

УДК 628.165:66.081.63

ПРЯМОЙ ОСМОС СЕГОДНЯ: ПЕРСПЕКТИВЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ

© 2023 г. А. П. Андрианов^{а,*,**}, О. В. Янцен^{а, b}, Р. В. Ефремов^с

^аООО “ВТ эксперт”, ул. Саморы Машела, 2а, пом. 611, Москва, 117198 Россия

^бФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе”, ул. Миклухо-Маклая, 23, Москва, 117997 Россия

^сФедеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет” (НИУ МГСУ), Ярославское ш., 26, Москва, 129337 Россия

*e-mail: laerimarum@mail.ru

**e-mail: apa@wtexpert.ru

Поступила в редакцию 10.02.2023 г.

После доработки 04.04.2023 г.

Принята к публикации 07.04.2023 г.

Прямой осмос рассматривают как новую, передовую технологию, способную составить конкуренцию существующим на мировом рынке методам опреснения, обессоливания, очистки и концентрирования природных и сточных вод. В настоящем обзоре представлены возможные области применения прямого осмоса, технологические схемы и наиболее яркие примеры внедрения. Рассмотрены вопросы разработки мембран для прямого осмоса, составов осмотических агентов и их регенерации, загрязнения мембран. Особое внимание уделено проблемам, возникающим при работе мембран прямого осмоса, энергетической и экономической оценке рассматриваемой технологии. Сделаны выводы о текущем статусе коммерческого внедрения прямого осмоса и основных барьерах, встающих на пути его освоения.

Ключевые слова: обессоливание, опреснение, обратный осмос, осмотический агент, прямой осмос, технико-экономическая оценка

DOI: 10.31857/S2218117223040028, EDN: RSYSKA

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблема опреснения морской и солоноватой воды, очевидно, не стоит так остро перед водной отраслью в России, как во многих зарубежных странах, испытывающих дефицит пресной воды. В особенности это касается стран Ближнего Востока и Северной Африки, где располагается около половины существующих опреснительных станций [1], а также США, Китая и Австралии. Тем не менее, задачи совершенствования процессов обессоливания и опреснения также актуальны и в отечественной практике, в особенности в сфере утилизации концентратов и солоноватых производственных стоков, дренажных вод хвостохранилищ и полигонов ТБО и т.д. В настоящее время бесспорным лидером в области обессоливания является обратный осмос, обеспечивающий более двух третей всех установленных мощностей в мире [2]. Этому способствуют относительно низкие приведенные затраты, компактность оборудования и удобство эксплуатации. При наличии

дешевых источников тепловой энергии (как, например, в Саудовской Аравии, ОАЭ, Кувейте) экономически выгодным становится использование многоступенчатых испарительных установок мгновенного вскипания или многоступенчатых дистилляционных установок, в том числе термокомпрессионных, на которые суммарно приходится четверть установленной мощности опреснительных станций [1]. Несмотря на успехи этих технологий и большой объем научно-технических разработок, выполненных в последние несколько десятилетий [2, 3], обеспечивший как широкомасштабное внедрение обратного осмоса, так и повышение энергоэффективности термической дистилляции, имеющиеся недостатки и ограничения заставляют вести активный поиск и разработку новых методов обессоливания. Так, за последние 10–15 лет существенно, до 25%, возросла доля публикаций, посвященных новым технологиям опреснения, к которым относят нанофильтрацию (как метод частичного обессоливания мор-

ской воды), прямой осмос (FO – forward osmosis, в некоторых публикациях – direct osmosis) и мембранную дистилляцию [2]. Одна из активно исследуемых технологий – прямой осмос: так, начиная с 2005 г., появляются первые систематические сообщения о проводимых исследованиях, а с 2011 г. начинается бурный рост числа публикаций, число которых в настоящее время приближается к 6000 (по результатам поиска в базе ScienceDirect). Между тем в отечественной литературе эта технология практически не упоминается, за исключением нескольких обзорных статей и единичных сообщений о проводимых исследованиях [4–6].

Несмотря на относительную “молодость” этого направления мембранной науки, оно имеет давнюю историю. Как известно, явление прямого осмоса было обнаружено и описано в 1748 г. французским священником и физиком Жаном-Антуаном Ноле, а его соотечественник Огюстен-Пьер Дюбрюнфо в 1853 г. впервые применил принцип осмотического разделения для очистки патоки (мелассы) от ее солей и предложил конструкцию плоскостранного мембранного аппарата [7]. Здесь, строго говоря, имеет место не совсем прямой осмос в современном инженерном представлении, а диализ, так как через полупроницаемую перегородку в направлении, обратном току воды, проходят минеральные и низкомолекулярные органические соли, от которых и очищается патока. В дальнейшем аппаратура для мембранного разделения патоки неоднократно совершенствовалась.

Один из первых патентов, где прямой осмос предлагалось использовать для концентрирования растворов с использованием раствора хлорида кальция и описывается изготовление неорганической полупроницаемой мембраны относится к 1909 г. [8]. Впоследствии отдельные исследования стали появляться уже одновременно с развитием технологии обратного осмоса [9–11], и здесь следует особо отметить роль Синдея Лоеба, который является изобретателем т.н. осмоса с “задержкой” давления (PRO – pressure retarded osmosis), основанного на прямом осмосе [12, 13]. Помимо Лоеба системные исследования в 70-е гг. проводили Кеслер и Муди [14]. Однако вплоть до 21 века работы в области применения прямого осмоса для обессоливания воды оставались единичными и не стали сколько-нибудь заметным направлением мембранной науки.

В последние десятилетия во всем мире больше внимания стало уделяться вопросам энергоэффективности методов обессоливания, поиску альтернативных источников энергии для опреснения, гибридным технологиям [15–17]. К числу последних относят и применение прямого осмоса

для разбавления исходной соленой воды перед обратноосмотическими установками или для выработки энергии для электроснабжения опреснительной станции (технология PRO) [18–20]. Несмотря на “многообещающие” заголовки, опреснение на основе возобновляемых ресурсов в настоящее время не более чем простые комбинации “зеленых” источников энергии и известных технологий водоподготовки, обеспечивающих снижение потребления “традиционной” электроэнергии [17, 21, 22].

Прямой осмос пропагандируется и в качестве низкоэнергетического метода опреснения. Приведем здесь данные по энергопотреблению станций опреснения морской воды на основе прямого и обратного осмоса. Если обратноосмотические установки оснащены устройствами для рекуперации энергии концентрата, то удельное потребление электроэнергии составляет в идеальном случае 3.5–4.5 кВт ч/м³, но может быть 4–6 кВт ч/м³ и более при отсутствии рекуператоров, достигая 10–15 кВт ч/м³ для станций малой производительности [21, 22]. Для случая обессоливания солоноватых вод потребление энергии лежит в пределах 1.5–2.5 кВт ч/м³. Для дальнейшего снижения удельного энергопотребления (оценочно до 2 кВт ч/м³ для морской воды), а также уменьшения сброса концентрата ведутся разработки в области технологии обратного осмоса с замкнутым контуром (CC-RO – closed circuit reverse osmosis) или полупериодического обратного осмоса (HBSRO – hybrid batch/semi-batch reverse osmosis), то есть с рециркуляцией концентрата и периодическим его сбросом [23, 24]. В сравнении с обратным осмосом сам процесс прямого осмоса требует очень мало энергии (порядка 0.1 кВт ч/м³ и менее), необходимой для работы насосов низкого давления, однако с учетом остальных процессов, главным из которых является стадия регенерации, энергопотребление может варьироваться от 3 до 8 кВт ч/м³ [25]. Ниже этот вопрос будет освещен подробнее, а сейчас перейдем к рассмотрению сущности самой технологии прямого осмоса.

2. СУЩНОСТЬ ПРОЦЕССА ПРЯМОГО ОСМОСА

Процесс прямого осмоса (рис. 1) заключается в проникновении растворителя (воды) через полупроницаемую мембрану из раствора с более низким осмотическим давлением (с более низкой концентрацией растворенных веществ) в раствор с более высоким осмотическим давлением (с более высокой концентрацией растворенных веществ). Для этого процесса не требуется приложения какой-либо внешней движущей силы, бо-

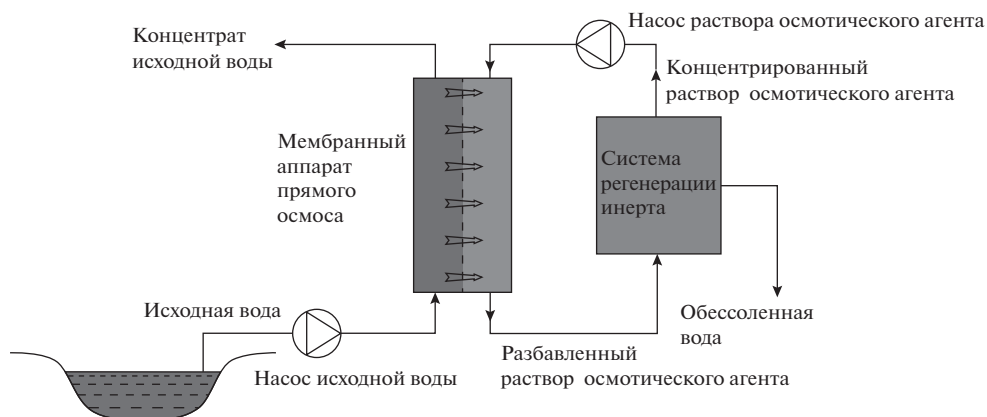


Рис. 1. Упрощенная схема опреснения воды прямым осмосом.

лее того, при разбавлении концентрированного раствора проникающим через мембрану растворителем возможно получить механическую энергию, на чем основан принцип работы осмотической электростанции. Главная задача возникает при дальнейшем отделении растворителя от раствора осмотического агента¹ (соли или неэлектролита). Для этого используют термические, мембранные (ультрафильтрация, нанофильтрация, обратный осмос) и физические (магнитные поля) методы и их комбинации. В результате получается исходный концентрированный раствор, который направляют обратно в аппараты прямого осмоса и чистый растворитель (пресная вода). Раствор осмотического агента, с одной стороны, должен иметь большое осмотическое давление (превышающее осмотическое давление опресняемой воды), и как следствие, высокую концентрацию осмотического агента, который в свою очередь должен иметь отличную растворимость в воде, а с другой стороны, должен легко отделяться от воды, по крайней мере, это разделение должно быть проще и энергетически выгоднее, чем разделение исходной морской воды термическим, мембранным или иным методом. И наконец, отделенная пресная вода не должна содержать заметных количеств осмотического агента, то есть это разделение должно быть высокоселективным, а сам осмотический агент — сохранять свои свойства в течение многих и многих циклов регенерации, не быть токсичным и не разрушать мембрану. Все вышеперечисленное делает техноло-

гию опреснения прямым осмосом совсем не такой простой, как может показаться с первого взгляда.

Несмотря на то, что технология прямого осмоса выглядит более сложной по сравнению с традиционным обратноосмотическим обессоливанием, тем не менее у прямого осмоса есть и свои преимущества. Во-первых, так как движущей силой процесса является разность концентраций (разность осмотических давлений), а не разность статических давлений, как при обратном осмосе, то и загрязнение мембран коллоидными и органическими примесями будет меньше, и оно будет легче устраняться [26]. Это позволяет упростить предварительную подготовку опресняемой воды. Во-вторых, ступень регенерации работает на чистой воде, содержащей в основном только осмотический агент, что при использовании мембранного разделения позволяет повысить выход фильтра и не беспокоиться о осадкообразовании на мембранах и не расходовать антискалант. В-третьих, та часть исходных примесей, которые смогут проникнуть через мембраны прямого осмоса, будут встречены вторым барьером разделения на стадии регенерации осмотического агента. Наконец, по теоретическим расчетам, возможно получить более низкое энергопотребление в сравнении с обратным осмосом и тем более — в сравнении с термической дистилляцией [27]. Еще одно преимущество прямого осмоса — возможность обработки потоков с очень высоким содержанием, например, 240 г/л и более [28, 29].

Обсуждая проблему обработки высокоминерализованных вод, следует упомянуть о такой технологии, как обратный осмос с осмотической поддержкой (OARO — Osmotically assisted reverse osmosis или OMRO — Osmotically mediated reverse osmosis) [30, 31], так как он включает в себя принципы работы как прямого, так и обратного осмо-

¹ В отечественной литературе нет устоявшегося термина, обозначающего “вытяжной раствор” (если переводить дословно с английского термин “draw solution”). В более ранней зарубежной литературе иногда встречается термин “осмотический агент” (“osmotic agent”), который предлагается использовать здесь для обозначения концентрированного раствора или суспензии, используемых при прямом осмосе.

са. Кратко, суть метода состоит в том, что со стороны пермеата циркулирует раствор с содержанием, меньшим, чем в исходной воде. За счет этого обратный осмос может работать при более низком трансмембранном давлении. Циркулирующий раствор затем отправляется на вторую ступень “обычного” обратного осмоса, где получается пресная вода, или же еще на одну ступень OARO. По сравнению с прямым осмосом, при OARO циркулирующий раствор менее концентрирован, чем исходный раствор, и, следовательно, легче поддается обработке.

На эффективность процесса прямого осмоса влияют несколько основных факторов: характеристики мембраны прямого осмоса, в частности, ее селективность и проницаемость, свойства осмотического агента и параметры эксплуатации, описывающие стадию прямого осмоса и стадию регенерации раствора осмотического агента. Рассмотрим эти факторы подробнее.

3. ОСМОТИЧЕСКИЕ АГЕНТЫ ДЛЯ ПРЯМОГО ОСМОСА

В качестве веществ, обеспечивающих высокое осмотическое давление раствора, могут применяться минеральные и органические соли, растворенные газы, органические вещества и наночастицы [32, 33]. Самыми ранними осмотическими агентами были растворенные газы, такие как аммиак и диоксид углерода [34]. В водном растворе эти газы находятся в виде бикарбонат-ионов и ионов аммония, а регенерация производится путем нагревания смеси и выделения газообразного аммиака и углекислого газа, оставляющих после себя очищенную воду. Для получения питьевой воды этот осмотический агент не очень пригоден, ввиду его проникновения в очищенную воду и возникающей необходимости обеспечивать в ней нормативные требования по иону аммония. В качестве альтернативы испытывалась возможность использования смеси третичных аминов и CO_2 . Ее преимущество заключается в более высоком осмотическом давлении и более низкой температуре, необходимой для ее регенерации [32].

Теоретически в качестве осмотического агента можно использовать любую хорошо растворимую минеральную соль: хлориды (KCl , NaCl , CaCl_2 , MgCl_2 , LiCl), нитраты ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, NaNO_3 , KNO_3), соли аммония ($(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$, NH_4Cl , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3), некоторые сульфаты (K_2SO_4 , MgSO_4) и дигидрофосфаты (KH_2PO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$) и др. [32]. Однако для опреснения морской воды многие из этих солей непригодны, так как содержатся в самой исходной воде, а соли кальция, сульфаты и (гидро)карбонаты могут вызывать солеотложе-

ния на мембранах. Кроме того, одновалентные ионы лучше проникают через осмотическую мембрану и труднее концентрируются обратным осмосом при регенерации осмотического агента. Наиболее подходящей минеральной солью при обессоливании природных вод, по мнению, высказанному в [35], является MgCl_2 . В случае обработки вод с высоким содержанием и использованием минеральных растворов с концентрацией, близкой к пределу растворимости, одним из возможных методов их регенерации является мембранная дистилляция [28].

Для случаев, когда прямой осмос используется как метод концентрирования сточных вод, исследователями рассматриваются осмотические агенты, не требующие последующей разделительной обработки. В этом качестве можно использовать концентрированный раствор калийных или нитратных удобрений (KCl , NaNO_3 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ и др.), при этом в процессе прямого осмоса он разбавляется водой, прошедшей через мембрану из обрабатываемой воды (солончатая вода или очищенная сточная вода) и полученный раствор можно использовать для фертигации при орошении сельскохозяйственных культур [32]. Этот подход имеет ряд ограничений, в том числе из-за высокой степени проникновения удобрений в обрабатываемую воду, что вызывает экологические проблемы при ее сбросе, и в ряде случаев — из-за необходимости в дальнейшем разбавлении раствора осмотического агента перед его внесением в почву [36].

Для целей опреснения скорее могут найти применение растворы органических веществ: сахарозы, фруктозы или глюкозы, ЭДТА, полиакрилатов, полиэтиленгликоля, этанола, альбумина, ацетата натрия или кальция, 2-метилимидазола и др. [32, 33]. Некоторые органические осмотические агенты способны генерировать высокое осмотическое давление и при этом их можно сконцентрировать ультра- или нанофильтрацией.

Перспективная группа полимерных осмотических агентов — это термочувствительные полимеры, например, на основе поли-N-изопропилакриламида (PNIPAM-полимеры), способных переходить из формы водорастворимой спирали в гидрофобную глобулу при небольшом нагреве. Это позволяет существенно упростить процедуру разделения раствора осмотического агента. К термочувствительным полимерам относятся PSS-PNIPAM (PSS — полистиролсульфонат натрия), тетрабутилполистиролсульфонат натрия, цвиттерионные полимеры — например, полисульфобетаин [32, 37], гидрогели на основе PNIPAM-полимеров [38].

Термочувствительные полимеры характеризуются нижней критической температурой растворения, ниже которой они полностью растворены в воде, а при ее превышении происходит их отделение от воды. Для разных соединений, испытываемых для процесса прямого осмоса, эта температура лежит в пределах от 20 до 100°C [39]. Очевидно, что температура ниже 25–30°C нежелательна, так как при некоторых применениях она приближается к температуре обрабатываемой воды, а слишком высокая — энергетически невыгодна. Растворы осмотических агентов на основе термочувствительных полимеров привлекают возможностью использования для их регенерации источников низкопотенциальной тепловой энергии — сточных вод, вод из оборотных систем охлаждения, солнечной энергии и, наконец, температуры самой окружающей среды для их охлаждения или нагрева [40].

Известно также о применении термочувствительных полимеров с верхней критической температурой растворения [41–43]. В этом случае процесс прямого осмоса ведут при повышенной температуре (50–60°C), а для регенерации раствора осмотического агента его охлаждают до 20–25°C, при этом он разделяется на две фазы: одну, обогащенную полимером, и вторую — с низкой концентрацией полимера; последнюю дополнительно подвергают обработке методом нанофильтрации или обратного осмоса для получения чистой воды.

Большой потенциал в качестве термочувствительных растворов осмотических агентов продемонстрировали неионные амфифильные блок-сополимеры [39, 44, 45]. Эти сополимеры могут быть линейные [39, 44, 45] или разветвленные [45] и состоят из гидрофильных мономеров (групп оксида этилена), так и из гидрофобных мономеров (групп оксида пропилена или оксида бутилена) в определенной последовательности. Растворимость этих сополимеров зависит от изменения их гидрофильности при нагреве, а их свойства в значительной степени определяются гидрофильных сегментами [39]. Для случая обработки концентратов или опреснения морской воды содержание данного сополимера в растворе должно быть не менее 55–60 мас. % [39, 44], а при приближении к 65–75 мас. % его осмотическое давление резко возрастает, достигая в отдельных случаях 100 атм [45].

К достоинствам термочувствительных полимеров относят их стабильность, очень низкую обратную диффузию в обрабатываемую воду (молекулярная масса от 1000–2000 Да), нетоксичность [43] и коммерческую доступность — ряд из них выпускается в промышленных масштабах [39]. Один из существенных недостатков “обычных” неионогенных полимерных осмотических аген-

тов — низкий поток воды через мембрану прямого осмоса (1–2 л/м² ч), в лучших случаях он достигает 3–4 л/м² ч [43, 45]. В этой связи большие надежды связывают с органическими осмотическими агентами, относящимися к группе ионных жидкостей [40, 46, 47]. Благодаря своей диссоциации на ионы, они способны обеспечивать высокое осмотическое давление и хорошо растворимы, они стабильны в растворе и малолетучи, и потенциально должны обеспечивать больший поток воды через мембрану. Однако сравнение результатов испытаний различных термочувствительных растворов осмотических агентов, приведенное в [43], показывает, что при опытах на деионизованной воде поток через мембрану для ионных жидкостей действительно больше, чем для других термочувствительных полимерных осмотических агентов, но на имитатах морской или солоноватой воды производительность мембран примерно одинаковая. Исключение составили результаты, полученные в [46] для группы олигомеров, относящихся к группе глубоких эвтектических растворителей (DES — deep eutectic solvent).

Глубокие эвтектические растворители — это разновидность ионных жидкостей, но являющаяся смесью нескольких компонентов (кислот и оснований) [48]. Чаще всего их получают комплексованием соли четвертичного аммония (хлорида холина) с солью металла или донором водородной связи (мочевина, глицерин, этиленгликоль, малоновая, щавелевая или уксусная кислоты), или соли металла с донором водородной связи. Они отличаются простым синтезом, нетоксичностью и главное — способностью к биологическому разложению, что важно при их утилизации [40, 48]. Растворы осмотических агентов типа DES, синтезированных на основе хлорида холина и итаконовой кислоты, смогли обеспечить поток через мембрану 10–15 л/м² ч для случаев обработки имитатов морских вод [46] и до 5 л/м² ч — при концентрации сточных вод [49]. Интересной особенностью последних разработок в этой области является создание на основе глубоких эвтектических растворителей “умных” гидрогелей, изменяющих свое состояние в зависимости от выбранного воздействия — света, тепла, величины pH, напряженности магнитного поля [50]. Термочувствительные гидрогели создаются путем сополимеризации DES и N-изопропилакриламида (NIPAM) [51].

Еще одно направление в области осмотических агентов — это использование магнитных наночастиц, синтезированных из оксидов железа (маггемит (γ -Fe₂O₃), магнетит (Fe₃O₄) и гематит (α -Fe₂O₃)) и покрытых пленкой на основе полиакриловой кислоты, 2-пирролидона, триэтиленгликоля, полиглицерина, полиакрилата натрия

или других полимерных соединений [33, 52–54]. Полимерная пленка стабилизирует коллоидные частицы, защищает оксидное ядро и за счет частичной ионизации полимерных групп увеличивает осмотическое давление, которое в основном зависит от поверхностного заряда наночастиц, их размера и гидрофильности [53, 55]. Размеры магнитных частиц в различных исследованиях варьируются от 1 до 200 нм, но оптимальным размером считается 15–20 нм [53]. И хотя эти частицы не являются электролитами, главным их преимуществом является чрезвычайно высокое отношение площади поверхности к объему и большие размеры сравнению с неорганическими солями и органическими молекулами, что облегчает их извлечение с использованием магнитных полей, а в ряде случаев — мембранными процессами низкого давления, такими как микро-, ультра- или нанофильтрация. Более того, суспензии таких наночастиц способны создавать очень высокое осмотическое давление, до 70 атм (для частиц на основе полиакриловой кислоты), что намного выше осмотического давления морской воды в 26 атм, что делает их очень привлекательными для опреснения [56]. Для создания такого высокого осмотического давления концентрация магнитных частиц в растворе должна достигать 25–33 мас. % [53, 57].

Так как мелкие (например, 5 нм) магнитные частицы труднее удерживаются магнитным полем, то для их временного укрупнения (агрегации) перед магнитной сепарацией предлагается использовать покрытия на основе термочувствительных полимеров, меняющих свою гидрофильность при изменении температуры [52, 57]. Последние могут активироваться не только прямым нагревом суспензии, но с помощью солнечного излучения, для это в состав ядра магнитных частиц вводят наночастицы серебра [52].

Еще одним способом отделения магнитных частиц путем их агрегации является продувка суспензии осмотического агента газами [52, 58]. Для этого магнитная наночастица покрывается ПАВ с гидрофобными алкильными цепями со свободными аминогруппами, которые вызывают агрегацию наночастиц в водном растворе. При продувке раствора CO_2 эти аминогруппы вступают в реакцию с CO_2 с образованием ионов алкиламмония, которые обеспечивают хорошую гидрофильность наночастиц для их диспергирования в воде [52]. Обратное восстановление гидрофильности наночастиц при регенерации суспензии осмотического агента осуществляется его продувкой азотом.

Эффективное и экономичное отделение остаточных количеств магнитных наночастиц от чистой воды остается проблемой и использование

ультрафильтрации здесь могло бы быть хорошим решением, но оно имеет ограничения, так как отдельные наночастицы и следовые количества полимера могут проходить в очищенную воду. В этой связи разрабатываются суспензии осмотического агента на основе углеродных нанотрубок, в которые внедрены частицы оксида железа (Fe_3O_4) и функционализированные карбоксильными группами, переведенными в соли калия [59]. Суспензии на основе таких модифицированных нанотрубок продемонстрировали высокое осмотическое давление при низких концентрациях (0.75–1 г/л), а их размер (диаметр — 4.5 мкм и длина — десятки мкм) позволяет легко отделять их остаточные количества от очищенной воды с помощью низконапорной микро- или ультрафильтрации [59].

Вместо магнитных наночастиц возможно использовать и немагнитные коллоидные частицы, для отделения которых использовать традиционные приемы сепарации, гидрогели с наполнителями из углеродных частиц или коллоидные частицы, растворимость которых очень чувствительна к температуре [33]. Высокую производительность прямого осмоса показал с осмотическими агентами на основе углеродных квантовых точек с карбоксильными функциональными группами в натрий-форме [52]. Углеродные квантовые точки имеют размеры менее 10–20 нм и обладают химической инертностью, гидрофильностью, стабильностью и характеризуются высоким осмотическим давлением, что обеспечивает высокий поток воды через мембрану при относительно низких концентрациях осмотического агента [60]. Их используют и в синтезе самих мембран прямого и обратного осмоса для формирования бездефектного, гладкого селективного слоя с высокой гидрофильностью, обеспечивающей большую производительность [61, 62]. Они могут обладать и другими интересными свойствами: например, углеродные квантовые точки, работающие как катализаторы или искусственные ферменты, вырабатывали радикалы кислорода для защиты мембран прямого осмоса от биообрастания [63].

В качестве раствора осмотического агента могут выступать концентраты обратноосмотических установок, и если это реализуется в одной установке, то это фактически “обычная” технология прямого осмоса, где обратноосмотическая установка работает в циркуляционном режиме и производит пресную воду [33]. Подобная схема была реализована компанией “Modern Water” на первой производственной установке производительностью 100 м³/сут в Эль-Халуфе (Оман) для опреснения воды Аравийского моря [64].

Поиск наиболее подходящего осмотического агента является сложной задачей, оптимального

решения не существует, так как потенциальные области применения прямого осмоса многообразны, что обуславливает и многообразие требований к свойствам осмотических агентов. Каждый год появляется такое множество сообщений об разработке новых рецептур или применении известных соединений, что даже простое их перечисление выходит за рамки данной статьи. Большинство описанных осмотических агентов еще находятся на стадии лабораторных испытаний из-за их высокой стоимости, низкой производительности основного процесса или малой эффективности при регенерации. Причем эффективность основного процесса (прямого осмоса) и энергозатраты на регенерацию являются ключевым фактором.

Например, полиэлектролиты хорошо задерживаются с помощью ультрафильтрации, которая считается экономичным низконапорным мембранным методом. Однако при той концентрации исходного раствора полиэлектролитов его осмотическое давление, которое помогает процессу прямого осмоса, так же мешает процессу ультрафильтрации, заставляя повышать рабочее давление до уровня, соответствующего давлению на обратноосмотических мембранах, разделяющих раствор осмотического агента на основе минеральных солей. Таким образом, переход на органический осмотический агент и ультрафильтрацию оказывается энергетически невыгодным [65].

Несмотря на большое число испытанных осмотических агентов, растворы на основе простых минеральных солей остаются наиболее популярными в применении. Это объясняется их двумя главными преимуществами: во-первых, растворы минеральных солей имеют достаточно высокое осмотическое давление и при этом, в отличие от растворов органических солей, высокомолекулярных соединений и суспензий коллоидов, имеют низкую вязкость, близкую к вязкости чистой воды. Это немаловажно как при мембранном разделении, так и при прямом осмосе, так как низкая вязкость обеспечивает более низкие гидравлические потери и лучшую перемешиваемость растворов у поверхности мембраны. Во-вторых, растворы минеральных солей имеют высокий коэффициент диффузии, что обеспечивает большой поток соли к поверхности мембраны прямого осмоса, где наблюдается эффект концентрационной поляризации: поток пресной воды, прошедшей через мембрану, разбавляет раствор осмотического агента в поверхностном слое и в крупнопористой подложке мембраны, снижая тем самым движущую силу процесса. К сожалению, коэффициент диффузии растворов на основе более крупных молекул или наночастиц гораздо ниже, что провоцирует концентрационную поляризацию, но их применение

имеет то неоспоримое преимущество, что обратный поток осмотического агента через мембрану прямого осмоса практически исключается. Однако с разработкой тонкопленочных композитных мембран, имеющих высокую селективность по минеральным солям, это преимущество значительно нивелируется [32, 33, 65]. Тем не менее простота и низкие затраты энергии на регенерацию раствора осмотического агента являются мощным стимулом исследований в области термочувствительных полимеров и магнитных наночастиц, а также гибридных осмотических агентов, что дает основание считать эти направления перспективными для опреснения морской воды прямым осмосом.

4. КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ ПРИ ПРЯМОМ ОСМОСЕ

Продолжая тему диффузии солей через мембрану прямого осмоса и явления концентрационной поляризации, сделаем еще несколько замечаний. Поток растворенного осмотического агента является важным параметром, который необходимо учитывать при оценке производительности основного процесса прямого осмоса. Обратная диффузия осмотического агента снижает фактическую разность осмотических давлений, что приводит к снижению потока через мембрану. Обратный поток осмотического агента не только приводит к его потере, но и усложняет утилизацию концентрата.

Поток воды в процессе прямого осмоса генерируется градиентом осмотического давления между исходной водой и раствором осмотического агента. Мембрана для прямого осмоса, как правило, асимметричная и состоит из двух слоев: тонкого плотного активного слоя, обеспечивающего селективность, и толстого крупнопористого поддерживающего слоя. Мембрана может ориентирована тонким селективным слоем либо к исходной воде (режим FO), либо к раствору осмотического агента (режим PRO). В зависимости от ее ориентации, в мембране и вблизи ее поверхности наблюдаются различные профили концентрации растворенных веществ (рис. 2) [66–69]. Здесь различают наружную концентрационную поляризацию (ECP), которая имеет место с обеих сторон мембраны, и внутреннюю концентрационную поляризацию (ICP), которая наблюдается в поддерживающем крупнопористом слое. Причем последняя более критична для процесса, так как она значительно выражена и на нее не влияет стандартный технический прием борьбы с внешней концентрационной поляризацией — активное перемешивание жидкости в примембранном слое [66]. Фактически внутренняя концентрационная

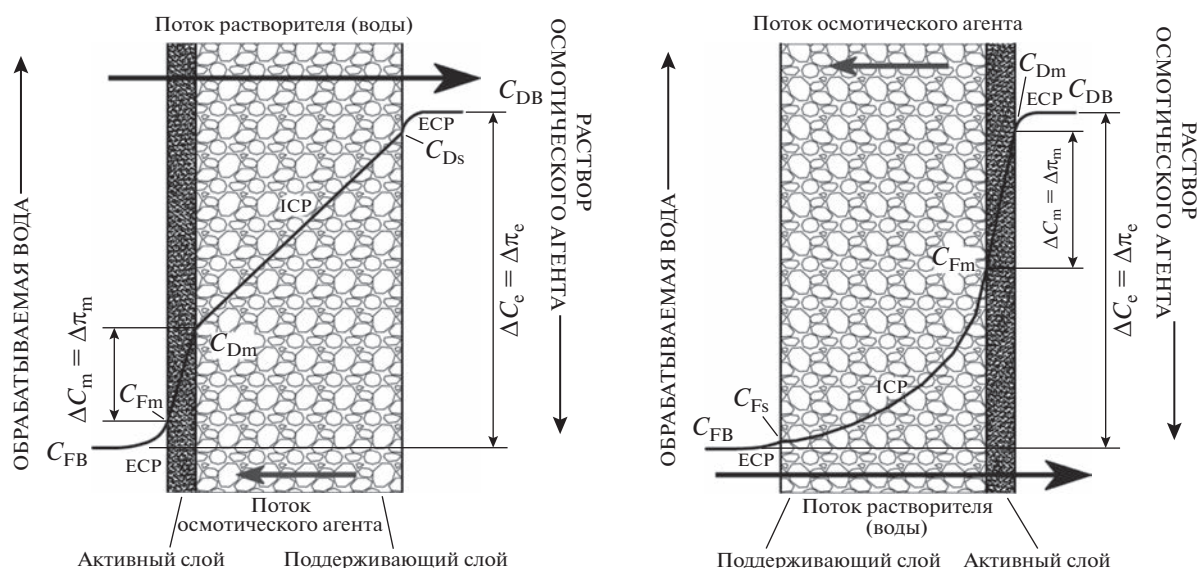


Рис. 2. Профили концентраций растворенных веществ при разной ориентации мембраны прямого осмоса. Концентрации: C_{FB} – в исходной воде, C_{DB} – в растворе осмотического агента, C_{Fm} , C_{Dm} – у поверхности активного слоя со стороны обрабатываемой воды или раствора осмотического агента соответственно, C_{Fs} , C_{Ds} – у поверхности поддерживающего слоя со стороны обрабатываемой воды или раствора осмотического агента соответственно, ΔC_e , $\Delta \pi_e$ – разность концентраций и осмотических давлений между раствором осмотического агента и исходной водой, ΔC_m , $\Delta \pi_m$ – разность концентраций и осмотических давлений на активном слое мембраны. Обозначения взяты из [28].

поляризация возникает из-за высокой проницаемости крупнопористого слоя, как для растворителя, так и для растворенных веществ. Поток растворенного вещества (прямой, совместно с исходной водой, или обратный, за счет диффузии осмотического агента), встречая на своем пути плотный активный слой, задерживается и за счет затрудненной диффузии обратно в основной объем раствора накапливается у поверхности плотного слоя (рис. 2). Наличие с наружной стороны активного слоя мембраны внешней концентрационной поляризации, хотя и не такой выраженной, как внутренней, тоже оказывает негативное влияние на производительность процесса и в свою очередь требует мер противодействия.

Расположение мембраны существенно влияет на ее производительность. Так при экспериментах на модельных растворах NaCl было обнаружено, что более высокий поток через мембрану наблюдался при ориентации мембраны активным слоем к раствору осмотического агента, чем наоборот [66]. Кроме того, свойства осмотического агента, его молекулярный вес и вязкость раствора, оказывали существенное влияние на величину внутренней концентрационной поляризации и, следовательно, на поток через мембрану, величина которого при различной ориентации мембраны изменялась в несколько раз [66].

Для более полного понимания процессов, происходящих у поверхности и внутри мембраны, исследователи прибегают как к различным инструментам (Рамановская спектроскопия, рентгенодифракционный анализ, магнитно-резонансная томография, оптическая когерентная томография, лазерно-индуцированная флуоресценция и др.), позволяющим визуализировать профили концентрации и процессы загрязнения мембран [70], так и к экспериментальному и численному моделированию [71–73]. Помимо описанных выше методов для минимизации концентрационной поляризации и загрязнения мембран изучается воздействие ультразвука [70, 74, 75].

5. МЕМБРАНЫ ДЛЯ ПРЯМОГО ОСМОСА

В связи с вышесказанным большой простор для исследований представляет выбор типа и конфигурации мембран для прямого осмоса. Идеальные мембраны должны иметь активный слой высокой селективности, тонкий несущий слой (подложку) с минимальной пористостью для ограничения внутренней концентрационной поляризации и гидрофильными свойствами для увеличения потока и минимизации загрязнения мембраны. Для прямого осмоса используют ассиметричные мембраны из триацетата целлюлозы и композитные мембраны из ароматического полиамида, полисульфона, полиэтерсульфона, поли-

амид-имида и многих других соединений [76, 77]. Мембраны на основе триацетата целлюлозы, мало используемые в наши дни в обратном осмосе, получили “второе дыхание”, так как обладают нужными гидрофильными свойствами. Для снижения их гидравлического сопротивления их отливают прямо на специальной сетке из нетканого или тканого полимерного материала, что дает возможность уменьшить их толщину до 50 мкм и получить такую же проницаемость, как и у композитных мембран [69, 78].

Для улучшения эксплуатационных свойств мембран, придания композитным мембранам гидрофильных свойств, увеличения селективности и проницаемости применяют цвиттерионные полимеры, проводят модификацию активного слоя мембран с помощью поливинилового спирта (PVA), глутаральдегида (GA), полиэтиленimina (PEI), полистиролсульфоната натрия (PSS), поли(этиленгликоль) диглицидилового эфира (PEGDE), этилендиамина (EDA), а также графена, нанонитей, нанопленок, нанотрубок, наночастиц и углеродных квантовых точек [61–63, 69, 76, 79, 80]. Для модификации крупнопористого поддерживающего слоя с целью уменьшения размера пор и придания им гидрофильных свойств применяют дофамин, аквапорины (аквапорин Z), заряженный сверхразветвленный полиглицерин (CHPG), цвиттерионные полимеры [76]. Упомянутые выше ионные жидкости также находят свое применение при синтезе мембран прямого осмоса [81, 82]. Для снижения гидравлического сопротивления селективного слоя в него вводят полимерные или минеральные мезопористые наносферы [83, 84].

Важная задача при синтезе мембран — это создание бездефектного селективного слоя на крупнопористой подложке. Одним из новых решений является добавление углеродных квантовых точек в водный раствор при формировании селективного слоя методом межфазной поляризации [62, 80]. Другое решение — это синтез межслойных композитных мембран, где некий промежуточный слой наносится на подложку перед формированием тонкой пленки. Для формирования промежуточного слоя используют оксид графена [85, 86], углеродные [87, 88] и галлуазитовые [89] нанотрубки, наночастицы других форм, а также межфазные покрытия, например, на основе комплекса железа с дубильной кислотой [90], альгината натрия [91] и других соединений.

Одним из новых направлений в синтезе композитных мембран, которое находит свое применение и для изготовления мембран для прямого осмоса — это послойное нанесение, то есть многократное повторение операций по формированию микрослоев промежуточного [91] или селек-

тивного [61, 92] слоя мембраны, что обеспечивает получение заданных характеристик и его минимальной толщины.

В качестве решения по борьбе с внутренней концентрационной поляризацией были разработаны мембраны с двумя активными слоями — внутренним и наружным. Так в работе [93] описывается создание полуволоконных мембран из полиамид-имида с внутренним обратноосмотическим слоем и внешним нанофильтрационным слоем. Испытания мембраны показали, что лучшая производительность обеспечивается, когда обратноосмотический слой обращен к раствору осмотического агента. Весьма подробную информацию о достижениях в области синтеза мембран для прямого осмоса можно найти в обзоре [94]. В заключении авторы обзора делают вывод, что несмотря на огромное количество имеющихся разработок, большинство из них не достигло коммерческой стадии: производство мембран прямого осмоса с нужными для широкого промышленного внедрения характеристиками пока еще сложно и недешево.

Среди компаний, производящих мембраны для прямого осмоса, известны Asahi Kasei, Aquaporin, Berghof Membranes Technology, Fluid Technology Solutions, Koch Membrane Systems, Hydration Technology Innovations, Porifera, SideStroem Water Technologies, Toray, Toyobo и др. [78, 94]. Мембраны выпускаются двух типов: плоские и полуволоконные. Необходимость создавать проточный режим как для исходной воды, так и для раствора осмотического агента, формирует определенные требования в конструкции мембранных аппаратов прямого осмоса, поэтому обычные аппараты рулонного типа здесь не подходят [26]. Кроме того, рулонные элементы не выдерживают больших давлений со стороны пермеата, которые могут возникать при некоторых режимах работы прямого осмоса. Первая проблема решается довольно простым путем (рис. 3): внутри мембранного пакета делается по центру дополнительный клеевой шов, не доходящий края пакета, а центральную трубку разделяют на две изолированные части [95, 96]. Разрабатываются и более сложные конструкции, например, в [97] описывается рулонный элемент, где входящие потоки направляются с противоположных торцов рулона, а оба выходящих потока отводятся по центральной трубке, которая имеет раздельные каналы для потоков исходной воды и раствора осмотического агента, соединенные с соответствующими дренажными сетками. В настоящее время на рынке сосуществуют и плоскорулонные аппараты с листовыми мембранами, и аппараты с трубчатыми и полуволоконными мембранами, и рулонные элементы [26, 78].

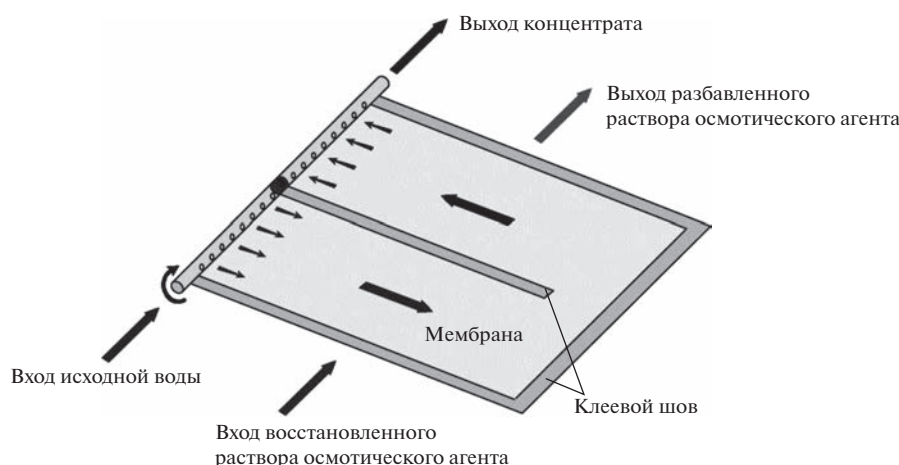


Рис. 3. Принцип организации потоков в мембранном рулонном элементе для прямого осмоса [34].

6. ЗАГРЯЗНЕНИЕ МЕМБРАН ПРЯМОГО ОСМОСА

Особенности процесса прямого осмоса влияют и на особенности загрязнения мембран. В основном поток через мембрану при прямом осмосе падает в результате снижения осмотического давления за счет концентрационной поляризации, чем от отложения различных осадков на мембране, как при обратном осмосе [98]. Отмечается, что интенсивность образования отложений на мембранах при прямом осмосе меньше, а их удаление осуществляется легче, чем при обратном осмосе, так как образующиеся отложения обладают более рыхлой структурой [65, 98, 99]. До определенной степени это справедливо, но по мере совершенствования процесса и увеличения достижимых потоков воды через мембраны интенсивность их загрязнения возрастает [100].

Известные приемы используются для снижения интенсивности загрязнения: увеличение скорости и турбулентности потока у поверхности мембраны [98], пульсация потока, аэрация, химическая модификация мембран [37, 65, 101]. Температура потоков влияет при прямом осмосе не только на удельную производительность мембраны, но и на интенсивность ее загрязнения [37, 65]. Особую роль имеет борьба с внутренней концентрационной поляризацией, и здесь, как уже упоминалось выше, основное значение имеет ориентация мембраны и ее строение.

Особенностью прямого осмоса является наличие с обеих сторон мембраны концентрированных растворов, содержащих набор веществ, которые при проникновении на противоположную сторону могут вызывать осаждение малорастворимых солей и органических соединений, биообрастание [102]. Такие вещества называют в лите-

ратуре прекурсорами загрязнения. Этот фактор требуется учитывать при выборе осмотических агентов. В целом исследователями делается вывод, что прямой осмос меньше подвержен загрязнению малорастворимыми солями и коллоидными загрязнениями, но органические отложения (например, биополимеры, состоящие из белков и полисахаридов) и биообрастание представляют большую опасность [78, 103, 104]. При очистке "тяжелых" вод на мембранах все же может образовываться большое количество осадка, так, например, при сточных вод от десульфурации дымовых газов мембраны прямого осмоса были сильно загрязнены отложениями гипса [105].

Часто достаточными мерами по очистке мембран и восстановлению их проницаемости служат гидравлические промывки: прямая тангенциальная промывка с увеличенной скоростью потока или обратная промывка (т.н. осмотическая промывка) [104, 106, 107]. При необходимости, в том числе при накоплении загрязнений в поддерживающем слое, используются химические промывки соответствующими реагентами: кислотами, щелочами, детергентами, окислителями. Для случаев, когда гидравлических и химических промывок оказывается недостаточно или же их осуществление ограничивается возможным повреждением мембраны, разрабатываются более интенсивные методы очистки: водо-воздушная промывка, электрохимическое окисление, фотокатализ, ультразвук [102, 106]. Для увеличения производительности мембраны также применяют приложение небольшого (менее 10 атм) давления со стороны исходной воды, такая модификация процесса получила название "осмос под давлением" (PFO — Pressure-assisted osmosis) [102].

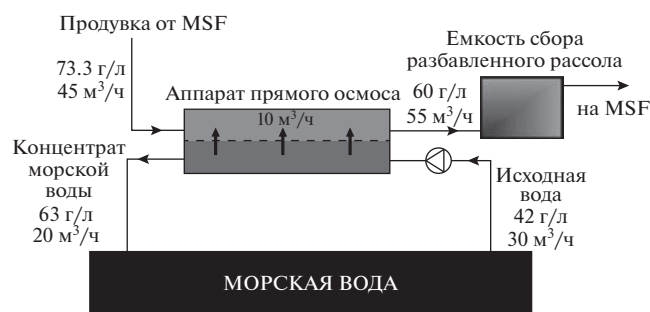


Рис. 4. Технологическая схема работы прямого осмоса в качестве предочистки перед многоступенчатой установкой мгновенного вскипания (MSF) [28].

7. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРЯМОГО ОСМОСА

Технология прямого осмоса испытывается в самых различных областях: опреснение воды в качестве основной ступени или в качестве предварительной ступени перед мембранным или термическим обессоливанием (рис. 4), очистка городских и производственных сточных вод, ирригация, обработка концентратов обратного осмоса, подготовка пластовой воды, очистка буровых растворов, очистка фильтратов ТБО, пищевое и химическое производство [27, 28, 69, 76]. Как правило, сточные воды используются в качестве исходной воды, а в качестве раствора осмотического агента выступает морская или солоноватая вода. Сточные воды концентрируются для интенсификации последующей их очистки, а разбавленная соленая вода направляется для дальнейшего опреснения или обессоливания (рис. 5) [26, 27, 103, 108]. Такая совместная обработка позволяет уменьшить энергозатраты на опреснение морской воды. При очистке бытовых сточных вод, на основе прямого осмоса (аналогично использованию обратного осмоса) можно создавать системы повторного использования воды, в том числе для непрямого (за-

воднение источников водоснабжения) и прямого питьевого водоснабжения. Есть сообщения об исследованиях по созданию замкнутых систем водоснабжения для космических летательных аппаратов на основе совместного применения прямого и обратного осмоса [26]. Прямой осмос можно использовать как метод обезвоживания осадков сточных вод и активного ила на очистных сооружениях или обезвоживания суспензии водорослей при производстве биотоплива [27, 101]. В последнее десятилетие изучается возможность использования прямого осмоса вместо ультрафильтрации в мембранных биореакторах [27].

Большая сфера применения прямого осмоса — это пищевая промышленность. Мембранные технологии помогают концентрировать и извлекать многие продукты, такие как виноградный, ананасовый, малиновый, апельсиновый, томатный соки, натуральные пищевые красители (экстракт гарцинии индики, свекольный сок, красная редька и т.д.), сывороточные белки, сахара, органические и жирные кислоты, неорганические соли, этанол, микроводоросли, патоку и многое другое [69].

8. ПРИМЕРЫ ВНЕДРЕНИЯ

Необходимо признать, что до настоящего времени прямой осмос — это все еще во многом лабораторная технология, проходящая пилотные и полупроизводственные испытания, но не вышедшая пока на большой коммерческий уровень. Тем не менее, приведем здесь некоторые, наиболее яркие и известные примеры внедренных проектов.

В 1998–1999 гг. компанией Osmotek (США) довольно успешно была испытана сначала пилотная, а потом и полноразмерная (около 60 м³/сут) установка по очистке дренажных вод полигона ТБО [26]. К сожалению, активность данной компании в настоящее время не прослеживается. Первые демонстрационные установки опреснения морской воды производительностью 100 м³/ч

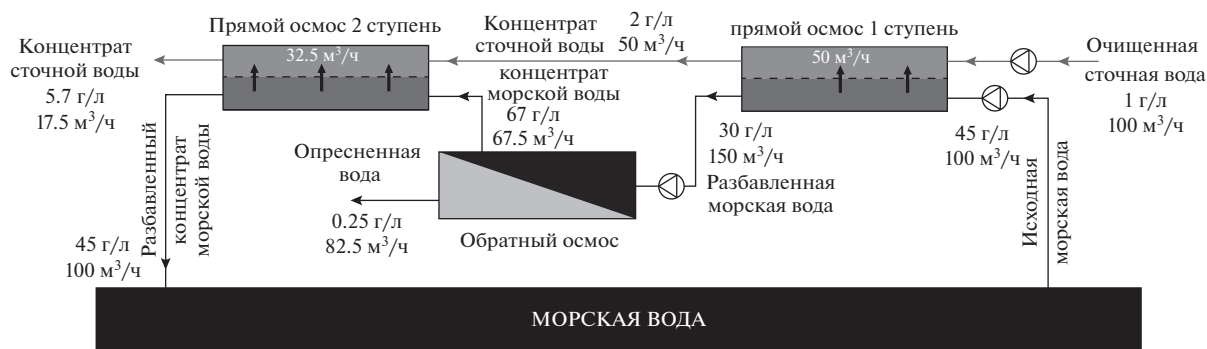


Рис. 5. Технологическая схема гибридной установки по получению обессоленной воды при совместном использовании морской воды и очищенных городских сточных вод [28].

были представлены компанией “Modern Water” (Великобритания) в 2008 г. в Гибралтаре и в 2010 г. в Омане [64]. Затем в 2012 г. в Омане была запущена вторая установка мощностью 200 м³/сут. В 2009 г. компанией НТИ (США) была продемонстрирована установка производительностью 926.67 м³/сут по очистке буровых сточных вод для последующего их использования как жидкости для гидродобычи пласта [103]. Компанией “Oasys Water” (США) в 2016 г. была внедрена бессточная система обработки сточных вод после сооружений очистки серосодержащих дымовых газов угольной электростанции в Китае (Changxing Power Plant) производительностью 650 м³/сут [109]. Для стадии прямого осмоса используется осмотический агент на основе смеси бикарбоната и гидроксида аммония, а обессоленная вода направляется для подпитки котлов электростанции. Несмотря на первые успехи, около 5 лет назад компания “Oasys Water” была вынуждена закрыть свой бизнес [110], а мембранное подразделение компании “Modern Water” на момент реализации описанных проектов оставалось убыточным [111].

Китайской компанией “Hangzhou Water Treatment Technology” (HWTТ) совместно с Восточно-Китайским университетом науки и техники и компанией “Modern Water” ведутся разработки по опреснению морской воды. И после многих лет лабораторных и экспериментальных исследований в 2018 г. на островах Чжоушань (Китай) был введен в эксплуатацию первый демонстрационный проект по опреснению морской воды производительностью 500 м³/сут [112]. Южно-Корейский исследовательский центр гибридного опреснения прямым и обратным осмосом (ФОНС) и компания “Hyogim Industries” в 2019 г. запустили крупнейший на сегодняшний день пилотный проект по опреснению морской воды производительностью 1000 м³/сут, где прямой осмос (использованы мембранные аппараты компании “Porifera”) выступает в качестве предочистки перед обратным осмосом [113]. Результаты эксплуатации показали, что замена схемы “микрофльтрация—обратный осмос” на схему “прямой осмос—обратный осмос” дает 25%-ную экономию электроэнергии на опреснение.

9. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИИ ПРЯМОГО ОСМОСА ДЛЯ ОПРЕСНЕНИЯ И ОБЕССОЛИВАНИЯ ВОДЫ

Решающим фактором индустриального внедрения прямого осмоса будет экономическая выгода в сравнении с существующими технологиями. Как было показано на пилотном проекте, ре-

ализованном в Южной Корее, экономия затрат на электроэнергию вполне достижима: здесь был получен расход всего 2.16 кВт ч на 1 м³ [113]. К сожалению, остальные затраты в публикации не раскрываются, а между тем, капитальные затраты на гибридные установки обессоливания воды прямым и обратным осмосом в целом выше, чем на установки обратного осмоса [27]. Это объясняется более низкой удельной производительностью мембран на обеих стадиях процесса и соответственно существенным увеличением количества мембранных аппаратов и сопутствующей арматуры, трубопроводов и т.п.

В различных публикациях, использующих результаты как натурных экспериментов, так и теоретических расчетов, приводятся часто противоречащие данные. Затраты электроэнергии на опреснение морской воды с применением прямого осмоса в [27] оцениваются в 2.4–3.0 кВт ч/м³ для гибридной схемы и в 1.3–1.5 кВт ч/м³ при использовании очищенных сточных вод, что выглядит вполне конкурентоспособно. При этом на саму стадию прямого осмоса приходится ничтожные энергозатраты: от 0.01 до 0.1 кВт ч/м³. Теоретические расчеты, выполненные для солоноватой воды при сравнении схем прямого и обратного осмоса, показали экономию электроэнергии более 87% [114]. Проведенное в [115] технико-экономическое сравнение прямого осмоса и нанофльтрации как стадии предварительной подготовки воды перед многоступенчатыми установками мгновенного вскипания, продемонстрировало преимущество прямого осмоса: себестоимость подготовленной воды с помощью прямого осмоса составила 0.48 \$/м³ против 0.55 \$/м³ для нанофльтрации.

Энергетическая оценка обратного и прямого осмоса для обессоливания морской воды, проведенная в [116], напротив, показала более высокие затраты на схему “прямой осмос—обратный осмос” (3.58 кВт ч/м³) в сравнении со схемой двухступенчатого обратного осмоса (3.00 кВт ч/м³). Основные энергетические затраты в схемах относятся к стадии регенерации и к первой ступени обратноосмотического обессоливания соответственно. При этом при обработке одной и той же морской воды и при использовании в качестве осмотического агента минеральной соли, обратный осмос на стадии регенерации будет работать при большем давлении и/или с меньшей производительностью, чем на первой ступени классического обессоливания. Это естественно приводит к увеличению затрат электроэнергии. Отсутствие осадкообразующих солей, коллоидных и органических примесей в растворе осмотического агента, возможное повышение температуры раствора

и другие технические приемы не смогут настолько повысить среднюю производительность мембран, чтобы в сумме компенсировать эту разницу. Авторы делают вывод, что экономически выгодным прямой осмос может стать только при обработке воды с таким высоким содержанием, при котором непосредственное применение обратного осмоса будет затруднительно, а регенерацию раствора осмотического агента при этом надо проводить термическим способом или с помощью нанофильтрации [116]. При этом следует отметить, что с прямым осмосом в области обработки рассолов конкурируют такие технологии как электродиализ (в качестве первой ступени по снижению содержания), обратный осмос с осмотической поддержкой и обессоливание экстракцией растворителем, которые могут оказаться энергетически более выгодными [29].

К похожим выводам приходят и авторы статьи [117], где сравнивались схемы обессоливания прямым и обратным осмосом и различные варианты регенерации раствора осмотического агента, включая обратный осмос, ультра- и нанофильтрацию. Расчеты показали примерно равные энергозатраты на прямой и обратный осмос, за исключением схемы с термической регенерацией осмотического агента на основе аммиака и углекислого газа, которая оказалась в 2 раза менее затратной, чем наиболее экономичная из рассматриваемых мембранных схем регенерации. К сожалению, при использовании этого осмотического агента возникает проблема с повышенным содержанием ионов аммония в опресненной воде. Она может быть решена применением селективных ионообменных смол, но эта ступень усложняет и удорожает всю схему.

В [118] проводилась экспериментальная и технико-экономическая оценка технологии, где в качестве исходной воды и раствора осмотического агента используются доочищенная сточная вода и морская вода соответственно, а разбавленная морская вода затем доопресняется на обратном осмосе. Расчеты показали, что при таком подходе возможно снизить энергозатраты примерно на 50% (до 1.5 кВт ч/м³) по сравнению с традиционным обратноосмотическим обессоливанием морской воды, однако себестоимость воды для схемы с прямым осмосом все равно получилась выше (~0.91 \$/м³ против 0.77 \$/м³), что связано с низкой удельной проницаемостью мембран прямого осмоса. Анализ затрат показал, что для конкуренции с обратным осмосом необходим минимальный средний расход 10.5 л/м² ч [118].

В исследовании 2012 г. [119] говорится, что при использовании прямого осмоса для получения опресненной воды с низким содержанием бора

можно снизить энергозатраты на 25% по сравнению с двухступенчатым обратным осмосом. Вместе с тем, расчеты суммарной площади поверхности мембран показали, что для схемы “прямой осмос—обратный осмос” требуется в 13 раз большая площадь, чем для схемы с двухступенчатым обратным осмосом. И хотя со времени написания этой статьи прошло 10 лет, и производство мембран прямого осмоса шагнуло вперед [120, 121], их реальная производительность по-прежнему остается ниже, чем у обратноосмотических мембран. Данные расчеты еще раз подтверждают важность работ по совершенствованию синтеза мембран и снижения их себестоимости.

Ряд пессимистичных экономических и энергетических расчетов возвращают и к мысли о поиске более экономичного метода регенерации раствора осмотического агента, который пока еще не найден. Определенные надежды ученые возлагают на комбинированные органические осмотические агенты, регенерируемые при небольшом повышении температуры и изменении напряженности магнитного поля [43, 54, 78].

10. ВЫВОДЫ

Ключевой вопрос, связанный с технологией прямого осмоса — это какие перспективы имеет этот процесс и что мешает его широкой коммерциализации? Как показывает огромный объем исследований, проведенных за последние 10–15 лет, и первые, достаточно успешные, пилотные установки, эта технология, несомненно, будет развиваться, и мы можем ожидать устойчивый рост интереса к ней в водной индустрии. Сравнивая исторический путь прямого осмоса с становлением другого, относительно нового мембранного метода — мембранными биореакторами, можно заметить, что последние опережают в своем развитии как минимум на 10–15 лет, поэтому, проводя аналогию, начало промышленного внедрения можно прогнозировать через 5–10 лет. В настоящее время прямой осмос находится на этапе крупных пилотных проектов, цель которых — доказать его состоятельность и конкурентоспособность. Водная отрасль достаточно консервативна, для принятия решения о внедрении нового оборудования требуется накопить массив референтных пилотных проектов, а их сейчас не так много для уверенного ответа о надежности и экономической выгоде предлагаемой технологии.

Среди технических ограничений можно выделить несколько:

— рецептура и процесс регенерации растворов осмотических агентов до сих пор не достигли нужной степени совершенства, работы в этом направлении ведутся очень активно. Между тем,

стадия регенерации является наиболее энергозатратной в рассматриваемой технологии и вносит основной вклад в эксплуатационные затраты. В целом у специалистов есть понимание, для каких областей применения и в каких схемах следует использовать тот или иной раствор, но требуется еще время для отработки технологических режимов и сокращения потерь и отходов осмотического агента при его регенерации;

— производство коммерческих модулей для прямого осмоса пока делает только первые шаги, многие упомянутые в обзоре компании выпускают лишь малые партии мембран для лабораторных и пилотных проектов. Разработано большое количество видов мембран, но их изготовление остается дорогостоящим, что затрудняет их использование в крупных установках. Стоимость мембранных аппаратов пока еще составляет существенную часть капитальных затрат для прямого осмоса и от нее зависит конкурентоспособность новой технологии. В этой связи повышение проницаемости мембран прямого осмоса и снижение их стоимости играет важную роль в сокращении капитальных затрат;

— как и при обратном осмосе, поток исходной воды превращается в концентрат, который необходимо утилизировать. Здесь применимы те же подходы, что и в обратноосмотическом обессоливании, и эта проблема не представляется критической, кроме того сама технология прямого осмоса позволяет получить более концентрированный раскол для его последующего обезвоживания;

— по причине новизны технологии, многие процедуры эксплуатации установок прямого осмоса недостаточно отработаны, для их обоснованной регламентации опыта работы на новом оборудовании пока накоплено недостаточно. Эта проблема тоже не критическая и со временем будет решена.

Очевидно, что приведенные ограничения преодолимы в ближайшей или среднесрочной перспективе, что дает нам надежду на появления в нашем арсенале еще одного полезного инструмента для экологичного и экономичного решения задач водоподготовки и очистки сточных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Curto D., Franzitta V., Guercio A.* A Review of the Water Desalination Technologies // *Applied Sciences*. 2021. V. 11. P. 670.
2. *Jones E., Qadir M., van Vliet M.T.H., Smakhtin V., Kang S.* The state of desalination and brine production: A global outlook // *Science of The Total Environment*. 2019. V. 657. P. 1343–1356.
3. *Zapata-Sierra A., Cascajares M., Alcayde A., Manzano-Agugliaro F.* Worldwide research trends on desalination // *Desalination*. 2022. V. 519. P. 115305.
4. *Федоренко В.И.* Новая технология — прямой осмос // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2013. № 12 (72). С. 26–30. (*Fedorenko V.I.* Novaya tekhnologiya — pryamoj osmos // *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2013. № 12 (72). P. 26–30.)
5. *Труберг А.А., Лапшинов И.Ф., Ляпин И.Ф., Носырев М.А., Силос О.В., Терпугов Г.В., Терпугов Д.Г.* Прямой осмос и возможности его применения // *Успехи в химии и химической технологии*. 2010. Т. 24. № 2 (107). С. 35–40. (*Truberg A.A., Lapshinov I.F., Lyapin I.F., Nosyrev M.A., Silos O.V., Terpugov G.V., Terpugov D.G.* Pryamoj osmos i vozmozhnosti ego primeneniya // *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii*. 2010. V. 24. № 2 (107). P. 35–40.)
6. *Андрианов А.П., Чухин В.А.* Обессоливание воды прямым осмосом // *Вода Magazine*. 2015. № 7 (95). С. 24–27. (*Andrianov A.P., Chuhin V.A.* Obessolivanie vody pryamym osmosom // *Voda Magazine*. 2015. № 7 (95). P. 24–27.)
7. *Dubrunfaut A.P.* Improved process of purifying saccharine liquids. Патент № US43065A. США. Оpubл. 07.06.1964.
8. *Farago A.* Verfahren zur Konzentrierung von Lösungen ohne Erhitzung. Патент № DE222277C. Германия. Оpubл. 02.06.1909.
9. *Reid A.F.* Process of concentration of solutes. Патент № US3097076A. США. Заяв. 07.03.1958. Оpubл. 09.07.1963.
10. *Bachelder G.W.* Process for the Demineralization of Water. Патент № US3171799A. США. Заяв. 28.08.1962. Оpubл. 02.03.1965.
11. *Kravath R.E., Davis J.A.* Desalination of sea water by direct osmosis // *Desalination*. 1975. V. 16. Iss. 2. P. 151–155.
12. *Loeb S., Bloch M.R.* Countercurrent flow osmotic processes for the production of solutions having a high osmotic pressure // *Desalination*. 1973. V. 13. Iss. 2. P. 207–215.
13. *Loeb S., Van Hessen F., Shahaf D.* Production of energy from concentrated brines by pressure-retarded osmosis: II. Experimental results and projected energy costs // *Journal of Membrane Science*. 1976. V. 1. P. 249–269.
14. *Kessler J.O., Moody C.D.* Drinking water from sea water by forward osmosis // *Desalination*. 1976. V. 18. Iss. 3. P. 297–306.
15. *Nassrullah H., Anis S.F., Hashaikeh R., Hilal N.* Energy for desalination: A state-of-the-art review // *Desalination*. 2020. V. 491. P. 114569.
16. *Subramani A., Jacangelo J.G.* Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review // *Water Research*. 2015. V. 75. P. 164–187.
17. *Bundschuh J., Kaczmareczyk M., Ghaffour N., Tomaszewska B.* State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects // *Desalination*. 2021. V. 508. P. 115035.

18. *Aaberg R.J.* Osmotic power: A new and powerful renewable energy source? // *Refocus*. 2003. V. 4. Iss. 6. P. 48–50.
19. *Sarp S., Li Z., Saththasivam J.* Pressure Retarded Osmosis (PRO): Past experiences, current developments and future prospects // *Desalination*. 2016. V. 389. P. 2–14.
20. *Wang Z., Wang L., Elimelech M.* Viability of Harvesting Salinity Gradient (Blue) Energy by Nanopore-Based Osmotic Power Generation // *Engineering*. 2022. V. 9. P. 51–60.
21. *Al-Karaghoul A., Kazmerski L.L.* Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. V. 24. P. 343–356.
22. *Ahmed F.E., Hashaikeh R., Hilal N.* Hybrid technologies: The future of energy efficient desalination – A review // *Desalination*. 2020. V. 495. P. 114659.
23. *Amy G., Ghaffour N., Li Z., Francis L., Valladares Linares R., Missimer T., Lattemann S.* Membrane-based seawater desalination: Present and future prospects // *Desalination*. 2017. V. 401. P. 16–21.
24. *Park K., Davies P.A.* A compact hybrid batch/semi-batch reverse osmosis (HBSRO) system for high-recovery, low-energy desalination // *Desalination*. 2021. V. 504. P. 114976.
25. *Moon A.S., Lee M.* Energy consumption in forward osmosis-desalination compared to other desalination techniques // *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012. V. 65. P. 537–539.
26. *Cath T.Y., Childress A.E., Elimelech M.* Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments // *J. Membrane Science*. 2006. V. 281. Iss. 1–2. P. 70–87.
27. *Valladares Linares R., Li Z., Sarp S., Bucs Sz.S., Amy G., Vrouwenvelder J.S.* Forward osmosis niches in seawater desalination and wastewater reuse // *Water Research*. 2014. V. 66. P. 122–139.
28. *Al-Furaiji M., Benes N., Nijmeijer A., McCutcheon J.R.* Use of a forward osmosis–membrane distillation integrated process in the treatment of high-salinity oily wastewater // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. V. 58. Iss. 2. P. 956–962.
29. *Shah K.M., Billinge I.H., Chen X., Fan H., Huang Y., Winton R.K., Yip N.Y.* Drivers, challenges, and emerging technologies for desalination of high-salinity brines: A critical review // *Desalination*. 2022. V. 538. P. 115827.
30. *Bartholomew T.V., Mey L., Arena J.T., Siefert N.S., Mauter M.S.* Osmotically assisted reverse osmosis for high salinity brine treatment // *Desalination*. 2017. V. 421. P. 3–11.
31. *Chen X., Yip N.Y.* Unlocking high-salinity desalination with cascading osmotically mediated reverse osmosis: energy and operating pressure analysis // *Environmental Science & Technology*. 2018. V. 52 (4). P. 2242–2250.
32. *Johnson D.J., Suwaileh W.A., Mohammed A.W., Hilal N.* Osmotic's potential: An overview of draw solutes for forward osmosis // *Desalination*. 2018. V. 434. P. 100–120.
33. *Chekli L., Phuntsho S., Shon H.K., Vigneswaran S., Kandasamy J., Chanan A.* A review of draw solutes in forward osmosis process and their use in modern applications // *Desalination and Water Treatment*. 2012. V. 43. Iss. 1–3. P. 167–184.
34. *McCutcheon J.R., McGinnis R.L., Elimelech M.* A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process // *Desalination*. 2005. V. 174. P. 1–11.
35. *Achilli A., Cath T.Y., Childress A.E.* Selection of inorganic-based draw solutions for forward osmosis applications // *J. Membrane Science*. 2010. V. 364. Iss. 1–2. P. 233–241.
36. *Chekli L., Kim Y., Phuntsho S., Li S., Ghaffour N., Leiknes T., Shon H.K.* Evaluation of fertilizer-drawn forward osmosis for sustainable agriculture and water reuse in arid regions // *J. Environmental Management*. 2017. V. 187. P. 137–145.
37. *Dsilva Winfred Rufuss D., Kapoor V., Arulvel S., Davies P.A.* Advances in forward osmosis (FO) technology for enhanced efficiency and output: A critical review // *J. Cleaner Production*. 2022. V. 356. P. 131769.
38. *Zhang K., Li F., Wu Y., Feng L., Zhang L.* Construction of ionic thermo-responsive PNIPAM/ γ -PGA/PEG hydrogel as a draw agent for enhanced forward-osmosis desalination // *Desalination*. 2020. V. 495. P. 114667.
39. *Ahmed M., Kumar R., Garudachari B., Thomas J.P.* Performance evaluation of a thermoresponsive polyelectrolyte draw solution in a pilot scale forward osmosis seawater desalination system // *Desalination*. 2019. V. 452. P. 132–140.
40. *Dutta S., Nath K.* Prospect of ionic liquids and deep eutectic solvents as new generation draw solution in forward osmosis process // *J. Water Process Engineering*. 2018. V. 21. P. 163–176.
41. *Takahashi T., Akiya K., Nüzeki T., Matsumoto M., Hoshina T.* Tunable thermoresponsive UCST-type alkylimidazolium ionic liquids as a draw solution in the forward osmosis process // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. V. 639. P. 128372.
42. *Zhong Y., Feng X., Chen W., Wang X., Huang K.-W., Gnanou Y., Lai Z.* Using UCST Ionic liquid as a draw solute in forward osmosis to treat high-salinity water // *Environmental Science & Technology*. 2016. V. 50 (2). P. 1039–1045.
43. *Reddy A.S., Wanjari V.P., Singh S.P.* Design, synthesis, and application of thermally responsive draw solutes for sustainable forward osmosis desalination: A review // *Chemosphere*. 2023. V. 317. P. 137790.
44. *Xu Y., Wang Y.-N., Chong J.Y., Wang R.* Thermo-responsive nonionic amphiphilic copolymers as draw solutes in forward osmosis process for high-salinity water reclamation // *Water Research*. 2022. V. 221. P. 118768.
45. *Inada A., Yumiya K., Kumagai K., Matsuyama H.* Effect of branch structure of thermoresponsive oligomers

- on draw solution performance in forward osmosis process // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2021. V. 609. P. 125659.
46. *Shokrollahzadeh S., Bide Y., Gholami S.* Enhancing forward osmosis performance via an oligomeric deep eutectic solvent as a draw solute // *Desalination*. 2020. V. 491. P. 114473.
 47. *Kamio E., Kurisu H., Takahashi T., Matsuoka A., Yoshioka T., Nakagawa K., Sun Y., Matsuyama H.* Effect of temperature on the osmotic behavior of LCST type ionic liquid solutions as draw solutions in the forward osmosis process // *Separation and Purification Technology*. 2021. V. 275. P. 119164.
 48. *Chabib C.M., Ali J.K., Jaoude M.A., Alhseinat E., Adeyemi I.A., Al Nashef I.M.* Application of deep eutectic solvents in water treatment processes: A review // *Journal of Water Process Engineering*. 2022. V. 47. P. 102663.
 49. *Mahto A., Mondal D., Poliseti V., Bhatt J., Nidhi M.R., Prasad K., Nataraj S.K.* Sustainable water reclamation from different feed streams by forward osmosis process using deep eutectic solvents as reusable draw solution // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017. V. 56. Iss. 49. P. 14623–14632.
 50. *Ejeromedoghene O., Orege J.I., Oderinde O., Okoye C.O., Alowakennu M., Nnyia M.O., Fu G.* Deep eutectic solvent-assisted stimuli-responsive smart hydrogels – A review // *European Polymer J.* 2022. V. 181. P. 111711.
 51. *Bendoy A.P., Zeweldi H.G., Park M.J., Shon H.K., Kim H., Chung W.-J., Nisola G.M.* Thermo-responsive hydrogel with deep eutectic mixture co-monomer as drawing agent for forward osmosis // *Desalination*. 2022. V. 542. P. 116067.
 52. *Zhao D., Chen S., Guo C.X., Zhao Q., Lu X.* Multifunctional forward osmosis draw solutes for seawater desalination // *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2016. V. 24. Iss. 1. P. 23–30.
 53. *Hafiz M., Hassanein A., Talhami M., Al-Ejji M., Hassan M.K., Hawari A.H.* Magnetic nanoparticles draw solution for forward osmosis: Current status and future challenges in wastewater treatment // *J. Environmental Chemical Engineering*. 2022. V. 10. Iss. 6. P. 108955.
 54. *Anis S.F., Hashaiekh R., Hilal N.* Functional materials in desalination: A review // *Desalination*. 2019. V. 468. P. 114077.
 55. *Bide Y., Shokrollahzadeh S.* Toward tailoring of a new draw solute for forward osmosis process: Branched poly (deep eutectic solvent)-decorated magnetic nanoparticles // *J. Molecular Liquids*. 2020. V. 320. Part A. P. 114409.
 56. *Ling M.M., Chung T.-S.* Desalination process using super hydrophilic nanoparticles via forward osmosis integrated with ultrafiltration regeneration // *Desalination*. 2011. V. 278 (1). P. 194–202.
 57. *Zhao Q., Zhao D.L.* Thermoresponsive magnetic ionic liquids as forward osmosis draw solutes for seawater desalination // *Chemical Engineering Journal Advances*. 2023. V. 14. P. 100446.
 58. *Chen S., Guo C.X., Zhao Q., Lu X.* One-Pot Synthesis of CO₂-Responsive Magnetic Nanoparticles with Switchable Hydrophilicity // *Chemistry. A European J.* 2014. V. 20. P. 14057–14062.
 59. *Aende A., Gardy J., Aslam Z., Rogers M., Edokali M., Cespedes O., Harbottle D., Hassanpour A.* A novel highly osmotic K/Fe₃O₄/CNF magnetic draw solution for salty water desalination // *Desalination*. 2022. V. 538. P. 115903.
 60. *Doshi K., Mungray A.A.* Bio-route synthesis of carbon quantum dots from tulsi leaves and its application as a draw solution in forward osmosis // *J. Environmental Chemical Engineering*. 2020. V. 8. Iss. 5. P. 104174.
 61. *Deng Y.H., Chen J.H., Yang Q., Zhuo Y.Z.* Carbon quantum dots (CQDs) and polyethyleneimine (PEI) layer-by-layer (LBL) self-assembly PEK-C-based membranes with high forward osmosis performance // *Chemical Engineering Research and Design*. 2021. V. 170. P. 423–433.
 62. *Xu Z., Li P., Li N., Wang W., Guo C., Shan M., Qian X.* Constructing dense and hydrophilic forward osmosis membrane by cross-linking reaction of graphene quantum dots with monomers for enhanced selectivity and stability // *J. Colloid and Interface Science*. 2021. V. 589. P. 486–499.
 63. *Zou W.-S., Wu P., Xiao B., Chen X., Kong W., Li Y., Liu Z., Wang Y.* Integration of nitrogen-doped carbon dots onto active layer of forward osmosis membrane for highly efficient antibacteria and enhanced membrane performances // *J. Environmental Chemical Engineering*. 2023. V. 11. Iss. 2. P. 109468.
 64. *Thompson N.A., Nicoll P.G.* Forward osmosis desalination: a commercial reality. // *Conference proc.: IDA World Congress, Perth, Australia*. 2011.
 65. *Shaffer D.L., Werber J.R., Jaramillo H., Lin S., Elimelech M.* Forward osmosis: Where are we now? // *Desalination*. 2015. V. 356. P. 271–284.
 66. *Gray G.T., McCutcheon J.R., Elimelech M.* Internal concentration polarization in forward osmosis: role of membrane orientation // *Desalination*. 2006. V. 197. Iss. 1–3. P. 1–8.
 67. *Gulied M., Al Nouss A., Khraisheh M., Al Momani F.* Modeling and simulation of fertilizer drawn forward osmosis process using Aspen Plus-MATLAB model // *Science of The Total Environment*. 2020. V. 700. P. 134461.
 68. *Darwish M.A., Abdulrahim H.K., Hassan A.S., Mabrouk A.A., Sharif A.O.* The forward osmosis and desalination // *Desalination and Water Treatment*. 2016. V. 57. P. 4269–4295.
 69. *Rastogi N.K.* 1 – Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments, Editor(s): Basile A., Cassano A., Rastogi N.K. *Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes*. Elsevier, 2020. P. 3–35.
 70. *Suwaileh W., Zargar M., Abdala A., Siddiqui F.A., Kh-iadani M., Abdel-Wahab A.* Concentration polarization control in stand-alone and hybrid forward osmosis systems: Recent technological advancements and

- future directions // *Chemical Engineering Research and Design*. 2022. V. 178. P. 199–223.
71. Ibrar I., Yadav S., Altaee A., Hawari A., Nguyen V., Zhou J. A novel empirical method for predicting concentration polarization in forward osmosis for single and multicomponent draw solutions // *Desalination*. 2020. V. 494. P. 114668.
 72. Arjmandi M., Peyravi M., Altaee A., Arjmandi A., Chenar M.P., Jahanshahi M., Binaeian E. A state-of-the-art protocol to minimize the internal concentration polarization in forward osmosis membranes // *Desalination*. 2020. V. 480. P. 114355.
 73. Ibrar I., Yadav S., Braytee A., Altaee A., Hossein Zadeh A., Samal A.K., Zhou J.L., Khan J.A., Bartocci P., Fantozzi F. Evaluation of machine learning algorithms to predict internal concentration polarization in forward osmosis // *J. Membrane Science*. 2022. V. 646. P. 120257.
 74. Choi Y., Hwang T.-M., Jeong S., Lee S. The use of ultrasound to reduce internal concentration polarization in forward osmosis // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. V. 41. P. 475–483.
 75. Heikkinen J., Kyllönen H., Järvelä E., Grönroos A., Tang C.Y. Ultrasound-assisted forward osmosis for mitigating internal concentration polarization // *J. Membrane Science*. 2017. V. 528. P. 147–154.
 76. Xu W., Chen Q., Ge Q. Recent advances in forward osmosis (FO) membrane: Chemical modifications on membranes for FO processes // *Desalination*. 2017. V. 419. P. 101–116.
 77. Chi X.-Y., Zhang P.-Y., Guo X.-J., Xu Z.-L. A 41* TFC forward osmosis (FO) membrane supported by polyimide (PI) microporous nanofiber membrane // *Applied Surface Science*. 2018. V. 427. Part A. P. 1–9.
 78. Suwaileh W., Pathak N., Shon H., Hilal N. Forward osmosis membranes and processes: A comprehensive review of research trends and future outlook // *Desalination*. 2020. V. 485. P. 114455.
 79. Kadhom M. A review on the polyamide thin film composite (TFC) membrane used for desalination: Improvement methods, current alternatives, and challenges // *Chemical Engineering Research and Design*. 2023. V. 191. P. 472–492.
 80. Xu S., Li F., Su B., Hu M.Z., Gao X., Gao C. Novel graphene quantum dots (GQDs)-incorporated thin film composite (TFC) membranes for forward osmosis (FO) desalination // *Desalination*. 2019. V. 451. P. 219–230.
 81. Hartanto Y., Corvilain M., Mariën H., Janssen J., Vankelecom I.F.J. Interfacial polymerization of thin-film composite forward osmosis membranes using ionic liquids as organic reagent phase // *J. Membrane Science*. 2020. V. 601. P. 117869.
 82. Zheng D., Hua D., Yao A., Hong Y., Cha X., Yang X., Japip S., Zhan G. Fabrication of thin-film composite membranes for organic solvent nanofiltration by mixed monomeric polymerization on ionic liquid/water interfaces // *J. Membrane Science*. 2021. V. 636. P. 119551.
 83. Song X., Wang Y., Jiao C., Huang M., Wang G.-H., Jiang H. Microstructure regulation of polyamide nanocomposite membrane by functional mesoporous polymer for high-efficiency desalination // *J. Membrane Science*. 2020. V. 597. P. 117783.
 84. Shakeri A., Razavi R., Salehi H., Fallahi M., Eghbalazar T. Thin film nanocomposite forward osmosis membrane embedded with amine-functionalized ordered mesoporous silica // *Applied Surface Science*. 2019. V. 481. P. 811–818.
 85. Song X., Zhang Y., Abdel-Ghaffar H.M., Abdel-Aal E.A., Huang M., Gul S., Jiang H. Polyamide membrane with an ultrathin GO interlayer on macroporous substrate for minimizing internal concentration polarization in forward osmosis // *Chemical Engineering J.* 2021. V. 412. P. 128607.
 86. Zhao W., Liu H., Liu Y., Jian M., Gao L., Wang H., Zhang X. Thin-film nanocomposite forward-osmosis membranes on hydrophilic microfiltration support with an intermediate layer of graphene oxide and multiwall carbon nanotube // *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2018. V. 10 (40). P. 34464–34474.
 87. Yang Y., Xu Y., Liu Z., Huang H., Fan X., Wang Y., Song Y., Song C. Preparation and characterization of high-performance electrospun forward osmosis membrane by introducing a carbon nanotube interlayer // *J. Membrane Science*. 2020. V. 616. P. 118563.
 88. Zhou Z., Hu Y., Boo C., Liu Z., Li J., Deng L., An X. High-performance thin-film composite membrane with an ultrathin spray-coated carbon nanotube interlayer // *Environmental Science & Technology Letters*. 2018. V. 5. Iss. 5. P. 243–248.
 89. Cheng B., Wang Y., Wu X., Fang M., Min X., Huang Z., Liu Y., Mi R. Preparation and characterization of novel thin film composite forward osmosis membrane with halloysite nanotube interlayer // *Polymer*. 2022. V. 254. P. 125096.
 90. Razavi S.R., Shakeri A., Mirahmadi Babaheydari S.M., Salehi H., Lammertink R.G.H. High-performance thin film composite forward osmosis membrane on tannic acid/Fe³⁺ coated microfiltration substrate // *Chemical Engineering Research and Design*. 2020. V. 161. P. 232–239.
 91. Rafiee H., Shakeri A., Mahdavi H. Layer-by-layer assembly of alginate/Ca²⁺ as interlayer on microfiltration substrate: Fabrication of high selective thin-film composite forward osmosis membrane for efficient heavy metal ions removal // *Chemical Engineering Research and Design*. 2022. V. 188. P. 564–574.
 92. Suwaileh W., Johnson D., Khodabakhshi S., Hilal N. Superior cross-linking assisted layer by layer modification of forward osmosis membranes for brackish water desalination // *Desalination*. 2019. V. 463. P. 1–12.
 93. Fang W., Wang R., Chou S., Setiawan L., Fane A.G. Composite forward osmosis hollow fiber membranes: Integration of RO- and NF-like selective layers to enhance membrane properties of anti-scaling and anti-internal concentration polarization // *J. Membrane Science*. 2012. V. 394–395. P. 140–150.
 94. Suwaileh W.A., Johnson D.J., Sarp S., Hilal N. Advances in forward osmosis membranes: Altering the sub-layer structure via recent fabrication and chemical modification approaches // *Desalination*. 2018. V. 436. P. 176–201.

95. *Mehta G.D.* Further results on the performance of present-day osmotic membranes in various osmotic regions // *J. Membrane Science*. 1982. V. 10. Iss. 1. P. 3–19.
96. *Attarde D., Jain M., Gupta S.K.* Modeling of a forward osmosis and a pressure-retarded osmosis spiral wound module using the Spiegler-Kedem model and experimental validation // *Separation and Purification Technology*. 2016. V. 164. P. 182–197.
97. *Abdelkader B.A., Navas D.R., Sharqawy M.H.* A novel spiral wound module design for harvesting salinity gradient energy using pressure retarded osmosis // *Renewable Energy*. 2023. V. 203. P. 542–553.
98. *Lee S., Boo C., Elimelech M., Hong S.* Comparison of fouling behavior in forward osmosis (FO) and reverse osmosis (RO) // *J. Membrane Science*. 2010. V. 365. Iss. 1–2. P. 34–39.
99. *Boo C., Elimelech M., Hong S.* Fouling control in a forward osmosis process integrating seawater desalination and wastewater reclamation // *J. Membrane Science*. 2013. V. 444. P. 148–156.
100. *Blandin G., Vervoort H., Le-Clech P., Verliefde A.R.D.* Fouling and cleaning of high permeability forward osmosis membranes // *J. Water Process Engineering*. 2016. V. 9. P. 161–169.
101. *Lutchmiah K., Verliefde A.R.D., Roest K., Rietveld L.C., Cornelissen E.R.* Forward osmosis for application in wastewater treatment: A review // *Water Research*. 2014. V. 58. P. 179–197.
102. *Song J., Yan M., Ye J., Zheng S., Ee L.Y., Wang Z., Li J., Huang M.* Research progress in external field intensification of forward osmosis process for water treatment: A critical review // *Water Research*. 2022. V. 222. P. 118943.
103. *Awad A.M., Jalab R., Minier-Matar J., Adham S., Nasser M.S., Judd S.J.* The status of forward osmosis technology implementation // *Desalination*. 2019. V. 461. P. 10–21.
104. *Choi B.G., Kim D.I., Hong S.* Fouling evaluation and mechanisms in a FO-RO hybrid process for direct potable reuse // *J. Membrane Science*. 2016. V. 520. P. 89–98.
105. *Lee S., Kim Y., Hong S.* Treatment of industrial wastewater produced by desulfurization process in a coal-fired power plant via FO-FMD hybrid process // *Chemosphere*. 2018. V. 210. P. 44–51.
106. *Kim Y., Li S., Ghaffour N.* Evaluation of different cleaning strategies for different types of forward osmosis membrane fouling and scaling // *J. Membrane Science*. 2020. V. 596. P. 117731.
107. *Mi B., Elimelech M.* Organic fouling of forward osmosis membranes: Fouling reversibility and cleaning without chemical reagents // *J. Membrane Science*. 2010. V. 348. Iss. 1–2. P. 337–345.
108. *Vinardell S., Blandin G., Ferrari F., Lesage G., Mata-Alvarez J., Dosta J., Astals S.* Techno-economic analysis of forward osmosis pre-concentration before an anaerobic membrane bioreactor: Impact of draw solute and membrane material // *J. Cleaner Production*. 2022. V. 356. P. 131776.
109. *Pendergast M.M., Nowosielski-Slepawron M.S., Tracy J.* Going big with forward osmosis // *Desalination and Water Treatment*. 2016. V. 57. Iss. 55. P. 26529–26538.
110. *Freyberg T.* Oasys looks to sell forward osmosis IP as cash flow dries up // *Water World*. Endeavor Business Media, 2023. URL: <https://www.waterworld.com/home/article/16203120/oasys-looks-to-sell-forward-osmosis-ip-as-cash-flow-dries-up> (дата обращения: 10.01.2023).
111. *Freyberg T.* Forward osmosis membrane revenues dry up for Modern Water // *Water World*. Endeavor Business Media, 2023. URL: <https://www.waterworld.com/home/article/16199576/forward-osmosis-membrane-revenues-dry-up-for-modern-water> (дата обращения: 10.01.2023).
112. *Lin S., Zhao H., Zhu L., He T., Chen S., Gao C., Zhang L.* Seawater desalination technology and engineering in China: A review // *Desalination*. 2021. V. 498. P. 114728.
113. *Park J., Lee S.* Desalination Technology in South Korea: A Comprehensive Review of Technology Trends and Future Outlook // *Membranes*. 2022. V. 12 (2). P. 204.
114. *Saeed R., Konsowa A.H., Shalaby M.S., Mansour M.S., Eloffy M.G.* Optimization of Integrated Forward – Reverse Osmosis Desalination Processes for Brackish Water // *Alexandria Engineering J.* 2023. V. 63. P. 89–102.
115. *Hafiz M., Alfahel R., Altaee A., Hawari A.H.* Techno-economic assessment of forward osmosis as a pretreatment process for mitigation of scaling in multi-stage flash seawater desalination process // *Separation and Purification Technology*. 2023. V. 309. P. 123007.
116. *McGovern R.K., Lienhard J.H.* On the potential of forward osmosis to energetically outperform reverse osmosis desalination // *J. Membrane Science*. 2014. V. 469. P. 245–250.
117. *Mazlan N.M., Peshev D., Livingston A.G.* Energy consumption for desalination – a comparison of forward osmosis with reverse osmosis, and the potential for perfect membranes // *Desalination*. 2016. V. 377. P. 138–151.
118. *Yangali-Quintanilla V., Li Z., Valladares R., Li Q., Amy G.* Indirect desalination of Red Sea water with forward osmosis and low pressure reverse osmosis for water reuse // *Desalination*. 2011. V. 280. Iss. 1–3. P. 160–166.
119. *Shaffer D.L., Yip N.Y., Gilron J., Elimelech M.* Seawater desalination for agriculture by integrated forward and reverse osmosis: Improved product water quality for potentially less energy // *J. Membrane Science*. 2012. V. 415–416. P. 1–8.
120. *Li M., Yang Y., Zhu L., Wang G., Zeng Z., Xue L.* Antifouling and highly permeable thin-film composite forward osmosis membranes based on the reactive polyvinylidene fluoride porous substrates // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2022. V. 654. P. 130144.
121. *Yang Y., Song C., Wang P., Fan X., Xu Y., Dong G., Liu Z., Pan Z., Song Y., Song C.* Insights into the impact of polydopamine modification on permeability and antifouling performance of forward osmosis membrane // *Chemosphere*. 2022. V. 291. Part 1. P. 132744.

State-of-the-Art of Forward Osmosis Technology: Prospects and Limitations

A. P. Andrianov^{1, *, **}, O. V. Yantsen^{1, 2}, and R. V. Efremov³

¹*LLC "VT Expert", Moscow, Russia*

²*Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia*

³*Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia*

**e-mail: laerimarum@mail.ru*

***e-mail: apa@wtexpert.ru*

Forward osmosis is considered as an emerging technology that can compete with existing methods of desalination, purification and concentration of natural and wastewater on the global water market. This review presents possible applications of forward osmosis, technological schemes and the most striking case studies. The issues of forward osmosis membranes development and improvement, composition and regeneration of draw solutions, membrane fouling are considered. Special attention is paid to the problems arising during forward osmosis operation, to energy and economic assessment of new technology. Conclusions are drawn about the status of the commercial implementation of forward osmosis and the main barriers that stand in the way of its development.

Keywords: draw solution, forward osmosis, reverse osmosis, technical and economic assessment, water desalination