical.com/en/industries/electronics/cmp-slurry> (date of access: 01.02.2025)
21. Chen Z., Zhang J., Singh S., Peltier-Pain P., Thorson J.S., Hinds B.J. Functionalized anodic aluminum oxide membrane-electrode system for enzyme immobilization [Electronic resource]. *ACS Nano*. 2014. Vol. 26. P. 8104 – 8112. doi: 10.1021/nn502181k. PMID: 25025628; PMCID: PMC4148145. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4148145/> (date of access: 02.01.2025)
22. Chen Y.-F., Hu Y.-H., Chou Y.-I., Lai S.-M., Wang C.-C. Surface modification of nano-porous anodic aluminum membranes and its use in electroosmotic flow [Electronic resource]. *Sensor Actuators B: Chem.* 2010. Vol. 145. P. 575 – 582, <https://doi.org/10.1016/j.snb.2009.12.061>
23. Chu C.W., Tsai C.H. Surface Modification of Nanopores in an Anodic Aluminum Oxide Membrane through Dopamine-Assisted Codeposition with a Zwitterionic Polymer [Electronic resource]. *Langmuir*. 2024. Vol. 12. P. 5245 – 5254. doi: 10.1021/acs.langmuir.3c03654. Epub 2024 Feb 26. PMID: 38408434; PMCID: PMC10938887. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38408434/> (date of access: 02.01.2025)
24. CMP Filtration Application [Electronic resource]. Membrane Solutions. URL: https://www.membrane-solutions.com/application_cmp_filtration.htm (date of access: 02.01.2025)
25. Dashtban Kenari S.L., Mortazavi S., Mosadeghsedghi S. Atallah C., Volchek K. Advancing Ceramic Membrane Technology for Sustainable Treatment of Mining Discharge: Challenges and Future Directions [Electronic resource]. *Membranes*. 2025. Vol. 15. No. 4. P. 112. <https://doi.org/10.3390/membranes15040112> URL: <https://www.mdpi.com/2077-0375/15/4/112> (date of access: 02.01.2025)
26. Difference Between PES and PVDF Filter Membrane [Electronic resource]. Hawach. URL: <https://www.hawachmembrane.com/difference-between-pes-and-pvdf-filter-membrane/> (date of access: 02.01.2025)
27. Exploring Consumer Shifts in Semiconductor Liquid Filters Market 2025-2033 [Electronic resource]. Data Insights Market. URL: <https://www.datainsightsmarket.com/reports/semiconductor-liquid-filters-1660691> (date of access: 02.01.2025)
28. Filtration characteristics of CMP slurries [Electronic resource]. Entegris. URL: <https://www.entegris.com/content/dam/web/resources/application-notes/appnote-filtration-characteristics-of-cmp-slurries-7590.pdf> (date of access: 02.01.2025)
29. Filtration Total Cost of Ownership – What you need to know. [Electronic resource]. Midwest Air Filter. URL: <https://www.midwestairfilter.com/blogs/articles/filtration-total-cost-of-ownership-what-you-need-to-know> (date of access: 02.01.2025)
30. Food Processes with Ceramic Membranes [Electronic resource]. Messinger Engineering. URL: https://www.messinger.engineering/keramik_lebensmittel.php (date of access: 02.01.2025)
31. Foorginezhad S., Zerafat M.M., Ismail A.F., Gohc P.S. Emerging membrane technologies for sustain-able water treatment [Electronic resource]. *Environ. Sci.: Adv.* 2025. No. 4. P. 530 – 570 URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2025/va/d4va00378k> (date of access: 02.01.2025)
32. Gulyakin I.D., Nikolaeva L.L., Sanarova E.V., Lantsova A.V., Oborotova N.A. Use of Membrane Filters in Production Technology for Sterile Drugs [Electronic resource]. *Pharmaceutical Chemistry Journal*. 2016. T. 50. No. 1. P. 33 – 37. doi: 10.1007/s11094-016-1394-1
33. Gutiérrez-Docio A., Ruiz-Rodríguez A., Prodanov M. Clarification of olive juice by α -alumina micro-filtration membranes with enhanced packing density [Electronic resource]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2025. Vol. 102. P. 104031. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2025.104031> (date of access: 02.01.2025)
34. Hang F., Xu H., Xie C., Li K., Wen T., Meng L. Pretreatment of Glucose-Fructose Syrup with Ceramic Membrane Ultrafiltration Coupled with Activated Carbon [Electronic resource]. *Membranes (Basel)*. 2024. Vol. 23. No. 3. P. 57. doi: 10.3390/membranes14030057. PMID: 38535276; PMCID: PMC10972182. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10972182/> (date of access: 02.01.2025)

35. High Temperature Filtration Solutions: A Comprehensive Guide for Industrial Applications [Electronic resource]. Griffin Filters. URL: <https://griffinfilters.com/blogs/news/high-temperature-filtration-solutions-a-comprehensive-guide-for-industrial-applications> (date of access: 02.01.2025)
36. High-Quality AAO Filters at the Price of Standard Polymer Filters! [Electronic resource]. Anodic Aluminum Oxide Membrane. URL: <https://aaomembrane.com/product/> (date of access: 02.01.2025)
37. How to Extend Liquid Chromatography Column Life: R date of access: egenerate or Use Guard Columns [Electronic resource]. Sigma-Aldrich. URL: <https://www.sigmaaldrich.com/US/en/technical-documents/technical-article/analytical-chemistry/small-molecule-hplc/how-to-extend-liquid-chromatography-column-life> (date of access: 02.01.2025)
38. How to Extend the Lifetime of HPLC Columns? [Electronic resource]. Phenomenex. URL: <https://www.phenomenex.com/knowledge-center/hplc-knowledge-center/how-to-extend-the-lifetime-hplc-columns> (date of access: 02.01.2025)
39. Itaya K., Sugawara S., Arai K., Sait S. Properties of porous anodic aluminum oxide films as membranes [Electronic resource]. J. Chem. Eng. Japan. 1984. Vol. 17. No. 5. P. 514 – 520. J-Stage. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jcej1968/17/5/17_5_514/article (date of access: 02.01.2025)
40. Jarvis P., Carra I., Jafari M., Judd S.J. Ceramic vs polymeric membrane implementation for potable water treatment [Electronic resource]. Water Res. 2022. Vol. 15.-P.118269. doi: 10.1016/j.watres.2022.118269. Epub 2022 Mar 8. PMID: 35298992. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35298992/> (date of access: 02.01.2025)
41. Jarvis P., Carra I., Jafari M., Judd S.J. Development of a Techno-Economic Model to Compare Ceramic and Polymeric Membranes [Electronic resource]. Water Research. 2022. Vol. 215. ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/254359000_Development_of_a_Techno-Economic_Model_to_Compare_Ceramic_and_Polymeric_Membranes (date of access: 02.01.2025)
42. Kang G.-S., Baek Y., Yoo J.-B. Relationship between surface hydrophobicity and flux for membrane separation [Electronic resource]. RSC Adv. 2020. Vol. 10. P. 40043 – 40046. RSC Publishing. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2020/ra/d0ra07262a> (date of access: 01.02.2025)
43. Kehrein P., Jafaria M., Slagtb M., Emile Cornelissenc E., Osseweijera P., John Posadaa J., van Loosdrechta M. A techno-economic analysis of membrane-based advanced treatment processes for the re-use of municipal wastewater [Electronic resource]. Water Reuse. 2021. Vol. 11. No. 4. P. 705 – 725. URL: [https://api.kwrwater.nl/uploads/2022/01/Kehrein-A-techno-economic-analysis-of-membrane-based-advanced-treatment-processes-for-the-reuse-of-municipal-Water-Reuse-11\(2021\)4-705.pdf](https://api.kwrwater.nl/uploads/2022/01/Kehrein-A-techno-economic-analysis-of-membrane-based-advanced-treatment-processes-for-the-reuse-of-municipal-Water-Reuse-11(2021)4-705.pdf) (accessed: 02.01.2025)
44. Kotobuki M., Gu Q., Zhang L., Wang J. Ceramic-Polymer Composite Membranes for Water and Wastewater Treatment: Bridging the Big Gap between Ceramics and Polymers [Electronic resource]. Molecules. 2021. Vol. 26 (11). P. 3331. doi: 10.3390/molecules26113331. PMID: 34206052; PMCID: PMC8198361 (date of access: 01.02.2025)
45. Ku C.-A., Yu C.-Y., Hung C.-W., Chung C.-K. Advances in the Fabrication of Nanoporous Anodic Aluminum Oxide and Its Applications to Sensors: A Review [Electronic resource]. Nanomaterials (Basel). 2023. Vol. 13 (22) URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10650129/> (date of access: 01.02.2025)
46. Lee L.R., Fan P.H., Chen Y.F., Chang M.H., Liu Y.C., Chang C.C., Chen J.T. Structurally Defined Amphiphilic AAO Membranes Using UV-Assisted Thiol-Yne Chemistry: Applications in Anti-Counterfeiting and Electronics [Electronic resource]. ACS Appl Mater Interfaces. 2024. Vol. 16 (36). P. 48073 – 48084. doi: 10.1021/acsami.4c09040. Epub 2024 Aug 27. PMID: 39189834; PMCID: PMC11403548. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11403548/> (date of access: 02.01.2025)
47. Lin Y.-C., Lee L.-R., Liu Y.-C., Gautam B., Ho J.-H., Tsai T.-H., Lin J., Zheng Y.-H., Chen J.-T. Advancing Nanopore Technology: Anodic Aluminum Oxide [Electronic resource]. ACS Appl. Nano Mater. 2024. Vol. 7. P. 14707 – 14718 [Electronic resource]. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsanm.4c02257> (date of access: 01.02.2025)
48. Liu L., Ayupova T., Umrao S., Akin L.D., Lee H.K., Tibbs J., Wang X., Demirci U., Cunningham B.T. A biosensor-integrated filtration device for nanoparticle isolation and label-free imaging [Electronic resource]. Lab Chip. 2025. Vol. 25 (8). P. 2073 – 2084. doi: 10.1039/d5lc00089k. PMID: 40105290; PMCID: PMC11921766. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11921766/> (date of access: 01.02.2025)
49. Manzoor S., Ashraf M.W., Tayyaba S., Tariq M.I., Hossain M.K., Recent Progress of Fabrication, Characterization, and Applications of Anodic Aluminum Oxide (AAO) Membrane: A Review [Electronic resource]. CMES – Computer Modeling in Engineering and Sciences. 2022. Vol. 135. No. 2. P. 1007 – 1052. <https://doi.org/10.32604/cmcs.2022.022093>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526149222003113>

50. McQuaig M.K., Toro A., Van Geertruyden W., Wojciech Z. Misiolek The effect of high temperature heat treatment on the structure and properties of anodic aluminum oxide [Electronic resource]. *J Mater Sci.* 2011. 46. P. 243 – 253 <https://doi.org/10.1007/s10853-010-4966-6> (date of access: 02.01.2025)
51. Membrane technology [Electronic resource]. VITO. URL: <https://vito.be/en/applications/membrane-technology> (accessed: 02.01.2025)
52. Mijangos C., Martin J. Polymerization within Nanoporous Anodized Alumina Oxide Templates (AAO): A Critical Survey [Electronic resource] // *Polymers (Basel)*. 2023. Vol. 15 (3). P. 525. doi: 10.3390/polym15030525. PMID: 36771824; PMCID: PMC9919978. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9919978/> (date of access: 02.01.2025)
53. Moaness M., El-Sayed S.A.M., Beherei H.H., Mabrouk M. Enhancing the Antifouling Properties of Alumina Nanoporous Membranes by GO/MOF Impregnated Polymer Coatings: In Vitro Studies [Electronic resource]. *Journal of Functional Biomaterials*. 2024. Vol. 15(3). P. 50. <https://doi.org/10.3390/jfb15030050> URL: <https://www.mdpi.com/2079-4983/15/3/50> (date of access: 01.02.2025)
54. Nguyen D.T., Lee S., Lopez K.P., Lee J., Straub A.P. Pressure-driven distillation using air-trapping membranes for fast and selective water purification [Electronic resource]. *Science. Advance*. 2023. Vol. 9. DOI:10.1126/sciadv.adg6638
55. Niazi F.K., Umer M.A., Ahmed A., Hafeez M.A., Khan Z., Butt M.S., Razzaq A., Luo X., Park Y.-K. Nanoporous Alumina Membranes for the Sugar Industry: An Investigation of Sintering Parameters Influence on Ultrafiltration Performance [Electronic resource]. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. P. 7593. <https://doi.org/10.3390/su13147593> (date of access: 01.02.2025)
56. Oh J., Myoung J., Bae J. S., Lim S. Etch behavior of ALD Al₂O₃ on HfSiO and HfSiON stacks in acidic and basic etchants [Electronic resource]. *Journal of the Electrochemical Society*. 2011. Vol. 158(4). P. 217 – 222. <https://doi.org/10.1149/1.3554729>
57. Oro C.E.D., Puton B.M.S., Venquiaruto L.D., Dallago R.M., Arend G.D., Tres M.V. The Role of Membranes in Modern Winemaking: From Clarification to Dealcoholization [Electronic resource]. *Membranes (Basel)*. 2025. Vol. 15(1). P. 14. doi: 10.3390/membranes15010014. PMID: 39852255; PMCID: PMC11766575
58. Patel Y., Janusas G., Palevicius A., Vilkauskas A. Development of Nanoporous AAO Membrane for Nano Filtration Using the Acoustophoresis Method [Electronic resource]. *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10. No. 14. P. 4941. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7412301/> (date of access: 02.01.2025)
59. Polymeric and Inorganic Membrane Disc Filters [Electronic resource]. Sterlitech. URL: <https://www.sterlitech.com/membrane-disc-filters.html> (date of access: 02.01.2025)
60. Pulido B., Chisca S., Nunes S.P. Solvent and thermal resistant ultrafiltration membranes from alkyne-functionalized high-performance polymers [Electronic resource]. *Journal of Membrane Science*. 2018. Mshchd T. 564. P. 361 – 371. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.07.025> (date of access: 17.07.2025)
61. Qasim F., Ashraf M.W., Tayyaba S., Tariq M.I., Herrera-May A.L., Simulation, Fabrication and Microfiltration Using Dual Anodic Aluminum Oxide Membrane [Electronic resource]. *Membranes*. 2023. Vol. 13. P. 825. <https://doi.org/10.3390/membranes13100825> URL: <https://www.mdpi.com/2077-0375/13/10/825> (date of access: 01.02.2025)
62. Ranieri G., Mazzei R., Wu Z., Li K., Giorno L. Use of a Ceramic Membrane to Improve the Performance of Two-Separate-Phase Biocatalytic Membrane Reactor [Electronic resource]. *Molecules*. 2016. Mar 14. No. 21 (3). P. 345. doi: 10.3390/molecules21030345. PMID: 26985887; PMCID: PMC6274081. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26985887/> (date of access: 02.01.2025)
63. Robatjazi H., Macfarlan L.H., Shah Bahauddin M., Fu S. Ultrathin AAO Membrane as a Generic Template for Sub-100 nm Nanostructure Fabrication [Electronic resource]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. Vol. 28. No. 13. P. 4546 – 4553. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b00722> (date of access: 02.01.2025)
64. Shao L., Huang X., Teschner D., Zhang W. Gold Supported on Graphene Oxide: An Active and Selective Catalyst for Phenylacetylene Hydrogenations at Low Temperatures [Electronic resource]. *ACS Catal.* 2014. Vol. 4. No. 7. P. 2369 – 2373 ResearchGate. URL: https://www.researchgate.net/publication/263938962_Gold_Supported_on_Graphene_Oxide_An_Active_and_Selective_Catalyst_for_Phenylacetylene_Hydrogenations_at_Low_Temperatures (date of access: 02.01.2025)

65. Shim S. Design, construction and evaluation of an experimental ceramic membrane facility with investigation into fouling control [Electronic resource]. Figshare. URL: https://figshare.com/articles/thesis/Design_construction_and_evaluation_OFAN_experimental_ceramic_membrane_facility_with_investigation_into_fouling_control/14648892/1 (Accessed: 02.01.2025) (Note: Dissertation abstract).
66. Smart Drug Delivery System [Electronic resource]. URL: <https://scispace.com/pdf/smart-drug-delivery-system-1a61u83vmz.pdf> (date of access: 02.01.2025)
67. The Differences Between Membrane and Depth Filters in Microfiltration [Electronic resource]. PoreFiltration. URL: <https://www.porefiltration.co.uk/resources/articles/the-differences-between-membrane-and-depth-filters-in-microfiltration> (date of access: 02.01.2025)
68. The Future of Microelectronics Wastewater Treatment: Challenges and Innovations [Electronic resource]. Veolia Water Technologies UK Blog. URL: <https://blog.veoliawatertechnologies.co.uk/the-future-of-microelectronics-wastewater-treatment-challenges-and-innovations-1> (accessed: 02.01.2025)
69. Tian M., Yang C., Huang Q., Wang R., Su X., Xu P., Peng T. Synthesis and Evaluation of High-Temperature-Resistant and Environmentally Friendly Polymer Filter Loss Additives [Electronic resource]. Polymers. 2025. Vol. 17. No. 6. P. 792. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/17/6/792> (accessed: 02.01.2025)
70. Understanding Depth Filters [Electronic resource]. PoreFiltration. URL: <https://www.porefiltration.co.uk/resources/articles/understanding-depth-filters> (accessed: 02.01.2025)
71. US5518624A – Ultra pure water filtration [Electronic resource]. Google Patents. URL: <https://patents.google.com/patent/US5518624A/en> (date of access: 02.01.2025)
72. Valappil R.S.K., Ghasem N., Al-Marzouqi M. Current and future trends in polymer membrane-based gas separation technology: A comprehensive review [Electronic resource]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry. 2021. Vol. 98. P. 103 – 129. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.03.030> (date of access: 02.01.2025)
73. Wei T., Chen X., Guo Z. Ceramic membrane composites for highly efficient oil–water separation: a review [Electronic resource]. J. Mater. Chem. A. 2024. Vol. 12. P. 20803 – 20837. URL: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2024/ta/d4ta04208e> (date of access: 02.01.2025)
74. Westermann T., Melin T. Flow-through catalytic membrane reactors – Principles and applications [Electronic resource]. Chemical Engineering & Processing: Process Intensification. 2009. Vol. 48. No. 1. P. 17 – 28. https://www.researchgate.net/publication/223363267_Flow-through_catalytic_membrane_reactors-Principles_and_applications (date of access: 02.01.2025)
75. Why Use Ceramic Membranes [Electronic resource]. LiqTech. URL: <https://liqtech.com/filters/silicon-carbide-membranes/why-use-ceramic-membranes/> (date of access: 02.01.2025)
76. Xu B., Gao W., Liao B., Bai H., Qiao Y., Turek W. A Review of Temperature Effects on Membrane Filtration [Electronic resource]. Membranes (Basel). 2024. Vol. 14 (1). P. 23. [Electronic resource] URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10819527/> (date of access: 02.01.2025)

Информация об авторах

Похотько А.Г., кандидат медицинских наук, доцент, Кубанский государственный медицинский университет Минздрава России, pokhotko@mail.ru

Бабичев С.А., кандидат медицинских наук, заведующий кафедрой Микробиологии, Кубанский государственный медицинский университет Минздрава России

Мелконян К.И., кандидат медицинских наук, доцент, Кубанский государственный медицинский университет Минздрава России

Захарченко И.С., кандидат биологических наук, доцент, Кубанский государственный медицинский университет Минздрава России

Тарасов И.А., учредитель, ООО «АПТ ТЕХ КЕРАМИК», г. Славянск-на-Кубани

© Похотько А.Г., Бабичев С.А., Мелконян К.И., Захарченко И.С., Тарасов И.А., 2025

About the Authors

Pokhotko A.G., MD, PhD, Associate Professor, Kuban State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation, pokhotko@mail.ru

Babichev S.A., MD, PhD, Head of the Microbiology Department, Kuban State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation

Melkonyan K.I., MD, PhD, Associate Professor, Kuban State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation

Zakharchenko I.S., MD, PhD, Associate Professor, Kuban State Medical University, Ministry of Health of the Russian Federation

Tarasov I.A., Founder, ART TECH CERAMICS LLC, Slavyansk-on-Kuban

© Pokhotko A.G., Babichev S.A., Melkonyan K.I., Zakharchenko I.S., Tarasov I.A., 2025