

УДК 532.528

## **Current Trends of Membrane Technology Development**

**Vladimir A. Kulagin\***,  
**Olesya A. Ivchenko and Lyudmila V. Kulagina**  
*Siberian Federal University*  
*79 Svobodny, Krasnoyarsk, 660041, Russia*

Received 20.11.2016, received in revised form 29.12.2016, accepted 17.01.2017

---

*Membrane technologies are currently one of the most popular. This is indicated by their diversity and wide range of use of the membranes in the most relevant spheres of human activity, such as desalination and water treatment, energy, medicine, chemical and petroleum industry etc. It in turn generates interest in studying of membrane properties and the development of new generation membranes and also gives impetus to the expansion of research and the involvement of nanotechnology in membrane science and practice. This article describes the main types and principles of membrane separation, reviewed the status of membrane industry, the scientific advances in the production of membranes, provides an overview of the state of the membrane industry, shows relevant scientific advances in the production of membranes, as well as the prospects of their development.*

*Keywords: desalination, membrane technology, reverse osmosis, carbon nanotube, nanofiltration, ultrafiltration, nanocomposite membranes, graphene.*

---

Citation: Kulagin V.A., Ivchenko O.A., Kulagina L.V. Current trends of membrane technology development, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2017, 10(1), 24-35. DOI: 10.17516/1999-494X-2017-10-1-24-35.

---

© Siberian Federal University. All rights reserved

\* Corresponding author E-mail address: v.a.kulagin@mail.ru

## **Актуальные тенденции развития мембранных технологий**

**В.А. Кулагин, О.А. Ивченко, Л.В. Кулагина**  
*Сибирский федеральный университет*  
*Россия, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79*

---

*Мембранные технологии в настоящее время являются одними из самых востребованных. Об этом говорят их разнообразие и широкий спектр использования мембран в самых актуальных сферах жизнедеятельности человека, таких как опреснение и очистка воды, энергетика, медицина, химическая и нефтегазовая промышленность и др., что, в свою очередь, порождает интерес к изучению свойств мембран и разработке мембран нового поколения, а также дает импульс в расширении исследований и привлечении нанотехнологий в мембранную науку и практику. В данной статье описываются основные виды и принципы мембранного разделения, проводится обзор состояния мембранной индустрии, показаны актуальные научные достижения в производстве мембран, а также перспективы их дальнейшего развития.*

*Ключевые слова: опреснение, мембранные технологии, обратный осмос, микрофильтрация, ультрафильтрация, углеродные нанотрубки, нанофильтрация, нанокompозитные мембраны, графен.*

---

### **Введение**

Значение чистой воды для человека трудно переоценить. К сожалению, запасы пригодной для питья чистой воды убывают повсеместно. Крупные промышленные предприятия продолжают проводить сбросы технических вод в естественные водоемы, качество работ по очистке стоков разного происхождения также оставляет желать лучшего. Проблему обостряет сильная неравномерность распределения водных ресурсов. Во многих странах уже серьезно не хватает не только чистой питьевой воды, но и пресной воды вообще. Поэтому так быстро развиваются технологии добычи пресной воды. Чтобы получить пресную питьевую воду, нужно довести содержание в ней солей до одного грамма на литр. Как правило, опреснение осуществляется одним из следующих способов: дистилляцией, обратным осмосом, электродиализом, вымораживанием и ионным обменом.

Альтернативой ионообменному и мембранным методам выступает термическое обессоливание воды – испарение кипящей жидкости с последующим охлаждением и конденсацией паров. Существенное снижение использования химических реагентов и возможность работы на минерализованных сточных водах значительно повысили интерес к этому методу водоподготовки. Одно время из всего объема получаемой в мире опресненной воды наибольшая доля приходилась на термические опреснительные установки. Однако несовершенство процессов теплообмена и испарения, накипеобразование, большие габариты, необходимость предварительной водоподготовки и ряд других недостатков требуют совершенствования существующих и создания новых установок для обессоливания с более высокими технико-экономическими характеристиками.

Отдельно стоят разрабатываемые в настоящее время кавитационные технологии [111], которые отличаются легкой реализуемостью и энергоэффективностью.

В условиях обострения дефицита пресной воды актуальность совершенствования существующих и разработки новых методов водоподготовки не вызывает сомнений. Процесс обессоливания воды в настоящее время осуществляется преимущественно ионообменным и мембранными методами, недостатками которых являются: экологические проблемы, связанные с образованием значительных объёмов сточных вод с большим содержанием солей; высокая себестоимость обессоленной воды, обусловленная стоимостью реагентов и мембран; трудозатраты при транспортировании химических реактивов, перезагрузке и регенерации фильтров; зависимость от поставок импортного оборудования, комплектующих и материалов.

Одним из путей сокращения использования химических реагентов и их ликвидации служит применение мембранных технологий, получивших в мире достаточно широкое распространение [12–15]. Движущей силой в мембранном разделении выступает либо электрическая сила (электродиализ), либо ньютоновская (подача воды в аппарат под давлением). В последнем случае выделяют следующие категории мембран: микрофильтрация (удаляются мелкие взвеси и коллоидные частицы, микроорганизмы с размером 0,1–10 мкм), ультрафильтрация (извлекаются из воды коллоидные частицы, микроорганизмы, крупные органические макромолекулы, имеющие размер 0,01–0,1 мкм), нанофильтрация (удаляются молекулы и многозарядные ионы, имеющие размер от 0,002 до 0,01 мкм, органические молекулы с молекулярной массой выше 300 и все вирусы), обратный осмос (извлекаются все растворённые ионы и органические молекулы) [14].

История развития мембранных технологий насчитывает около 50 лет. Традиционно мембранные технологии применялись во многих сферах производства, но на сегодняшний день одной из главных отраслей их применения остается производство питьевой воды. Около 70 % опреснительных установок начиная с 2000 года стали мембранными [16].

Мембраной называют полупроницаемый ультратонкий барьер, способный под действием силы (обычно разницы давлений или концентраций) пропускать молекулы воды и задерживать растворенные в ней соли.

Существуют четыре общие категории мембранной фильтрации: *микрофильтрация, ультрафильтрация, нанофильтрация и обратный осмос* [17].

Микро- и ультрафильтрация – это процессы фильтрования через микропористую мембрану, поток через которую пропускается под относительно низким давлением (0,1 до 7 бар). Данные технологии получили применение в пищевой и химической промышленности, тепло- и электроэнергетике, а также весьма успешно применяются в качестве предварительной ступени очистки воды, позволяя создать наиболее благоприятные условия для реализации технологии обратного осмоса и нанофильтрации.

Нанофильтрация – это вариант мембраны обратного осмоса, которая пропускает поток под давлением от 3,5 до 10 бар. Большим преимуществом нанофильтрации перед обратным осмосом при производстве питьевой воды является сохранение жизненно необходимых для здоровья человека солей и микроорганизмов.

Обратный осмос действует как барьер для всех растворенных солей и неорганических молекул, а также органических с молекулярной массой более 100, свободно пропуская молекулы воды, которые создают тем самым очищенный поток. Многочисленные и разнообразные при-

менения обратного осмоса могут включать опреснение морской воды, очистку сточных вод, системы питьевого водоснабжения и многое др. Трансмембранное давление для технологии обратного осмоса варьируется от 5 до 84 бар. На рис. 1 показан нормальный диапазон фильтрационных процессов [17].

### Современные достижения в опреснительной индустрии

За последние годы исследования в области мембранных технологий значительно продвинулись. Достижения в мембранном производстве включают в себя нанокompозитные мембраны, углеродные нанотрубки и мембраны на основе графена.

**Нанокompозитными** называют мембраны, основу которых составляет полимерный материал, в пределах которого рассеяны неорганические наночастицы. Эти частицы создают предпочтительные пути для проникновения молекул воды, одновременно являясь барьером для нежелательных компонентов. В качестве неорганических материалов, используемых для нанокompозитных мембран, могут служить оксиды различных металлов, такие как  $TiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $AgO$  и др., чистые материалы (наносеребро), цеолиты, углеродные наночастицы и минеральные глины. На рис. 2 показана структура мембраны из биокаталитического  $TiO_2$  [18].

Как известно, окись титана – фотокаталитический материал, широко используемый для дезинфекции и разложения органических веществ. Благодаря этим свойствам применение  $TiO_2$  в качестве наполнителя способствует устойчивости мембран к биообрастанию, будучи предохраняющим от загрязнений покрытием.

Недавние исследования продемонстрировали использование частиц Бемита (гидроокись алюминия) в качестве материала для изготовления мембран [19]. Другой новый материал, применяемый в качестве наполнителя, – кварц. Было доказано, что кварц значительно улучшает производительность мембран, такие ее качества, как фильтрационная способность, шерохова-

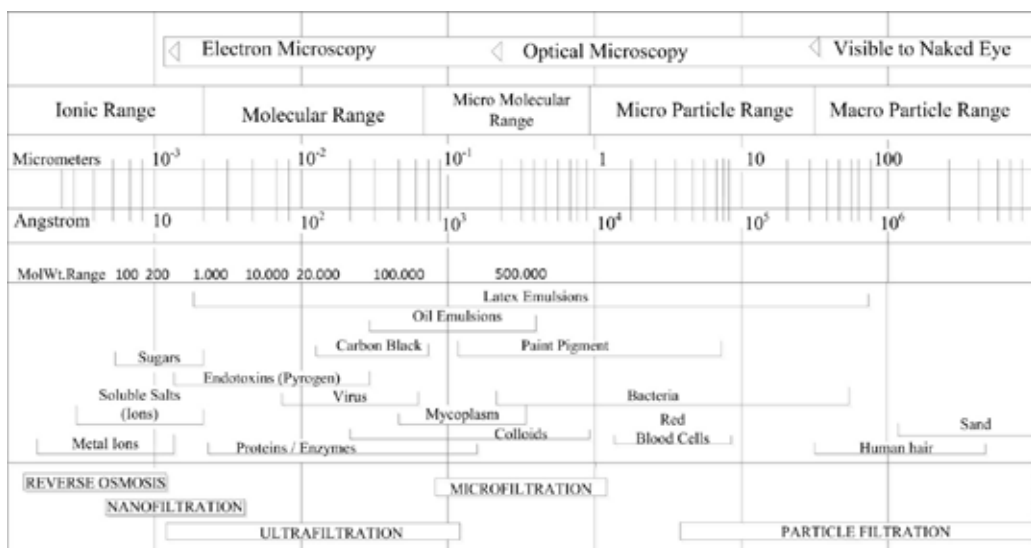


Рис. 1. Уровни процессов фильтрации [17]

тость и электрокинетический потенциал ( $\zeta$ -потенциал) [19]. Помимо этого существуют различные комбинации между наночастицами, которые также приводят к существенному улучшению мембран. Например, была изобретена новая нанокompозитная мембрана с использованием оксида полианилина и железа [19].

**Мембраны на базе графена.** Графен – это относительно новый материал, который начал синтезироваться с 2004 г. [20]. Графен имеет структуру сотовидной решетки. Уникальное свойство графена заключается в том, что он представляет собой одноатомную пленку, это 2D-материал, который обладает высокой теплопроводностью и электропроводимостью; кроме того, у него самая быстрая электронная подвижность, что делает его намного тверже алмаза и тяжелее стали. Мембраны на основе графена получают все большую популярность. В последнее время активно развивается метод опреснения морской воды через мембраны из нанопористого графена. Процесс опреснения показан на рис. 3 [21].

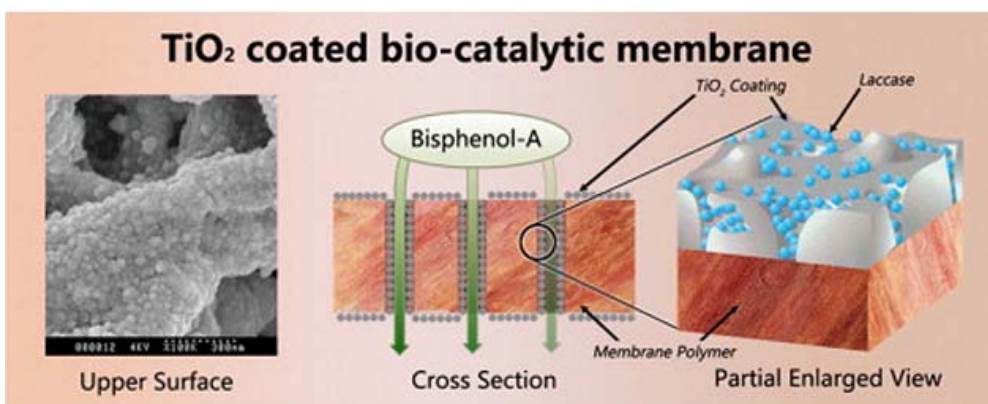


Рис. 2. Структура нанокompозитной мембраны [18]

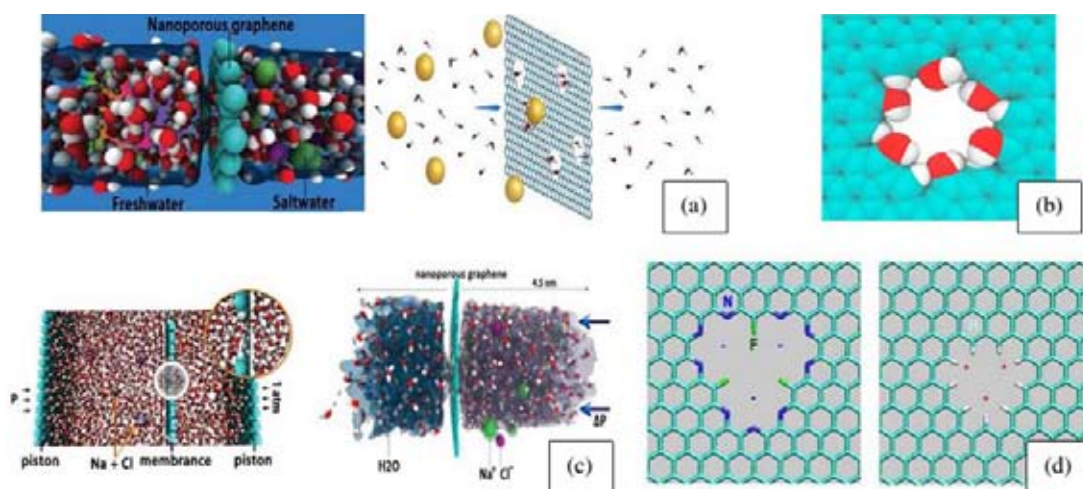


Рис. 3. Схема технологии опреснения на базе нанопористого графена: а – опреснение через нанопористый графен; б – нанопористое гидрофильное соединение; с – компьютерное моделирование графенового фильтра; д – нанопористое гидрофильное соединение (слева) и функционализированные нанопоры (справа) [21]

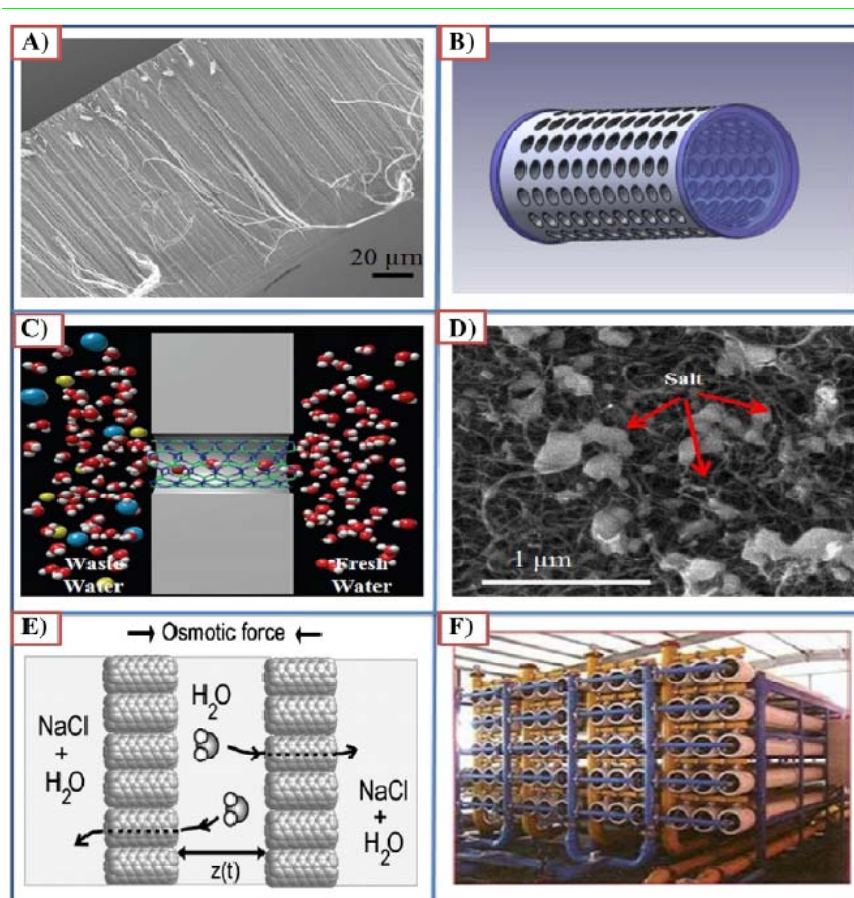


Рис. 4. Некоторые схемы мембранной технологии: А – изображение чистой мембраны под электромикроскопом; В – водный фильтр цилиндрической формы; С – движение молекул воды через углеродную нанотрубку; D – изображение рассеянных нанокристаллов NaCl на мембранной поверхности, E – движение чистой воды через мембрану; E – опреснительная установка на основе мембран [22]

**Углеродные нанотрубки**, которые были открыты в 1991 г., получили большой интерес благодаря своим уникальным механическим, оптическим и электрическим свойствам. Они представляют собой листы графита цилиндрической формы (аллотропная форма углерода). С развитием производственных технологий одинарные, двойные или многостенные, углеродные трубки различных размеров начали инкорпорировать в фильтрационные мембраны. Экспериментальные исследования уже показали, что вода может проникать через относительно узкие углеродные трубки с достаточно высокой скоростью. Данные мембраны представляют большой интерес в связи с низкими энергозатратами, а также высокой фильтрационной способностью. Структуры некоторых мембран изображены на рис. 4 [22].

#### Мировой опыт и тенденции развития мембранных технологий

Нехватку воды в настоящее время испытывают Юго-Западной часть США (которая включает Калифорнию, Аризону, Нью-Мехико и Техас), Мексика, ближневосточные и североафриканские страны, а также Индия, Пакистан, Монголия, Афганистан, Казахстан, Туркменистан,

Узбекистан, Западная Австралия, Центральная Америка и некоторые части Китая. И хотя затраты на опреснение воды значительно снизились за последние годы и кажутся разумными, но многие страны мира не могут себе их позволить.

Ведущими странами по опреснению в настоящий момент являются: Саудовская Аравия, США, Австралия, Израиль, Кувейт, Ливия, ОАЭ, Китай, Индия, Чехия, Карибские острова, Марокко, Испания, Оман, Иран, Египет, Бахрейн, Турция, Иордания [16].

Опреснение в Саудовской Аравии – это стратегическое направление в планах развития страны, где проблема водоснабжения усугубляется тем, что природные источники питьевой воды на континенте практически отсутствуют. В Саудовской Аравии находится самая большая в мире корпорация по опреснению морской воды, которая может производить до  $0,728 \times 10^6 \text{ м}^3/\text{день}$  (2014) [23]. Гибридная опреснительная установка, которая находится в индустриальном городе Аль-Хаире, состоит из 8 MSF-единиц (многоступенчатое мгновенное выпаривание) и 17 RO-установок (обратный осмос). MSF-установка производит  $0,606106 \text{ м}^3/\text{день}$ , а RO –  $0,257 \text{ м}^3/\text{день}$  пресной питьевой воды. Схема опреснительной установки изображена на рис. 5. Это самая большая опреснительная установка подобного рода в мире, которая способна обеспечить питьевой водой приблизительно 33 млн человек. Проект также включает здание электростанции на 2650 мВт. Весь процесс опреснения первоначально подвергается предварительной обработке воды при помощи таких методов, как коагуляция, флуктуация или микро-ультрафильтрация.

Заключительный этап, или стадию постобработки, осуществляют энергетические восстановительные устройства или турбокомпрессоры. Это включает в себя процессы стабилизации воды с помощью удаления из нее газов, таких как сероводород, измерение кислотности и щелочности воды и подготовку ее к распределению. На данный момент Саудовская Аравия заинтересована в эффективном использовании солнечной и атомной энергии для опреснения воды [16].



Рис. 5. Схема опреснительной установки в городе Рас Аль-Хаир [23]

Австралия – самый сухой населенный континент в мире, источники водоснабжения которого постоянно подвергаются опасности из-за изменения климата, засух, сопровождаемых лесными пожарами и наводнениями. Главная опреснительная установка Австралии была введена в эксплуатацию в 2006 г. Она производит 45 млн м<sup>3</sup> в год [24]. Другой опреснительный завод производит примерно 50 млн м<sup>3</sup> в год, его собираются расширить для увеличения производительности [16]. Но самый дорогой и спорный завод был построен в Мельбурне с производительностью 150 млн м<sup>3</sup>/день [16]. Однако в периоды улучшения ситуации с засухой и при избыточных ливнях некоторые заводы не работают часами или даже в течение более длительного времени. На многих заводах были использованы возобновляемые источники энергии, такие как ветровые электростанции. Ежегодные инвестиции Австралии в водоснабжение составляют примерно 2 млрд дол. в год.

Сиднейская опреснительная установка – крупномасштабная установка, работающая на обратном осмосе. Занимает 45 га и располагается в 25 км от Сиднея на побережье Курнеля. На завод вода поступает из Тасманского моря через подземный и подводный тоннель, далее она подается на фильтры для удаления крупных загрязнений (водоросли, песок). Затем вода закачивается в сооружение RO, где она под высоким давлением проходит через мембраны, которые удаляют как соли, так и полезные вещества. Далее в полностью опресненную воду добавляют полезные соли, доводя свойства до уровня питьевого качества. После чего повторно минерализованная вода дезинфицируется и идет в баки для хранения воды. Питьевая вода подается на сеть водоснабжения в Эрскиневилл через 18-километровый трубопровод, а концентрат морской воды возвращается в море. Технологический процесс опреснения показан на рис. 6 [24].

США – страна с очень неравномерно распространенными водными ресурсами. И хотя она достаточно богата в водном плане, все же существуют проблемы. Например, Юго-Западная часть страны засушливая, в то время как в областях Северо-Востока и Среднего Запада выпа-

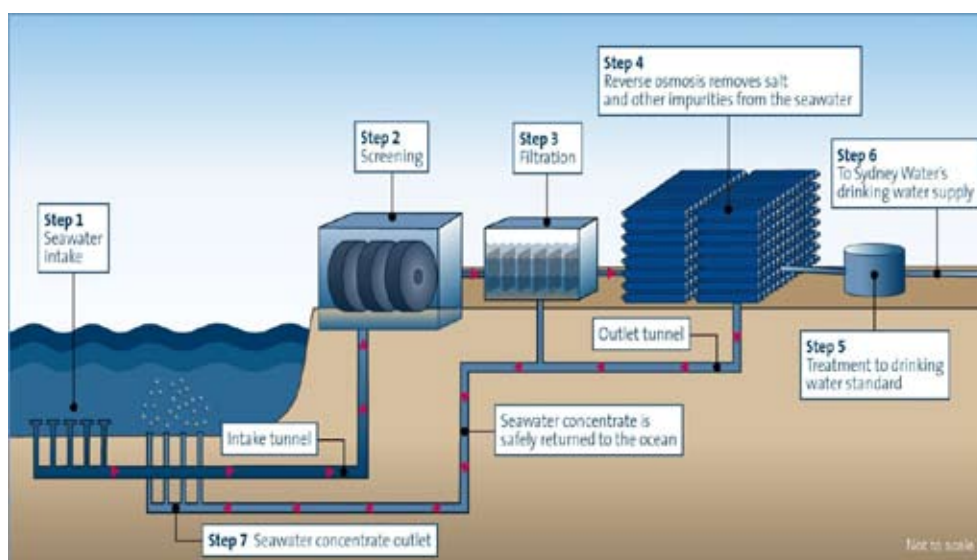


Рис. 6. Технологическая схема опреснительной установки в городе Перт [24]



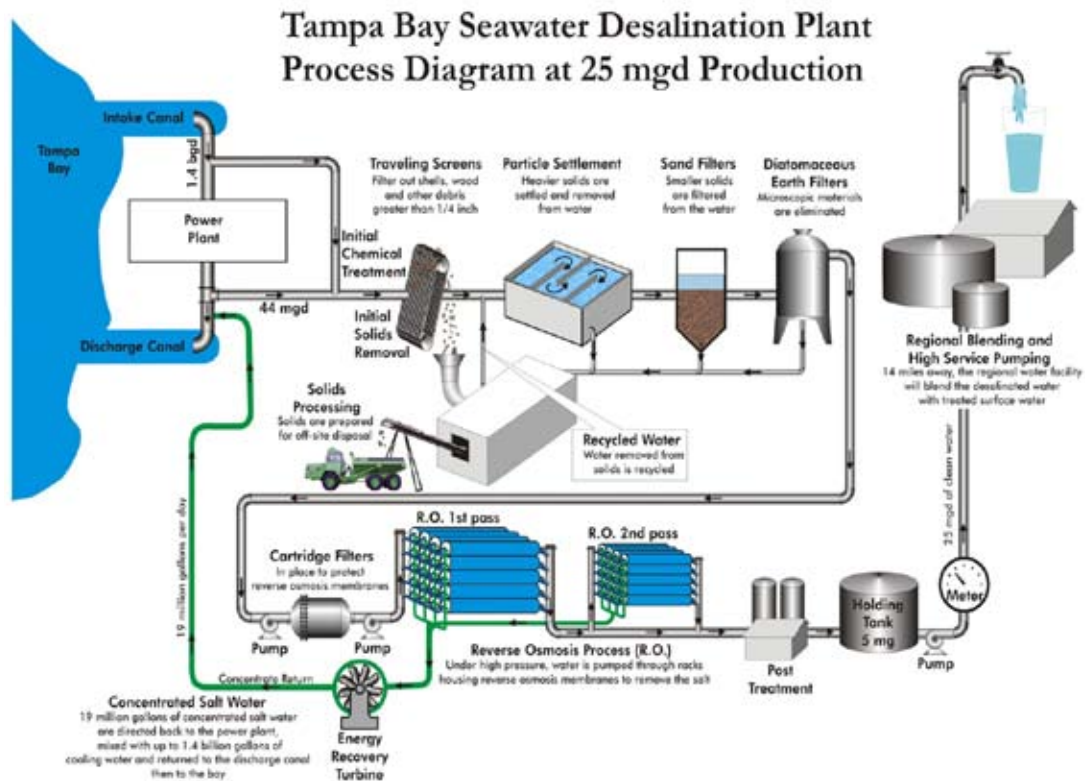


Рис. 7. Опреснительная установка Тампа Бэй [26]

дает много осадков и есть доступ к озерам. Лидер в США по использованию опреснительных технологий – Флорида. Некоторые ее установки применяют для опреснения прибрежных морских вод, но большинство источников – это солончатые грунтовые или поверхностные воды. Опреснительная установка Тампа Бэй – альтернативное водоснабжение, которое обеспечивает регионы до 25 млн галлонов питьевой воды в день. Принцип ее работы основан на обратном осмосе (рис. 7) [25].

Хотя опреснение является многообещающей альтернативой для получения питьевой воды, существенным недостатком многих технологий признан большой расход энергии, что, в свою очередь, приводит и к загрязнению окружающей среды (выбросы парникового газа, концентрат морской воды). Международное опреснение воды увеличивается в устойчивом темпе совместно с увеличением потребления ископаемого топлива.

Производство 1000 т (м<sup>3</sup>) пресной воды в день с помощью опреснительной технологии в требует 10 000 т нефти в год, что также ведет к экологической деградации [26]. В связи с этим использование возобновляемых источников энергии, таких как энергия солнца, ветра, волн, многообещающе для устойчивости технологий опреснения.

### Заключение

В то время как значимость водных источников является недооцениваемой во многих районах мира, нехватка воды может представлять собой существенные проблемы для устойчивого

развития, что может способствовать политической и социальной нестабильности, экологической катастрофе, нанести вред здоровью человека, а также послужить серьезным препятствием экономическому развитию. В этой связи развитие мембранных технологий и производство новых мембранных материалов обеспечивают решение многих задач питьевого и технического водоснабжения благодаря своим огромным возможностям и уникальностью метода. Новые наноматериалы оказывают сильное воздействие на уже существующие технологии, а также позволяют разработать совершенно новые продукты и процессы. Высокие темпы производства мембран требуют знаний мембранных процессов и возможностей и навыков их использования в технологиях водоподготовки. Важно также умение правильного выбора мембранной аппаратуры, технологической системы и т.д.

Однако сохраняется проблема мембранного загрязнения – осаждения твердых частиц и коллоидной (гелевой) пленки на поверхности. Механические и коллоидные частицы в таких условиях имеют тенденцию к укрупнению и образованию агрегатов, которые могут откладываться на мембране, блокируя ее. Поэтому необходимо сосредоточиться на разработке способов управления загрязнением, например с помощью кавитационной технологии [27], его уменьшения и предотвращения, что требует подробного изучения механизма загрязнения и процесса фильтрации. Актуально на сегодняшний момент также применение возобновляемых источников энергии, новых наукоемких технологий и материалов с целью энергетической интеграции и минимизации используемой энергии [28, 33].

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности» в рамках научного проекта № 16-41-242156 р\_офи\_м.*

#### Список литературы

- [1] Демиденко Н. Д., Кулагин В.А., Шокин Ю. И. Ли Фенг-Чен *Тепломассообмен и суперкавитация* Новосибирск: Наука, 2015. 436 с. [Demidenko N.D. , Kulagin V.A., Shokin Y.I., Li. F.-C. *Heat and Mass Transfer and supercavitation*. Novosibirsk: Nauka, 2015. 436 p. (in Russian)]
- [2] Кулагин В.А., Турутин Б.Ф., Матюшенко А.И., Кулагина Т.А. *Физика атмосферы и гидрофизика*. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. 498 с. [Kulagin V.A., Turutin B.F., Matiushenko A.I., Kulagina T.A. *Physics of atmosphere and hydro physics*. Krasnoyarsk: CPI KSTU, 2006. 498 p. (in Russian)]
- [3] Likhachev D.S., Li F.C., Kulagin V.A. Experimental study of thermohydrodynamic characteristics of a rotational supercavitating evaporator for desalination. *Science China Technological Sciences*. 2014. Т. 57. № 11. С. 2115-2130. DOI: 10.1007/s11431-014-5631-0.
- [4] Kulagin V.A., Sapoghnikova E.S., Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Zhi-Ying Zheng, Qian Li, Feng-Chen Li. Features of influence of cavitation effects on the physicochemical properties of water and wastewater, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* 2014, 7(5). 605614.
- [5] Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Моделирование процессов в суперкавитационном испарителе с учётом термодинамических эффектов. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*.

2013, № 10, с. 25-27 [Kulagin V.A., Pyanykh T.A. Modeling of processes in supercavitation evaporator with consideration of thermodynamic effects. *Chemical and Petroleum Engineering*. Vol. 50. Nos. 1-2, May. 2014. P. 2429. DOI: 10.1007/s10556-014-9848-3].

[6] Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Исследование кавитационных течений средствами математического моделирования. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2012, 5(1), 5762 [Vladimir A. Kulagin and Tatyana A. Pyanykh Research of Cavitating Flows by Methods of Mathematical Simulation. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2012, 5(1), 57-62 (in Russian)]

[7] Кулагин В.А., Пьяных Т.А. Численное исследование процессов в суперкавитационном испарителе с учётом термодинамических эффектов. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2013, 6(5), 498505 [Vladimir A. Kulagin and Tatyana A. Pyanykh Numerical Study of Processes in Supercavitation Evaporator Considering Thermodynamic Effects *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2013, 6(5), 498-505 (in Russian)]

[8] Kulagin V.A., Pyanikh T.A. Evolution of Supercavitation Evaporator Taking into Account the Thermodynamic Effects. *Chemical and Petroleum engineering*. 2013, vol. 49, № 34, p. 128-130.

[9] Евстигнеев В.В., Кулагин В.А. Кавитация в технологиях очистки сточных вод. *В мире научных открытий*. 2010. № 5-1. С. 8790 [Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Cavitation in wastewater treatment technology. *In the world of scientific discovery*. 2010. № 5-1. 87-90].

[10] Dubrovskaya O.G., Evstigneev V.V., Kulagin V.A. Conditioning of Waste Water of Energy Systems. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2011, 4(6), 629-641. (in Russian)

[11] Стебелева О.П., Кашкина Л.В., Кулагин В.А., Кулагина Л.В. Утилизация золы на базе физико-химических превращений при кавитационном воздействии. *Вестник МАНЭБ*. 2009. Т. 14. № 6. С. 238-242. [Stebeleva O.P., Kashkina L.V., Kulagin V.A., Kulagina L.V. Disposal of ash on the basis of physical and chemical transformations under of cavitational influence, *Herald MANEB*. 2009. Т. 14. № 6. 238-242 (in Russian)]

[12] Hausmann A., Sanciolo P., Vasiljevic T. et al. Integration of membrane distillation into heat paths of industrial processes. *Chemical Engineering Journal*. 2012, Vol. 211–212, 378–387.

[13] Kullab A., Martin A. Membrane distillation and applications for water purification in thermal cogeneration plants. *Separation and Purification Technology*. 2011. Vol. 76. № 3. 231–237.

[14] Френкель В.С. Мембранные технологии: прошлое, настоящее и будущее (на примере Северной Америки). *Водоснабжение и санитарная техника*. 2010. № 8. 48–54. [Frenkel V.S. Membranes Technologies: past, present, and future (in the North American example), *Water supply and Sanitarian appliances*. 2010. № 8. 48-54 (in Russian)]

[15] Десятков А.В., Баранов А.Е., Баранов Е.А. и др. *Опыт использования мембранных технологий для очистки и опреснения воды*; ред. А.С. Коротеев. М.: Химия, 2008. 240 с. [Desyatov A.V., Baranov A.E., Baranov E.A. etc. *Experience in the use of membrane technology for the purification and desalinating of water*; Ed. A.S. Koroteev, M.: Chemistry, 2008. 240 p. (in Russian)]

[16] Veera Gnaneswar Gude. Desalination and sustainability – An appraisal and current perspective. *Water Research*. 2016, № 89. 87–106.

[17] Волков В.В., Мчедлишвили Б.В., Ролдугин В.И. и др. Мембраны и нанотехнологии, *Российские нанотехнологии*. 2008, № 11–12, т. 3. Обзоры. [Volkov V.V., Mchedlishvili B.V., Roldugin V.I. et al. Membranes and nanotechnologies. *Russian Nanotechnologies*. 2008, № 11-12. Том 3. Surveys (in Russian)]

[18] J. Hou, G. Dong, Y. Ye, V. Chen, Enzymatic degradation of bisphenol-A with immobilized laccase on TiO<sub>2</sub> sol-gel coated PVDF membrane. *Membrane Science*. 2014. 19–30.

[19] A.W. Mohammad, Y.H. Teow, W.L. Ang etc. Nanofiltration membrane review: Recent advances and future prospects. *Desalination*. 2015. 226–254.

[20] María del Rayo Chávez-Castillo, Mario Alberto Rodríguez-Meza y Lilia Meza-Montes. Grafeno y Siliceno: una nueva vida gracias a la sutileza de los materiales bidimensionales. *Ciencia*. 2003. 148–152.

[21] Arash Aghigh, Vahid Alizadeh, H.Y. Wong etc. Recent advances in utilization of graphene for filtration and desalination of water. *Desalination*. 2015, 389–397.

[22] Rasel Das, Md. Equb Ali, SharifahBeeAbdHamid etc. Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination. *Desalination*. 2014, 97–109.

[23] Water technology, 2015a. <http://www.water-technology.net/projects/-ras-al-khairdesalination-plant/>

[24] Water technology, 2015b. <http://www.water-technology.net/projects/perth>

[25] Weiwei Mo, Ranran Wang, and Julie B. Zimmerman. Energy–Water Nexus Analysis of Enhanced Water Supply Scenarios: A Regional Comparison of Tampa Bay, Florida, and San Diego, California. *Environ. Sci. Technol.*, 2014, 48 (10), p. 5883–5891.

[26] Water technology, 2015c <http://www.water-technology.net/projects/tampa>

[27] Dubrovskaya O.G., Kulagin V.A. Intensification of the process sorption cleaning oily waste with the use hydrothermodynamic effects of cavitation, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2016, 9(2), 268-279, DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-2-268-279.

[28] Peng Wang, Tai-Shung Chung. Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring. *Journal of membrane science*. 2015. 39–56.

[29] Bárbara C. Ricci, Carolina D. Ferreira, Alice O. Aguiar, Míriam C.S. Amaral. Integration of nanofiltration and reverse osmosis for metal separation and sulfuric acid recovery from gold mining effluent. *Separation and purification technology*. 2015. 11–21.

[30] Gang Han, Sui Zhang, Xue Li, Tai-Shung Chung. Progress in pressure retarded osmosis (PRO) membranes for osmotic power generation. *Progress in Polymer science*. 2015. 1–27.

[31] P.S. Goh, A.F. Ismail. Graphene-based nanomaterial: The state-of-the-art material for cutting edge desalination technology. *Desalination*. 2015. 115–128.

[32] Santiago Gutiérrez Ruiz, Mohammed Hassani Zerrouk, José María Quiroga Alonso. Ensuciamiento y limpieza de membranas empleadas en la desalación de aguas. *TecnoAgua*. 2016. 104–117.

[33] Yi You, Veena Sahajwalla, Masamichi Yoshimura and Rakesh K. Joshi. Graphene and graphene oxide for desalination. *Nanoscale*. 2016. 117–119.