

НАУЧНЫЙ ОБЗОР

УДК 628.16

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ВОДЫ
МЕМБРАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЕЙ**

Бурак Л.Ч., Писарик М.И.

ООО «Белросаква», Минск, e-mail: leonidburak@gmail.com, m@belrosakva.by

Рост мирового спроса на питьевую воду способствует поиску эффективных способов и методов очистки. Воздействие антропогенных факторов является причиной того, что источники питьевой воды все чаще подвергаются различным видам загрязнения. В общественных системах питьевой воды используются различные методы очистки для обеспечения населения безопасной и качественной питьевой водой. Однако они не всегда эффективны по удалению всех загрязняющих веществ, которые считаются опасными для окружающей среды и, следовательно, для человека. В качестве наиболее эффективного способа очистки предложено несколько альтернативных процессов очистки, таких как мембранная фильтрация. Цель представленной работы – научный обзор соединений – загрязнителей питьевой воды, процессов фильтрации и мембран, наиболее изученных и применяемых в процессе очистки воды. Методы исследования – аналитический, обзорный, индукция, анализ научных публикаций. Тип полимера определяет физико-химические характеристики и рабочие характеристики мембран. Поэтому выбор полимера должен основываться на целевом применении. Тонкопленочные композитные (TFC) мембраны имеют лучшую удаляющую способность, чем обычные мембраны, хотя и работают при более высоких рабочих давлениях, что ограничивает их использование.

Ключевые слова: вода, загрязняющие вещества, водоподготовка, мембраны, мембранное разделение, полимерная добавка, наноматериалы

EFFICIENCY OF WATER PURIFICATION BY MEMBRANE FILTRATION

Burak L.Ch., Pisarik M.I.

LLC Belrosakva, Minsk, e-mail: leonidburak@gmail.com, m@belrosakva.by

The growing global demand for drinking water contributes to the search for effective ways and methods of purification. The impact of anthropogenic factors is the reason that sources of drinking water are increasingly exposed to various types of pollution. Public drinking water systems use a variety of treatment methods to provide the public with safe and quality drinking water. However, they are not always effective in removing all contaminants that are considered hazardous to the environment and therefore to humans. Several alternative purification processes, such as membrane filtration, have been proposed as the most efficient purification method. The purpose of the presented work is a scientific review of drinking water pollutant compounds, filtration processes and membranes, the most studied and used in the process of water purification. Research methods – analytical, review, induction, analysis of scientific publications. The type of polymer determines the physicochemical characteristics and performance of the membranes. Therefore, the choice of polymer should be based on the intended application. Thin Film Composite (TFC) membranes have better removal capacity than conventional membranes, although they operate at higher operating pressures, which limits their use.

Keywords: water, pollutants, water treatment, membranes, membrane separation, nanomaterials, polymer additive

Общеизвестно, что питьевая вода – это вода, предназначенная для ежедневного неограниченного и безопасного потребления живыми существами. Необходимость воды в биологических процессах делает ее таким важным источником для жизни человека, которому постоянно угрожают изменения климата и ежедневные источники загрязнения. Ожидается, что глобальное потепление, которому мы способствуем, повлияет на выброс загрязняющих веществ из-за изменений растворимости, кинетики растворения, образования загрязняющей газовой фазы, сорбционного равновесия, биологического разложения и мобилизации жидкости неводной фазы. Антропогенная деятельность в значительной степени способствовала ухудшению качества воды, затронув реки, озера и океаны по всему миру, ухудшив не только окружающую среду, но и здоровье человека и сообщества живых существ,

которые от него зависят. Присутствие органических и неорганических загрязнителей в водных ресурсах, которые являются причиной заболеваний, способствует поиску более эффективных процессов очистки для обеспечения населению мира доступа к безопасной питьевой воде [1].

Обычные методы очистки, используемые на станциях очистки воды, включают осветление, окисление, аэрацию, фильтрацию и дезинфекцию. Такие факторы, как низкая летучесть, гидрофобные характеристики, размер, форма, заряд и незначительные концентрации, могут быть причиной неэффективного удаления загрязняющих веществ [2, 3]. Хотя физико-химические методы удаления загрязняющих веществ на станциях водоочистки хорошо изучены, они имеют недостатки, а именно: (а) высокие затраты на энергию, (б) большие капиталовложения в эксплуатацию и техническое обслужива-

ние, (в) образование токсичных отходов, (г) добавление токсичных химических веществ и низкая эффективность разложения органических загрязнителей. Поэтому такие способы, как ионный обмен, электрохимическое, химическое осаждение, усовершенствованные процессы окисления (УПО) и мембранное разделение, являются наиболее эффективными альтернативами по удалению токсичных соединений из воды. Особый интерес представляют процессы мембранного разделения. Высокая скорость удаления низкомолекулярных загрязнителей, возможность интеграции с другими системами позволяет считать мембранное разделение наиболее предпочтительным методом использования [3].

Мембраны, обычно используемые в процессах фильтрации, можно разделить на обычные мембраны и промышленные композитные тонкопленочные (ТПП) мембраны, в которых тонкий активный слой полиамида (ПА) (< 200 нм), полученный межфазной полимеризацией, наносится на пористый слой полиэфирсульфона (ПЭС) или полисульфона (ПСУ) (около 50 мкм) [4]. Для процесса мембранной фильтрации требуется наличие одного из таких параметров, как давление, концентрация или электрический потенциал, с целью разделения необходимых компонентов, которые определяются размером пор мембраны. Процессы фильтрации, проводимые с использованием давления, классифицируются на микрофильтрацию (MF), ультрафильтрацию (UF), нанофильтрацию (NF), обратный осмос (RO) и прямой осмос (FO) [5]. Процессы MF основаны на использовании мембран с симметричной пористой структурой, позволяющих разделять частицы со средним размером более 0,1 мкм и варьировать рабочее давление от 1 до 3 атм. UF-мембраны имеют диаметр пор от 0,01 до 0,1 мкм при несколько более высоких рабочих давлениях (от 2 до 7 атм); оба часто используются в качестве этапа предварительной обработки для удаления коллоидов и природных органических веществ. NF имеет гораздо более низкое пороговое значение молекулярной массы при среднем диаметре пор от 1 до 10 нм. NF используется для удаления двухвалентных солей и других небольших молекул, таких как PhAC, и новых микрозагрязнителей. Обратный осмос (ОО) представлен как наиболее эффективный процесс удаления растворенных неорганических и небольших органических молекул. Однако поры наименьшего размера (от 0,1 до практически 0). Это является основным недостатком, так как про-

цесс фильтрации связан с гораздо большими энергозатратами.

В процессе разработки различных видов мембран были исследованы новые наноматериалы, эффективность которых установлена во многих процессах, включая очистку воды. Свойства мембран (большая удельная площадь поверхности и высокая реакционная способность), наряду с другим возможным применением, способствовали использованию их в качестве адсорбентов, катализаторов и сенсоров [6]. Таким образом, последние разработки в области наноматериалов и нанотехнологий позволили создать новые поколения искусственных мембран для очистки воды с новыми функциями и улучшенными свойствами молекулярного разделения. Эти мембраны на основе наноматериалов, которые включают в себя наночастицы, нановолокна, двумерные слоистые материалы и другие наноструктурированные соединения, обладают эффективными свойствами проникновения, а также дополнительными свойствами (противообрастающими, антибактериальными, фоторазлагаемыми и т.д.) [7]. Поэтому об интересе мирового научного сообщества к разработке такого типа мембран свидетельствует количество научных публикаций за последние 10 лет – более 53000 публикаций в период с 2010 по 2021 г.) [8].

Основываясь на структуре мембраны и способе диспергирования наноматериала, различные типы мембран с отличительными характеристиками проницаемости называют: обычные наноструктурированные, тонкопленочные наноструктурированные (TFN) и с локализованным поверхностным нанокомпозитом [9]. В обычных наноструктурных мембранах наноматериалы включаются в полимерную матрицу в процессе инверсии фаз, но эти мембраны имеют низкую устойчивость к высоким температурам, агрессивным средам и органическим растворителям [10]. В последние десятилетия шитый полиамид, полученный межфазной полимеризацией, и мембраны TFC, полученные из него, заменили обычные мембраны, добившись улучшения характеристик разделения и проницаемости. Мембраны TFN представляют собой развивающийся класс мембран TFC и производят их путем включения наночастиц в тонкий полиамидный слой для изменения свойств поверхности, что приводит к получению наноструктурированных материалов со значительным улучшением характеристик [11]. Насколько нам известно, нет систематизированного обзора преимуществ и недостатков применения этих мембран для удаления обычных

и возможных к попаданию в воду. Таким образом, цель данной статьи – анализ эффективности использования мембран в процессах фильтрации, применяемых в настоящее время для очистки воды, загрязненной микроорганизмами, ионами токсичных металлов, красителями, а также органическими и неорганическими соединениями.

Процессы мембранного разделения

Мембранная технология охватывает научные и инженерные подходы, связанные с переносом или отторжением компонентов, видов или веществ через мембраны или с их помощью. Данная технология широко применяется при очистке воды для бытового и промышленного водоснабжения, в химической, биотехнологической, фармацевтической, пищевой, металлургической промышленности, а также в других процессах разделения. Промышленные применения обширны, поскольку мембранное разделение является технологией с пониженным потреблением энергии и заменяет традиционные процессы, такие как фильтрация, дистилляция, ионный обмен и системы химической обработки. Кроме того, данный процесс обеспечивает непрерывное разделение, а свойства мембраны можно регулировать в соответствии с необходимым результатом. Однако у этой технологии есть некоторые недостатки, такие как концентрационная поляризация и засорение мембраны, низкий срок службы мембраны, низкая селективность и поток. Но этого можно избежать или минимизировать, подбирая различные типы мембран [12, 13].

Мембраны обычно классифицируются как изотропные или анизотропные. Изотропные мембраны однородны по составу и физической природе по всему сечению мембраны. Анизотропные мембраны неоднородны по сечению мембраны и обычно состоят из слоев, различающихся по структуре и/или химическому составу. Природа сырья (органическое или неорганическое) и желаемая морфология (плотная или пористая) влияют на выбор метода подготовки мембран. Универсальным методом, позволяющим получать все виды полимерных мембран, является инверсия фаз [14]. Метод инверсии фаз представляет собой процесс, при котором стабильный полимерный раствор переходит из жидкого состояния в твердое за несколько миллисекунд с учетом важных термодинамических и кинетических аспектов. Наиболее широко используемым методом изготовления мембран с инверсией фазы является иммерсионное осаждение, также известное как фазовое разделение, не индуцированное растворителем (NIPS)

[15]. Мембраны, сформированные с помощью этого процесса, часто имеют конфигурацию плоского листа или полого волокна. Полимер, растворенный в растворителе (полимерный раствор), отливается на соответствующий поддерживающий слой (например, кремниевая пластина) для конфигурации плоского листа или нагнетается фильерой с одним отверстием для полых волокон. Скорость обмена между растворителем, содержащимся в отлитой пленке, и нерастворителем, присутствующим в коагуляционной ванне, определяет морфологию мембраны. Для повышения селективности и эффективности удаления загрязняющих веществ в процессе фильтрации были выбраны различные специфические наноматериалы, обеспечивающие, среди прочего, более высокую способность к удалению, антимикробную и фотокаталитическую активность, улучшенную гидрофильность и механическую стойкость [16, 17].

1. Удаление фармацевтического соединения

Широкое использование фармацевтических активных соединений (PhAC) людьми и животными приводит к загрязнению водной среды с серьезными последствиями для здоровья человека. В нескольких исследованиях сообщалось о разработке новых целевых стратегий удаления этих соединений из воды с помощью мембранной фильтрации [18–20]. Однако этот процесс очистки достаточно сложен, так как его эффективность определяется физико-химическими свойствами PhAC, pH растворов, составом мембраны, взаимодействием растворенного вещества и мембраны, а также одновременным присутствием нескольких химических родственных соединений.

Мембранные процессы для регенерации или повторного использования сточных вод и очистки питьевой воды были оценены для удаления PhAC микрофильтрацией (MF), нанофильтрацией (NF), ультрафильтрацией (UF) и обратным осмосом (RO) и комбинациями мембран последовательно. MF и UF имеют ограниченное применение для удаления PhAC, в водных средах из-за более высокого предела молекулярной массы (MWCO) мембраны по сравнению с молекулярной массой (MW) большинства PhAC (150–500 г/моль) [21]. NF и RO имеют гораздо более низкую MWCO, что позволяет сильно отбраковывать PhAC. Разделение NF и RO было описано как наиболее эффективные процессы удаления PhAC [5]. Согласно литературным данным, микрофильтрация и ультрафильтрация, как правило, не совсем эффективны для удаления PhAC [3]. Например, использование на-

нофильтрационной мембраны из полиэфирсульфона (ПЭС), полученной методом инверсии фаз, показало неполную эффективность при удалении карбамазепина, диклофенака и ибупрофена из питьевой воды. Установлено, что общее удаление составило примерно 31–39 и 55–61% для нейтральных (карбамазепин) и ионных (диклофенак и ибупрофен) PhAC соответственно. Учитывая, что диклофенак и ибупрофен заряжены отрицательно, в условиях эксперимента электростатическое отталкивание способствовало лучшему отторжению, полученному для этих PhAC, по сравнению с карбамазепином.

Эффективность удаления PhAC мембранами TFC также изучалась путем включения наночастиц в или под мембрану из полиамидного слоя [22, 23]. Эта мембрана имела аналогичную эффективность отторжения отрицательно заряженных PhAC (> 90%) по сравнению с мембранами TFC.

Структура поверхностного слоя мембран, модифицированных добавками и наноразмерными частицами, была улучшена в отношении как проницаемости, так и профиля отторжения, механической прочности, жесткости, противообрастающих характеристик основного полимера и особенно селективности по отношению к определенным соединениям [24–26]. Повышение водопроницаемости и отталкивания для большинства испытанных PhAC было достигнуто за счет более высокой эффективности порообразования, улучшенной смачиваемости и значительного увеличения активной поверхности. Хотя признано, что нанонаука и нанотехнологии открывают прекрасные возможности для разработки инновационных методов очистки воды, информация о модификации мембран наноматериалами и их эффективности в удалении PhAC из водной среды все еще недостаточна.

Ученые синтезировали обычные наноструктурированные UF-мембраны, используя PSU в качестве мембранной матрицы, метилцеллюлозу (MC) в качестве порообразователя и коммерческий порошокобразный активированный уголь (PAC) в качестве адсорбирующего наноматериала. Добавление активированного угля в матрицу мембраны улучшило удаление PhAC на 34 и 6% для ацетаминофена и диклофенака соответственно по сравнению с обычными мембранами без наноматериалов. По мнению авторов, углерод-полимерные мембраны могут удалять следовые количества фармацевтических препаратов из воды за счет гибридного процесса, сочетающего фильтрацию и адсорбцию. Однако для аналогичной

молекулярной массы диклофенака (50,4%) были получены разные скорости удаления [25]. Эти результаты показывают, как наноматериалы можно использовать для изменения характеристик мембраны.

Совсем недавно Zhou et al. [27] использовали TiO_2 с целью модификации ультрафильтрационной мембраны PVDF для удаления сульфадиазина из воды. Результаты показали высокую способность удаления около 91,4%. Авторы связывают эту высокую скорость удаления с фотодегградацией сульфадиазина, которая является результатом фотокаталитической активности TiO_2 .

Недавно сообщалось, что MOFs использовались в процессах ультрафильтрации, называемых гибридными системами MOF-UF, для достижения лучших результатов. Эта комбинация обеспечивает более высокую скорость удержания по сравнению с обычной UF. Эти исследования подтверждают высокую эффективность MOF в качестве адсорбирующего материала, что делает их подходящей альтернативой для повышения эффективности процессов мембранной фильтрации при удалении PhAC [28, 29].

2. Удаление пестицидов

Пестициды являются потенциальными загрязнителями источников питьевой воды, поскольку они наносятся на сельскохозяйственные угодья, сады и газоны и могут попадать в подземные или поверхностные водные системы. Процессы мембранной фильтрации также рассматривались для удаления этих типов загрязняющих веществ, хотя и в меньшей степени, чем PhAC. В данном случае использование наноматериалов было ограничено только изготовлением ультрафильтрационных мембран, включающих в качестве добавки новый сшитый полимер β -циклодекстрина (β -CDP) с иерархической микро-мезопористой структурой и большой площадью поверхности [30]. По мнению авторов, высокая эффективность удаления 2,4-дихлорфенола связана с синергетическим эффектом микропор и мезопор включенного β -CDP. Нанофильтрационные мембраны также применяют для удаления пестицидов из воды [31]. Как и в случае с PhAC, исследования показывают, что процент удаления зависит от молекулярной массы, молекулярной ширины и гидрофобности пестицида. В целом самая высокая средняя эффективность удаления была у стойких хлорорганических инсектицидов (93%), включая эндосульфат (100%), ДДТ (95%) и ГХЦГ (92%). Эти результаты показывают корреляцию между отклонением (%) пестицидов с их $\log P$ и молекулярной массой, согласно Mukherjee et al. [31].

Сильно гидрофобные пестициды ($\log P > 4,5$), такие как ДДТ, бифентрин, альдрин, перметрин, α -циперметрин, этион, дифенокназол, α -эндосульфат, хлорпирифос и бутахлор, показали высокие показатели удаления (80–100%), тогда как менее гидрофобные, такие как диметоат ($\log P = 0,7$) и тиаметоксам ($\log P = -0,13$), показали более низкие удаления (< 80%); примечательно, что для монокротофоса наблюдалось низкое отклонение (38%) ($\log P = -0,22$).

3. Удаление микроорганизмов

Удаление или инактивация бактерий из питьевой воды очень важна для здоровья и благополучия населения. Многие станции очистки воды используют химические вещества для уничтожения или инактивации бактерий, но их также можно физически удалить с помощью мембранной фильтрации. Однако процессы MF и UF не способны обеспечить полное удаление всех микроорганизмов. Для более эффективного удаления некоторые авторы предлагают встраивать в мембраны антимикробные наночастицы [32], в частности частицы оксида серебра, из-за сильной бактерицидной активности этого материала. При покрытии поверхности микрофильтрационной мембраны РА оксидом серебра (AgO) ученые Kasprzyńska-Gońska et al. [32] наблюдали полную элиминацию грамотрицательных (*Escherichia coli*) и грамположительных бактерий (*Bacillus subtilis*) из воды. По мнению авторов, сильные антибактериальные свойства мембран, модифицированных AgO, могут быть связаны с высвобождением ионов серебра и их способностью закрепляться и проникать во внешние структуры бактерий, вызывая нарушение проницаемости клеточных мембран, что приводит к гибели микроорганизмов. Образование свободных радикалов также является одним из аргументов, объясняющих гибель клеток в результате выщелачивания наночастиц оксида серебра. Присутствие наноматериала повышает эффективность мембраны, предотвращая адгезию бактерий к поверхности мембраны и уменьшая образование биопленки. По их мнению, взаимодействие катиона серебра с тиоловыми группами и образование S-Ag-связей или дисульфидных связей может разрушать бактериальные и вирусные белки, прерывая электрон-транспортную цепь и взаимодействуя с ДНК. Было предложено модифицировать мембраны с помощью $\text{TiO}_2 + \text{AgO}$ для улучшения фотокаталитического эффекта в видимой области [32]. Степень удаления 100% была достигнута, так как обе наночастицы использовались и были связаны с технологией магне-

тронного распыления, что помогло создать новые структурные свойства в полимерных мембранах.

4. Удаление тяжелых металлов

Основная опасность тяжелых металлов для здоровья человека связана с воздействием свинца, кадмия, ртути и мышьяка. Эти неорганические загрязнители попадают в воду, почву и в атмосферу из-за развивающегося сельского хозяйства и металлургической промышленности, неправильной утилизации отходов, удобрений и пестицидов. Использование мембран для фильтрации также применяли в качестве процесса очистки от этих типов загрязняющих веществ, в основном UF и NF. Подобно микроорганизмам, механизм удаления, по видимому, недостаточен для эффективного удаления тяжелых металлов из воды и даже показывает низкую скорость удаления (от 10 до 35%). Установлено, что промышленные мембраны TFC и обычные мембраны, содержащие некоторые наноматериалы, могут повысить эффективность удаления. Полиамидные мембраны для нанофильтрации TFC обеспечивают высокое удаление металлов из воды на уровне > 95% [33]. Авторы показали, что процент удерживания металлов в основном зависит от pH, поскольку свойство заряда материала поверхности мембраны изменяется с pH. Эти результаты подтверждают возможность применения таких мембран для удаления металлов от сточных вод.

Установлено, что наноматериалы на основе углерода могут избирательно удалять ионы тяжелых металлов из источников воды. Углеродные нанотрубки увеличивают удаление тяжелых металлов, так как улучшают адсорбционную способность мембран и уменьшают размер пор в диапазоне от 20 до 30 нм.

Наночастицы оксидов металлов представляют собой еще одну группу эффективных наноматериалов с большой площадью поверхности, высокой адсорбционной способностью и селективностью. Различные наночастицы оксидов металлов сравнивались в отношении удаления меди с использованием мембран PES [34]. Присутствие наночастиц Al_2O_3 в исходных мембранах улучшает скорость удаления с 25 до 60%, в отличие от использования Fe_3O_4 , которая увеличивает только 5%. Чтобы улучшить полученные результаты, Ghaemi et al. [34] покрыли и функционализировали наночастицы Fe_3O_4 более гидрофильными материалами, такими как диоксид кремния, диоксид кремния, модифицированный метформином, и диоксид кремния, моди-

фицированный амином, которые обеспечивают лучшую дисперсию наночастиц в мембране. Эта стратегия способствует лучшему удалению Cu (II) с приемлемым уровнем проницаемости, так как Fe_3O_4 наночастицы, покрытые диоксидом кремния, модифицированным метформинном, лучшая комбинация для удаления около 92% меди (II). Эти результаты объясняются большим количеством атомов азота вокруг каждой частицы, которые предлагают больше доступных мест для адсорбции на поверхности мембраны. Кроме того, гидрофильность модифицированных наночастиц может увеличить доступные центры адсорбции и таким образом миграцию тяжелых металлов на поверхность мембраны.

5. Удаление полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) и фталатов (ПАЭ)

Существует несколько источников этого типа загрязняющих веществ, которые возникают в результате естественной деятельности (например, лесных пожаров и вулканической активности), бытовых, промышленных, сельскохозяйственных и других источников (выхлопы самолетов, нефтяные резервуары/корабли) и т.д. Они сохраняются в окружающей среде и накапливаются в биоте и пищевых цепях и могут оказывать неблагоприятное воздействие на водную флору и фауну и человека, включая канцерогенные свойства. Поэтому загрязнение водных ресурсов алкилфталатами и некоторыми опасными фенильными соединениями также находится под пристальным вниманием исследователей. В литературе мало работ, посвященных использованию фильтрующих мембран для удаления этих видов соединений [35]. Применяли промышленные нанофильтрационные мембраны на основе сульфированного полиэфирсульфона или поливинилового спирта/полиамида для алкилфталатов и других растворенных веществ, таких как монозамещенные бензолы, уровень удаления был выше 99% алкилфталатов. Однако п-диметилфталат, п-диэтилфталат и все монозамещенные бензолы показали значительно более низкий процент снижения. Это может быть связано с тем, что эти соединения имели меньший размер молекулы по сравнению с указанными выше соединениями (< 0,32 нм).

Заключение

Удаление различных загрязнений в воде может проводиться физическим методом с помощью фильтрующих мембран. Разработано несколько видов полимерных мембран для удаления PbAc , пестицидов, микроорганизмов, красителей, тяжелых металлов в воде. Обзор научных публикаций

подтверждает использование различных типов полимеров, модифицированных добавками и/или наноматериалами. Подводя итог обзора научных источников, можно сделать следующие выводы.

Вид полимера определяет физико-химические характеристики и рабочие параметры мембран, поэтому при выборе полимера необходимо учитывать, какой цели необходимо достичь.

Заряженные мембраны вызывают электростатический эффект с заряженными молекулами, что необходимо для контроля pH исходных растворов, хотя установить какую-либо корреляцию нельзя, поскольку нет экспериментальных доказательств.

Обычные полимерные мембраны имеют низкую эффективность удаления загрязняющих веществ из воды, а тонкопленочные композитные (TFC) мембраны имеют более высокую способность удалять вещества из воды, чем обычные мембраны, хотя и работают при более высоких рабочих давлениях, что ограничивает их использование.

Введение полимерных добавок в мембраны не обеспечивает большую селективность мембран; однако они могут улучшить дисперсию наноматериалов в наноструктурированных мембранах, обеспечивая тем самым более эффективное включение.

Пропитка полимерных мембран наноматериалами является перспективной альтернативой для снижения ограничений, т.е. загрязнения, площади поверхности, гидрофильных свойств.

В зависимости от вида загрязнения, которое необходимо удалить из воды, применяют различные наноматериалы. Для удаления микроорганизмов наиболее подходящими являются наночастицы серебра из-за их высокой антимикробной активности; комбинация наночастиц GO/TiO_2 более эффективна, чем их индивидуальное использование, для удаления красителей; для удаления тяжелых металлов наиболее эффективны и широко используются углеродные нанотрубки и наночастицы некоторых металлов. Адсорбирующие материалы нового поколения, такие как MOF, эффективно удаляют некоторые PbAc . Однако необходимы дополнительные исследования, чтобы доказать их способность справляться с большим количеством загрязняющих веществ.

Тонкопленочные наноструктурированные (TFN) мембраны показывают более высокие потоки по сравнению с сильно сшитыми непористыми полиимидными слоями, типичными для мембран TFC. Следовательно, они могут более эффективно отделять загрязняющие вещества при меньших затратах энергии.

Список литературы

1. WHO/UNICEF. Drinking Water. [Электронный ресурс]. URL: <https://data.unicef.org/topic/water-and-sanitation/drinking-water/> (дата обращения: 10.12.2021).
2. Kim S. et al. Removal of contaminants of emerging concern by membranes in water and wastewater: a review. *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 335. P. 896–914. DOI: 10.1016/J.CEJ.2017.11.044.
3. Taheran M. et al. Membrane processes for removal of pharmaceutically active compounds (PhACs) from water and wastewaters. *Science of the Total Environment*. 2016. Vol. 547. P. 60–77. DOI: 10.1016/J.SCITOTENV.2015.12.139.
4. Hosseini S.S. et al. Recent progress in development of high performance polymeric membranes and materials for metal plating wastewater treatment: a review. *Journal of Water Process Engineering*. 2016. Vol. 9. P. 78–110. DOI: 10.1016/J.JWPE.2015.11.005.
5. Rezakazemi M., Khajeh A., Mesbah M. Membrane filtration of wastewater from gas and oil production. *Environmental Chemistry Letters*. 2018. Vol. 16. No. 2. P. 367–388. DOI: 10.1007/s10311-017-0693-4.
6. Cai Z. et al. Application of nanotechnologies for removing pharmaceutically active compounds from water: development and future trends. *Environmental Science: Nano*. 2018. Vol. 5. No. 1. P. 27–47.
7. Ying Y. et al. Recent advances of nanomaterial-based membrane for water purification. *Applied Materials Today*. 2017. Vol. 7. P. 144–158. DOI: 10.1016/j.apmt.2017.02.010.
8. Khraisheh M. et al. Recent progress on nanomaterial-based membranes for water treatment. *Membranes*. 2021. Vol. 11. No. 12. P. 995. DOI: 10.3390/membranes11120995.
9. Shahmirzadi M.A.A., Kargari A. Nanocomposite membranes. *Emerging technologies for sustainable desalination handbook*. Butterworth-Heinemann. 2018. P. 285–330.
10. Yin J., Deng B. Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment. *Journal of membrane science*. 2015. Vol. 479. P. 256–275. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.11.019.
11. Werber J.R., Osuji C.O., Elimelech M. Materials for next-generation desalination and water purification membranes. *Nature Reviews Materials*. 2016. Vol. 1. No. 5. P. 1–15. DOI: 10.1038/natrevmats.2016.18.
12. Ji C. et al. Recent advances in high-performance TFC membranes: A review of the functional interlayers. *Desalination*. 2021. Vol. 500. P. 114869. DOI: 10.1016/j.desal.2020.114869.
13. Mamba F.B., Mbuli B.S., Ramontja J. Recent Advances in Biopolymeric Membranes towards the Removal of Emerging Organic Pollutants from Water. *Membranes*. 2021. Vol. 11. No. 11. P. 798.
14. Siddique T., Dutta N.K., Choudhury N.R. Mixed-matrix membrane fabrication for water treatment. *Membranes*. 2021. Vol. 11. No. 8. P. 557. DOI: 10.3390/membranes11080557.
15. Tasselli F. Membrane Preparation Techniques. In *Encyclopedia of Membranes*; Drioli E., Giorno L. Eds. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany. 2015. P. 1–3.
16. Holda A.K., Vankelecom I.F.J. Understanding and guiding the phase inversion process for synthesis of solvent resistant nanofiltration membranes. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. Vol. 132. No. 27. DOI: 10.1002/app.42130.
17. Esfahani M.R. et al. Nanocomposite membranes for water separation and purification: Fabrication, modification, and applications. *Separation and Purification Technology*. 2019. Vol. 213. P. 465–499. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.12.050.
18. Patel M. et al. Pharmaceuticals of emerging concern in aquatic systems: chemistry, occurrence, effects, and removal methods. *Chemical reviews*. 2019. Vol. 119. No. 6. P. 3510–3673. DOI: 10.1021/acs.chemrev.8b00299.
19. Maryam B. et al. A study on behavior, interaction and rejection of Paracetamol, Diclofenac and Ibuprofen (PhACs) from wastewater by nanofiltration membranes. *Environmental Technology & Innovation*. 2020. Vol. 18. P. 100641. DOI: 10.1016/j.eti.2020.100641.
20. Couto C.F. et al. Assessing potential of nanofiltration, reverse osmosis and membrane distillation drinking water treatment for pharmaceutically active compounds (PhACs) removal. *Journal of Water Process Engineering*. 2020. Vol. 33. P. 101029. DOI: 10.1016/j.jwpe.2019.101029.
21. Couto C.F., Lange L.C., Amaral M.C.S. A critical review on membrane separation processes applied to remove pharmaceutically active compounds from water and wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 2018. Vol. 26. P. 156–175. DOI: 10.1016/j.jwpe.2018.10.010.
22. Kong F. et al. Assessment of the hindered transport model in predicting the rejection of trace organic compounds by nanofiltration. *Journal of Membrane Science*. 2016. Vol. 498. P. 57–66.
23. Dong L. et al. A thin-film nanocomposite nanofiltration membrane prepared on a support with in situ embedded zeolite nanoparticles. *Separation and Purification Technology*. 2016. Vol. 166. P. 230–239 DOI: 10.1016/j.seppur.2016.04.043.
24. Basu S., Balakrishnan M. Polyamide thin film composite membranes containing ZIF-8 for the separation of pharmaceutical compounds from aqueous streams. *Separation and Purification Technology*. 2017. Vol. 179. P. 118–125. DOI: 10.1016/j.seppur.2017.01.061.
25. Nadour M., Boukraa F., Benaboura A. Removal of Diclofenac, Paracetamol and Metronidazole using a carbon-polymeric membrane. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2019. Vol. 7. No. 3. P. 103080. DOI: 10.1016/j.jece.2019.103080.
26. Ali J.K., Abi Jaoude M. Polyimide ultrafiltration membrane embedded with reline-functionalized nanosilica for the remediation of pharmaceuticals in water. *Separation and Purification Technology*. 2021. Vol. 266. P. 118585. DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118585.
27. Zhou A. et al. Abatement of sulfadiazine in water under a modified ultrafiltration membrane (PVDF-PVP-TiO₂-dopamine) filtration-photocatalysis system. *Separation and Purification Technology*. 2020. T. 234. P. 116099. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.116099.
28. Jun B.M. et al. Comprehensive evaluation of the removal mechanism of carbamazepine and ibuprofen by metal organic framework. *Chemosphere*. 2019. Vol. 235. P. 527–537.
29. Sewoon K. Hernández-Maldonado A.J., Yoon Y. A metal organic framework-ultrafiltration hybrid system for removing selected pharmaceuticals and natural organic matter. *Chem. Eng. J*. 2020. Vol. 382. P. 122920. DOI: 10.1016/j.cej.2019.122920.
30. Wang Z. et al. Macroporous membranes doped with micro-mesoporous β -cyclodextrin polymers for ultrafast removal of organic micropollutants from water. *Carbohydrate polymers*. 2019. Vol. 222. P. 114970. DOI: 10.1016/j.carbpol.2019.114970.
31. Mukherjee A. et al. Removal of multiple pesticide residues from water by low-pressure thin-film composite membrane. *Applied Water Science*. 2020. Vol. 10. No. 12. P. 1–8.
32. Kacprzyńska-Gołącka J. et al. Microfiltration membranes modified with composition of titanium oxide and silver oxide by magnetron sputtering. *Polymers*. 2020. Vol. 13. No. 1. P. 141. DOI: 10.3390/polym13010141.
33. Wei X. et al. Removal of heavy metals from electroplating wastewater by thin-film composite nanofiltration hollow-fiber membranes. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2013. Vol. 52. No. 49. P. 17583–17590.
34. Ghaemi N. et al. Polyethersulfone membrane enhanced with iron oxide nanoparticles for copper removal from water: Application of new functionalized Fe₃O₄ nanoparticles. *Chemical Engineering Journal*. 2015. Vol. 263. P. 101–112.
35. Wu Q. et al. Sandwich structured membrane adsorber with metal organic frameworks for aflatoxin B1 removal. *Separation and Purification Technology*. 2020. Vol. 246. P. 116907.