

УДК 66.081.63

БЕЗРЕАГЕНТНЫЕ МЕТОДЫ УМЕНЬШЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА КОНЦЕНТРАТА УСТАНОВОК ОБРАТНОГО ОСМОСА

© 2025 г. А. А. Смирнов^{1, *}, В. Б. Смирнов^{2, **}

¹Национальный исследовательский университет “МЭИ”, Красноказарменная, 14, Москва, 111250, Россия

²АО “Научно-производственная компания Медиана-Фильтр”, Ткацкая ул., 1, Москва, 105318, Россия

*e-mail: SmirnovAlAlex@mpei.ru

**e-mail: Smirnov@medianafilter.ru

Поступила в редакцию 20.01.2025

После доработки 17.03.2025

Принята к публикации 02.04.2025

Из всех разработанных процессов обессоливания воды обратный осмос занимает лидирующее место – 69% объема мирового производства пресной воды приходится на установки обратного осмоса, одним из критериев эффективности которых является количество образующегося концентрата. В статье описаны некоторые современные баромембранные безреагентные методы уменьшения количества концентрата установок обратного осмоса, главным критерием отбора которых является опыт их промышленного применения. Рассмотрены такие процессы, как прямой осмос (forward osmosis), прямой осмос с поддержкой давления (pressure assisted forward osmosis), обратный осмос с осмотической поддержкой (osmotically assisted reverse osmosis), обратный осмос полупериодического действия (semi-batch reverse osmosis), обратный осмос с пульсирующим потоком (pulse flow reverse osmosis), приведен принцип их работы и результаты практического применения в промышленности или крупномасштабных пилотных испытаний.

Ключевые слова: обратный осмос, эффективность, прямой осмос, обратный осмос с осмотической поддержкой, обратный осмос полупериодического действия, обратный осмос с пульсирующим потоком

DOI: 10.31857/S2218117225010069, **EDN:** LAKUFY

По мере роста численности населения планеты и сокращения доступного количества пресной воды для хозяйствственно-бытовых нужд, а также интенсивного развития промышленности, потребности в пресной и обессоленной воде постоянно растут. Так, по данным авторов [1], совокупная мощность всех станций опреснения в мире в 2020 году составила 100 млн м³/сутки со скоростью прироста 5 млн м³/сутки каждый год. Для опреснения используется несколько технологий – электродиализ, термическая дистилляция и обратный осмос. Среди всех технологий наиболее быстро растущей по производительности с 1990-х годов является обратный осмос. Эта технология получила широкое распространение из-за сравнительно низких затрат электроэнергии по сравнению с термическими способами обессоливания в силу отсутствия фазового перехода воды и устойчивостью к загрязнениям в отличие от электродиализа. На обратный осмос

приходится 69% (65.5 млн м³/сутки) от общего объема опресненной воды в мире, 25% опресненной воды вырабатывается при помощи дистилляционных установок, оставшиеся 6% выработки опресненной воды приходятся на установки nanoфильтрации (3%), электродиализа (2%) и электродеонизации (менее 1%) [1].

Обратный осмос является эффективным способом обессоливания как сам по себе в одно- или многоступенчатых вариантах, так и в сочетании с другими технологиями. Одним из существенных недостатков этой технологии является сравнительно большое количество образующегося концентрата, который необходимо утилизировать. В промышленных установках обратного осмоса на долю концентрата приходится от 20 до 50% исходной воды. В данной работе приведено описание и принцип работы баромембранных осмотических методов уменьшения количества

концентратов, которые апробированы в промышленных масштабах. В русскоязычной научной литературе еще нет устоявшихся названий всех обсуждаемых методов, поэтому в данной работе наряду с переводом будут использованы оригинальные названия и английские аббревиатуры названий методов.

Все баромембранные осмотические процессы можно разделить на несколько групп:

- по движущей силе процесса: градиент химических потенциалов (прямой осмос) и градиент давлений (обратный осмос);
- по динамике поступления исходной воды: непрерывного действия, полупериодического действия и периодического действия.

Прямой осмос

Прямой осмос (forward osmosis) – осмотический процесс, в котором растворитель (обычно

вода), отделенный от раствора полупроницаемой мембраной, самопроизвольно проникает через полупроницаемую перегородку (мембрану) в сторону раствора с более высоким осмотическим давлением за счет разности химических потенциалов. Это явление связано со стремлением системы к равновесию и выравниванию концентраций химических веществ по обе стороны мембраны.

На рис. 1а приведена иллюстрация механизма прямого осмоса: слева от полупроницаемой перегородки подается раствор, который необходимо сконцентрировать, справа – приемный раствор, в который переходит вода (в общем случае – растворитель). Приемный раствор имеет большую осмотическую силу, вследствие чего вода проходит через мембрану, концентрируя исходный раствор и разбавляя приемный. Процесс протекает *без приложения внешнего давления* для переноса растворителя через мембрану в отличие от обратного осмоса, что делает его энерге-

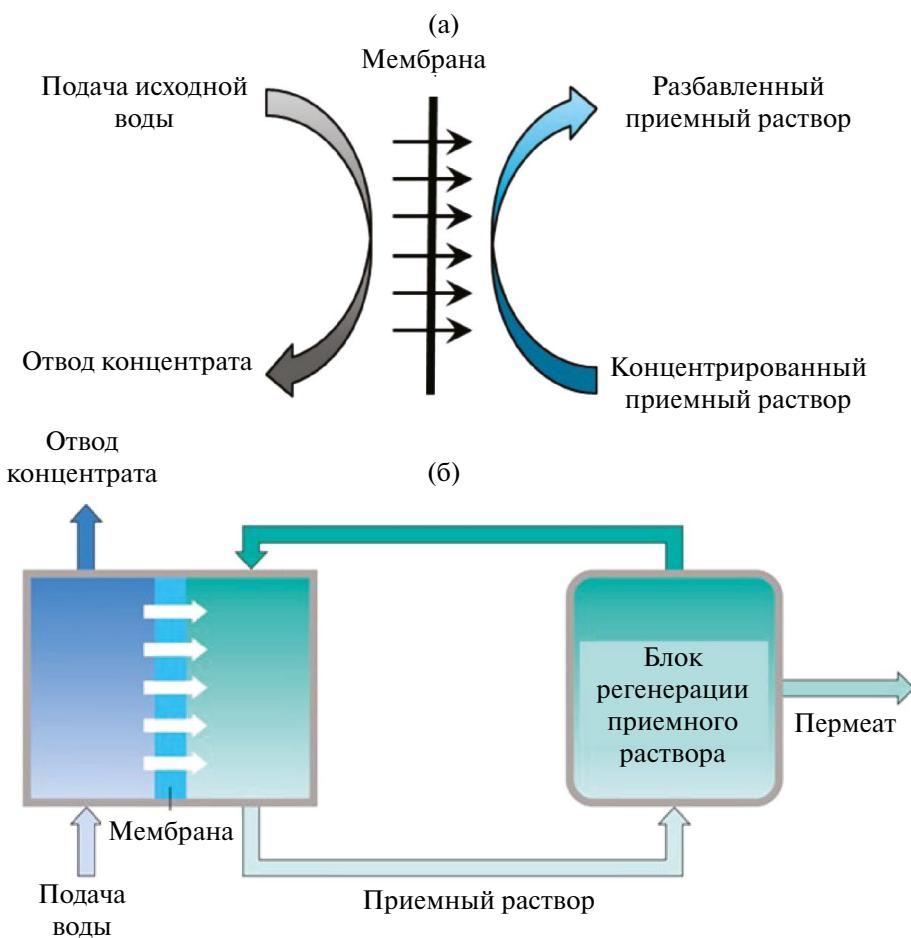


Рис. 1. Иллюстрация механизма прямого осмоса (а) и типичной схемы применения (б).

тически выгодным и привлекательным. При этом небольшое внешнее давление по обе стороны мембранны прикладывается только для компенсации гидравлических потерь напора, возникающих при перекачивании растворов вдоль мембранны. Удельное энергопотребление прямого осмоса в [2] оценивается в $0.25 \text{ кВт}/\text{м}^3$.

Прямой осмос применяется для концентрирования сточных вод, повторного использования воды, обезвоживания продуктов биохимического синтеза [3]. Приемный раствор, в который направляется вода из потока исходной воды, постепенно разбавляется, скорость процесса снижается до его полной остановки. Поэтому на стороне приемного раствора добавляют установку для поддержания концентрации приемного раствора (например, установку обратного осмоса, установку первапорации, испарительную градирню и проч.) (рис. 16). В качестве приемного раствора обычно используют хлориды или сульфаты натрия или магния. В [4] описано применение органических и неорганических веществ, легко отдающих воду, в качестве приемного раствора для снижения энергопотребления в процессе восстановления приемного раствора. В качестве приемного раствора удобно использовать широкодоступную природную морскую или океаническую воду с последующим сбросом.

В процессе прямого осмоса достигается удельная проницаемость мембранны на уровне от 3 до $12 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. За счет того, что данный процесс протекает без приложения внешнего давления, процесс загрязнения поверхности мем-

бран происходит медленно – это делает данный процесс пригодным для обработки сложных вод. Мембранные модули для прямого осмоса производят компании PoriFera, FTS, HTI, Toyobo и другие. В [5–7] описаны варианты промышленного применения установок прямого осмоса, в одном из которых при опреснении морской воды прямой осмос в сочетании с обратным осмосом для восстановления концентрации приемного раствора показал снижение удельного энергопотребления на 60% ($4.9 \text{ кВт}/\text{м}^3$ против $8.5 \text{ кВт}/\text{м}^3$) при одновременном увеличении степени извлечения пермеата с 25% (обратный осмос) до 35% (прямой осмос). В обзоре процесса прямого осмоса [8] приводятся данные по энергопотреблению пилотных и промышленных установок в диапазоне от 1.3 до $3.0 \text{ кВт}/\text{м}^3$ в схемах “прямой осмос – обратный осмос”, отмечая при этом, что на стадию прямого осмоса затраты электроэнергии составляют всего от 0.01 до $0.1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$.

Разновидностью процесса прямого осмоса является прямой осмос с приложением давления (pressure assisted forward osmosis, PAFO), в котором со стороны концентрируемого раствора, помимо естественно возникающего осмотического давления, прикладывают дополнительное внешнее давление для увеличения потока воды, переносимой через мембранны прямого осмоса, тем самым увеличивая удельную проницаемость мембранны и интенсифицируя процесс. Прилагаемое давление составляет величину до 20 бар [9].

За счет приложения внешнего давления этот процесс не так устойчив к загрязнению по-

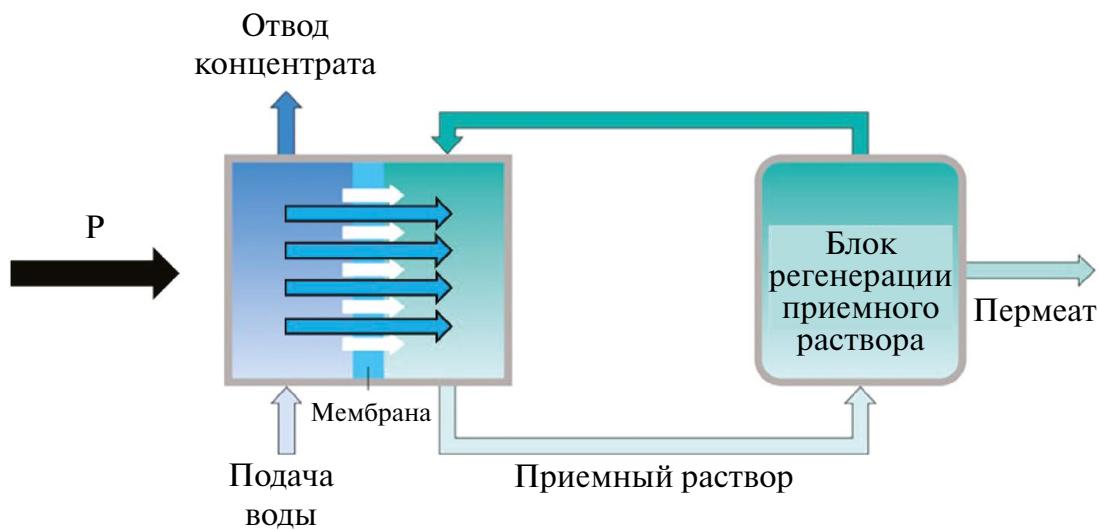


Рис. 2. Иллюстрация механизма прямого осмоса с приложением давления (pressure assisted forward osmosis, PAFO).

верхности мембранны, поэтому рассматривается к применению в задачах концентрирования растворов с низким содержанием взвешенных веществ.

Обратный осмос с осмотической поддержкой

Обратный осмос с осмотической поддержкой (osmotically assisted reverse osmosis, OARO) относится к баромембранным осмотическим процессам, движущей силой которых является градиент давлений.

На рис. 3 схематично изображен хорошо известный процесс обратного осмоса, в котором слева от мембранны под давлением подается концентрируемый раствор, а вода, прошедшая через мембранны (пермеат), отводится для дальнейшего использования. Этот процесс на данный момент довольно хорошо отработан, но имеет практическое ограничение по прилагаемому давлению в 80 бар [10, 11], обусловленное конструкцией обратноосмотического мембранны элемента. При превышении этого давления происходит смятие подложки, падает производительность мембранны и может произойти повреждение селективного слоя мембранны. Для преодоления этого предела был разработан процесс обратного осмоса с осмотической поддержкой, суть которого заключается в том, что со стороны пермеата подается раствор, осмотическое давление которого помогает транспортировать воду через мембранны. Это можно продемонстрировать уравнением переноса растворителя (1):

$$J_w = A (\Delta P - \Delta \pi), \quad (1)$$

в котором ΔP – разность приложенного внешнего давления, ограниченная конструкцией мембранны-

ного элемента, а $\Delta \pi$ – разность осмотического давления растворов по обе стороны мембранны, которая уменьшается в OARO. Таким образом, движущая сила процесса переноса воды может оставаться положительной при предельном концентрировании рассолов за счет снижения разности осмотических давлений.

Для реализации данного процесса применяют несколько ступеней концентрирования приемных растворов. В настоящее время доступны коммерческие образцы мембранны для этого процесса и приводятся примеры использования. Так, в [12] приведены ожидаемые результаты многоступенчатого концентрирования раствора хлорида натрия, полученного при помощи установки обратного осмоса: при давлении процесса 70 бар концентрация хлорида натрия увеличивается с 70 до 170 г/л, и далее раствор подается на систему кристаллизации.

В 2023 году в Индонезии [13] был введен в эксплуатацию завод по переработке морской воды с получением 27 120 м³/сут пресной воды и 220 тыс. т/год кристаллического хлорида натрия. Исходная морская вода проходит предварительную очистку на установках ультрафильтрации, затем проходит обработку на установках нанофильтрации для отделения одновалентных хлорид-ионов и ионов натрия от других компонентов морской воды. Полученный раствор хлорида натрия с концентрацией 27 г/л подается на установку обратного осмоса (с мембранными класса SW), где концентрируется до 50 г/л и подается на блок установок обратного осмоса с осмотической поддержкой, где раствор концентрируется до 179 г/л, а далее подается на выпарную установку. По данным исследователей [14], удельная проницаемость мембранны на сту-



Рис. 3. Иллюстрация механизма обратного осмоса (а) и обратного осмоса с осмотической поддержкой (б).

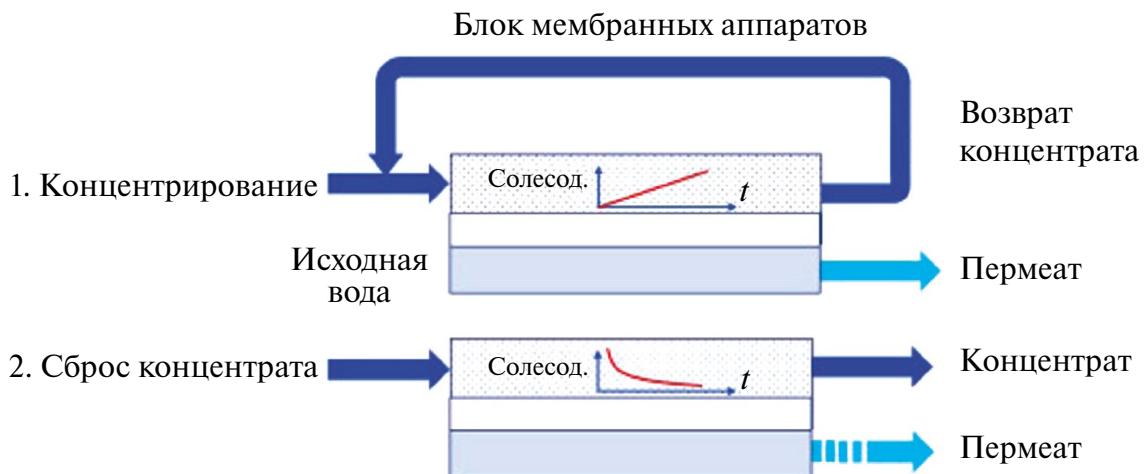


Рис. 4. Этапы проведения процесса обратного осмоса полупериодического действия.

пенях концентрирования в OARO снижается от $10 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ на первой ступени концентрирования до $0.2 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ на последней из-за усиливающегося влияния концентрационной поляризации по мере концентрирования. Энергопотребление процесса концентрирования на OARO составляет $2.2 \text{ кВт}/\text{м}^3$ (по исходному раствору) при концентрировании хлорида натрия с начальных 8.3 %масс до 16 %масс [13].

Обратный осмос полупериодического действия

Обратный осмос полупериодического действия (semi-batch reverse osmosis, SBRO) – это ба-

ромембранный процесс, в котором исходная вода постоянно подается на мембрану, а концентрат не отводится, в отличие от обратного осмоса периодического действия, в котором обрабатывается фиксированный объем исходной воды.

Обратный осмос полупериодического действия проводят в два этапа – концентрирование и сброс. На этапе концентрирования исходная вода высоконапорным насосом подается на мембранные аппараты, где разделяется на поток пермеата и концентрат. Образующийся концентрат при этом не отводится, а в полном объеме направляется на подачу в мембранные аппараты циркуляционным насосом. При этом над мем-

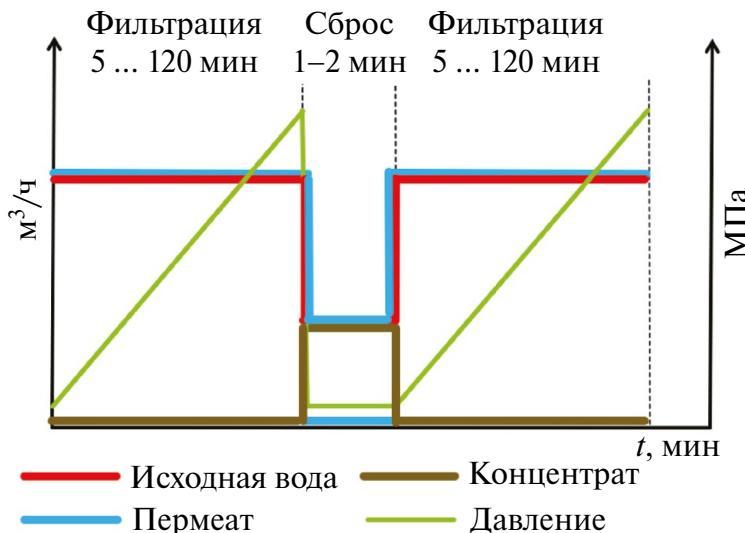


Рис. 5. Потоки исходной воды, концентрат, пермеат и давление фильтрации в этапах работы установки обратного осмоса полупериодического действия.

бранами в каналах концентрирования поддерживается довольно высокий поток воды. Высоконапорный насос создает давление, необходимое для образования пермеата, а циркуляционный насос восполняет потери давления, возникшие в результате движения воды в каналах мембранных элементов.

Этап концентрирования длится от 5 до 120 минут в зависимости от состава исходной воды, при этом постоянно возрастает рабочее давление. Поток пермеата поддерживается на постоянном уровне, вся исходная вода переводится в пермеат. После достижения заданной степени концентрирования происходит вытеснение исходной водой наработанного концентрата в течение 1–2 минут небольшим давлением, после чего цикл фильтрации повторяется. Компания Desalitech вывела на рынок коммерческий вариант этого процесса под названием Closed Circuit Reverse Osmosis (CCRO), отечественная компания АО «НПК Медиана-Фильтр» ведет разработки тупиково-циркуляционных установок обратного осмоса [15] на основе этого же процесса.

Достигаемая степень извлечения пермеата в SBRO составляет 98% [16], в привычных установках обратного осмоса непрерывного действия степень извлечения составляет 50–80%. Такая высокая степень извлечения пермеата достигается благодаря работе мембран в условиях пересыщения труднорастворимых компонентов, таких как карбонат и сульфат кальция, фосфат кальция, окись кремния. Процесс образования зародышей кристаллов и их дальнейший

рост требует определенного времени – времени индукции [17], которое зависит от многих факторов, таких как химический состав труднорастворимого соединения, температура воды, гидродинамика процесса, свойства материала мембранны, присутствия веществ, блокирующих рост зародышей и кристаллов [18]. Пересыщенный раствор в пределах времени индукции остается стабильным, применительно к труднорастворимым соединениям в природной воде время индукции составляет от нескольких минут до нескольких часов.

Обратный осмос полупериодического действия по удельному энергопотреблению близок к теоретическому минимуму в $1.6 \text{ кВт}/\text{м}^3$ [19] при опреснении морской воды с солесодержанием 35 г/л и степени извлечения 50%, показывая в тех же условиях удельное энергопотребление от 1.9 до $2.2 \text{ кВт}/\text{м}^3$ [20]. В обзоре применения технологии SBRO [21] приводится перечень действующих установок, которые на практике демонстрируют высокие степени извлечения пермеата – до 95% при приемлемом интервале между химическими промывками. Из приведенных примеров видно тенденцию на снижение возможной степени извлечения при увеличении солесодержания исходной воды и то, что для этого процесса применимо то же ограничение по конечному солесодержанию концентрата, что и для обратного осмоса.

Обратный осмос полупериодического действия требует большего количества вспомога-

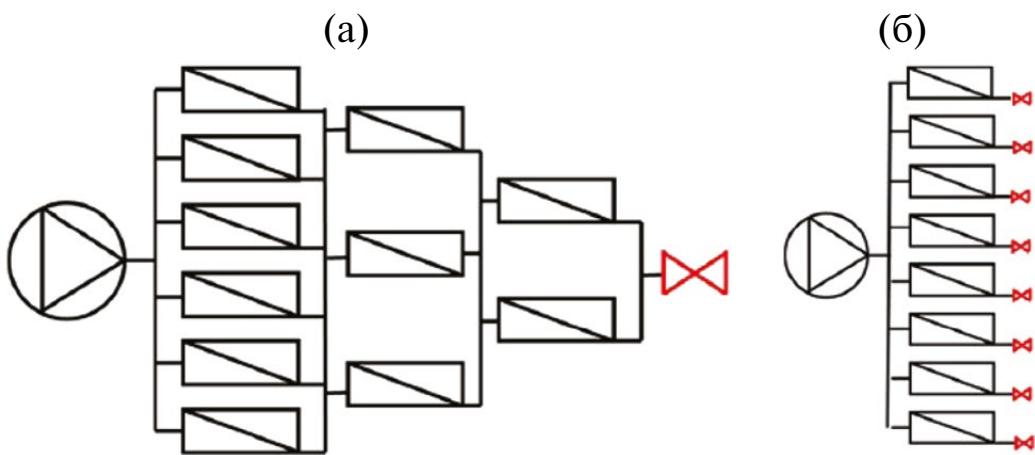


Рис. 6. Схема соединения мембранных аппаратов в установке обратного осмоса непрерывного действия (а) и в установке обратного осмоса с пульсирующим потоком (б).

тельного оборудования и более сложной системы управления, но привлекателен тем, что позволяет концентрировать соединения выше их степени растворимости.

Обратный осмос с пульсирующим потоком [22]

Разработчиком обратного осмоса с пульсирующим потоком (pulse flow reverse osmosis, PFRO) является компания IDE Technologies (Израиль). Данный процесс является разновидностью обратного осмоса периодического действия в рамках отдельно взятого мембранных аппарата и процессом непрерывного обратного осмоса в рамках всей установки.

В отличие от обычной установки обратного осмоса, в которой мембранные аппараты, в общем случае, собраны в один или несколько каскадов с одной точкой отвода концентрата (рис. 6а), в установке PFRO все мембранные аппараты соединены параллельно с независимым отводом концентрата из каждого корпуса (рис. 6б).

Каждый мембранный аппарат в установке PFRO работает циклически. На стадии фильтрации отвода концентрата не производится — происходит тупиковая фильтрация в течение 20–50 с. Затем линия отвода концентрата из мембранных аппаратов открывается на 2–5 с для сброса концентрата, после чего цикл работы повторяется. Цикл работы каждого мембранных аппарата

так сдвинут по времени таким образом, что единовременно отвод концентрата осуществляется только с одного из них.

Во время сброса концентрата происходит не только собственно сброс концентрата, но и очистка поверхности мембранны посредством нескольких механизмов [22, 23] (рис. 7).

При быстром открытии канала сброса высокое напряжение сдвига удаляет накопившиеся загрязнения в линии концентрата. Прямой осмос, возникающий после сброса давления за счет сильно различающихся концентраций солей, создает поток пермеата в направлении изнутри-наружу, что также способствует удалению загрязнений с поверхности мембранны. Небольшие механические колебания поверхности мембранны, которые возникают за счет быстрого сброса давления, также способствуют очистке поверхности мембранны. Разработчики провели промышленные испытания этой технологии на системе доочистки сточных вод после третичной стадии очистки (микрофильтрации) на пилотной установке, включавшей 7 мембранны FILMTEC™ ECO PRO-400 в одном корпусе [23]. Степень извлечения пермеата находилась в диапазоне 85–87% и за 200 дней пилотных испытаний была проведена всего одна химическая очистка.

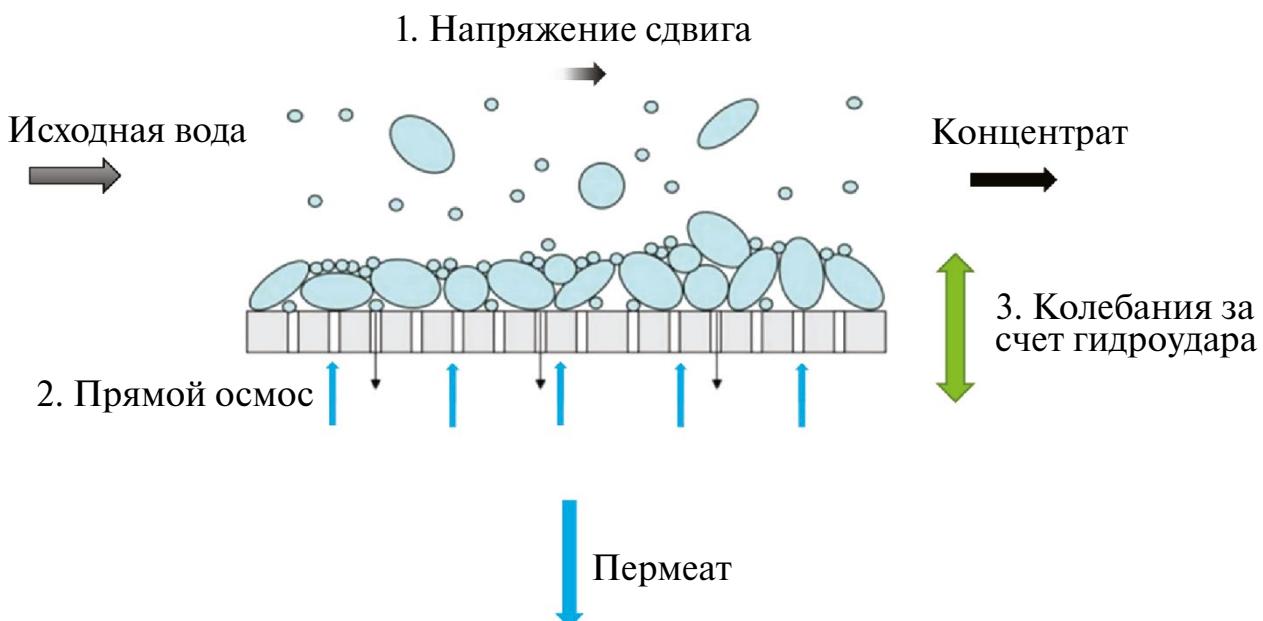


Рис. 7. Механизм очистки поверхности мембранны в установке обратного осмоса с пульсирующим потоком.

После окончания испытаний был проведен анализ поверхности мембран на предмет количества отложений, накопленных за все время испытаний. На первой мемbrane со стороны подачи воды средняя масса загрязнений составила 9 г/м^2 , на последней — 2 г/м^2 [23]. Для сравнения авторы приводят среднюю массу загрязнений на поверхности мембраны в установке непрерывного действия, которая составляет около 45 г/м^2 . Результаты показывают, что те механизмы очистки, которые работают в установке обратного осмоса с пульсирующим потоком, эффективно очищают поверхность мембран.

В работе [24] предлагается способ повышения степени извлечения пермеата выше 90% для солоноватых вод на широко распространенных установках обратного осмоса непрерывного действия без применения дополнительных мероприятий по подготовке воды, заключающийся в добавлении линии рециркуляции концентрата для поддержания необходимого гидродинамического режима в каналах мембранных элементов при высокой степени извлечения пермеата. Так, для мембран распространенного в промышленности типоразмера 8040 с точки зрения гидродинамики необходимо выдерживать:

- предельный максимальный поток воды на входе в элемент не более $12\text{--}15 \text{ м}^3/\text{ч}$;

- минимальный поток концентрата на выходе из мембранных элементов не менее $5.1 \text{ м}^3/\text{ч}$ при потоке пермеата $0.9 \text{ м}^3/\text{ч}$ и максимальную степень извлечения пермеата $R = 15\%$.

Помимо гидродинамики, необходимо учитывать риск выпадения малорастворимых веществ на поверхности мембраны при концентрировании и вести процесс, не достигая предела их растворимости либо не превышая предельную концентрацию ионов труднорастворимых веществ, с которой справляется ингибитор осадкообразования. Обычно производители ингибитора указывают максимальное рабочее значение индекса Ланжелье (LSI) в диапазоне 2.2...2.6. Результаты математического моделирования промышленной установки обратного осмоса производительностью $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ показывают, что максимальная степень извлечения пермеата на исходной воде с солесодержанием $\sim 1900 \text{ мг/л}$ может составлять 80%, а на исходной воде с солесодержанием менее 500 мг/л — на уровне 92%. Указанные степени извлечения пермеата могут быть еще увеличены путем снижения индекса насыщения при применении подкисляющего реагента.

Также в работе [24] приведены результаты математического моделирования в части влияния степени извлечения пермеата первой ступени обратного осмоса на качество получаемого пермеата второй ступени обратного осмоса, ко-

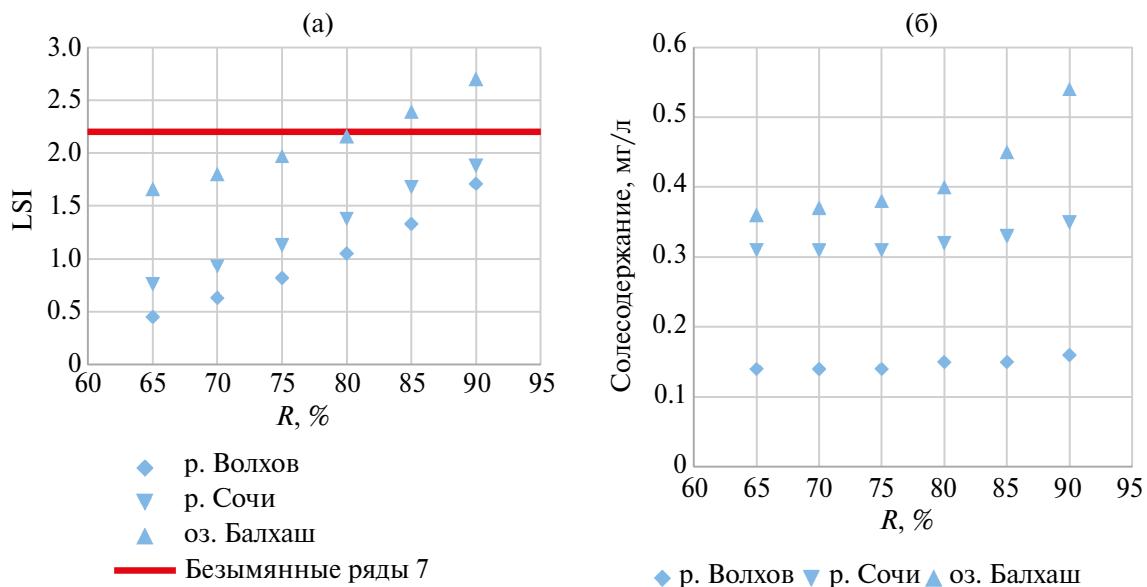


Рис. 8. Зависимость индекса насыщения труднорастворимых веществ (LSI) в концентрате (а) и качество пермеата второй ступени обратного осмоса (б) от степени извлечения пермеата в установке обратного осмоса первой ступени при разном солесодержании исходной воды: р. Волхов (г. Великий Новгород) — 195.6 мг/л , р. Сочи (г. Сочи) — 490.6 мг/л , оз. Балхаш (г. Балхаш) — 1877.6 мг/л .

торые показывают незначительное ухудшение качества получаемой обессоленной воды, что важно при эксплуатации системы водоподготовки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для повышения степени извлечения пермеата есть разные баромембранные осмотические процессы, которые имеют свою область применения, свои преимущества и недостатки. Прямой осмос (FO) и его разновидность с приложением внешнего давления (PAFO) целесообразно применять для концентрирования сложных загрязненных вод, идеальным случаем его применения будет система с природным источником соленой воды в качестве приемного раствора с последующим сбросом без регенерации. Но такой ресурс есть не всегда, и использование прямого осмоса зачастую сопряжено с необходимостью предусматривать систему регенерации, например на основе обратного осмоса, что повышает капитальную стоимость и стоимость эксплуатации такой системы.

Обратный осмос с осмотической поддержкой (OARO) позволяет преодолеть предел концентрирования на обратноосмотических мембранных элементах и достигать предела растворимости солей. Из-за сильного влияния эффекта концентрационной поляризации интенсивность переноса воды через мембрану на порядок меньше, чем в обратноосмотической мемbrane, что требует большой площади фильтрации и, соответственно, высоких капитальных затрат. Но это окупается при эксплуатации – использование этого процесса позволяет в 5 раз сократить затраты энергии на концентрирование по сравнению с многокорпусной дистилляцией [13].

Полупериодический обратный осмос (CCD, CCRO, тупиково-циркуляционный обратный осмос) представляет хорошую альтернативу привычному обратному осмосу, позволяя достичь высокой степени концентрирования (до 95%) по сравнению с последним, используя высокую скорость протока над мембраной и фильтрование пересыщенного раствора труднорастворимых веществ в каналах концентрирования в пределах времени индукции отложений. Это требует дополнительного высоконапорного циркуляционного насоса и современной системы автоматизации.

Высокая степень извлечения (до 87%) в процессе обратного осмоса с пульсирующим пото-

ком (PFRO), так же как и в полупериодическом обратном осмосе, основана на работе в режиме пересыщения труднорастворимых веществ, но отличие заключается в том, что рециркуляции в каналах концентрирования не осуществляется. Это заметно упрощает аппаратурное оформление процесса (не требуется циркуляционный насос и циркуляционный контур, в отличие от CCRO), но невыраженная гидродинамика существенно снижает время фильтрации (не более 50 с), что ограничивает максимальную степень концентрирования. Недостаток гидродинамики компенсируется комплексным механизмом очистки поверхности мембраны при сбросе концентратра. По мнению авторов настоящей статьи, очевидны негативные последствия столь частых гидроударов для мембранных элементов и трубопроводной обвязки установки в горизонте эксплуатации 3–5 лет, типичных для срока службы обратноосмотических мембранных элементов.

Для воды с низким солесодержанием (до 2 г/л) в качестве способа увеличения степени извлечения пермеата предлагается введение потока рециркуляции концентратра [24] и показана возможность увеличения степени извлечения от 80 до 92% в зависимости от начального солесодержания. Для работы установки обратного осмоса в таком режиме необходим постоянный контроль индекса насыщения труднорастворимых веществ (индекс Ланжелье) и корректировка pH исходной воды при необходимости. Также важна хорошая система предварительной подготовки воды для снижения коллоидного загрязнения мембранных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Jones E., Qadir M., van Vliet M.T.H., Smakhtin V., Kang S.* The state of desalination and brine production: A global outlook // *Sci. Total Environ.* 2019. V. 657. P. 1343.
2. *McGinnis R.L., Elimelech M.* Energy requirements of ammonia–carbon dioxide forward osmosis desalination // *Desalination*. 2007. V. 207. P. 370.
3. *Xu Y., Zhu Y., Chen Z., Zhu J., Chen G.* A Comprehensive Review on Forward Osmosis Water Treatment: Recent Advances and Prospects of Membranes and Draw Solutes // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2022. V. 19. P. 8215.
4. *Abounahia N., Ibrar I., Kazwini T., Altaee A., Samal A.K., Zaidi S.J., Hawari A.H.* Desalination by the forward osmosis: Advancement and challenges // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 886. P. 163901.

5. FO plant completes 1-year of operation. Water Desalination Report: 2–3. 15 Nov 2010. URL: <https://www.desalination.com/articles/fo-plant-completes-1-year-of-operation> (дата обращения: 15.09.2024).
6. Altaee A., Braytee A., Millar G.J., Naji O. Energy efficiency of hollow fibre membrane module in the forward osmosis seawater desalination process // J. Membr. Sci. 2019. V. 587. P. 117165.
7. Forward Osmosis – A Brief Introduction. Water Today. 2017. URL: <https://idadesal.org/wp-content/uploads/2018/11/140824-Nicoll-IDA-White-Paper-Forward-Osmosis-A-Brief-Introduction.pdf> (дата обращения: 30.09.2024).
8. Андрианов А.П., Янцен О.В., Ефремов Р.В. Прямой осмос сегодня: перспективы и ограничения // Мембранные и мембранные технологии. 2023. Т. 13. № 4. С. 312.
9. Blandin G., Verliefde A., Tang C.Y., Childress A.E., Le-Clech P. Validation of assisted forward osmosis (AFO) process: impact of hydraulic pressure // Journal of membrane science. 2013. V. 447. P. 1.
10. FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual. URL: <https://www.dupont.com/content/dam/dupont/amer/us/en/water-solutions/public/documents/en/RO-NF-FilmTec-Manual-45-D01504-en.pdf> (дата обращения: 04.10.2024).
11. Toray sea water reverse osmosis membranes. URL: <https://www.water.toray/products/ro/#sea-water> (дата обращения: 30.09.2024).
12. Toyobo MC membrane module for brine concentration. URL: https://www.toyobo-mc.jp/wordpress/wp-content/uploads/2023/10/TMC-Brochure_BC_2305.pdf (дата обращения: 07.10.2024).
13. Innovative brine concentration using osmotically assisted reverse osmosis (OARO) process and advanced hollow fiber membrane. URL: http://worldwatersummit.in/presentation/2023/Day-1/Takahhito_nako.pdf (дата обращения: 15.10.2024).
14. Ju J., Lee S., Kim Y., Cho H., Lee S. Theoretical and Experimental Analysis of Osmotically Assisted Reverse Osmosis for Minimum Liquid Discharge // Membranes. 2023. V. 13. P. 814.
15. Пантелейев А.А., Пантелейев А.А., Рябчиков Б.Е., Сидоров А.Р., Смирнов В.Б. Высокоэффективные УОО с мембранными элементами рулонного типа // Новое в российской электроэнергетике. 2024. № 8. С. 15.
16. Boyd M. Twenty-first century reverse osmosis disrupts traditional technology // World Water. 2019. V. 4. P. 26.
17. Матусевич Л.Н. Кристаллизация из растворов в химической промышленности. М.: Химия, 1968. С. 304.
18. Qian L., Guo-Rong X., Rasel D. Inorganic scaling in reverse osmosis (RO) desalination: Mechanisms, monitoring, and inhibition strategies // Desalination. 2019. V. 468. P. 114065.
19. Elimelech M., Phillip W.A. The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment // Science. 2011. V. 333. P. 712.
20. Gal Z., Efraty A. CCD series no. 18: record low energy in closed-circuit desalination of ocean seawater with NanoH2O elements without ERD // Desalination Water Treatment. 2015. V. 57. P. 9180.
21. Jungbin K., Linyinxue D., Ho S., Kiho P. Current progress in semi-batch reverse osmosis for brackish water desalination // Desalination. 2024. V. 578 P. 117434.
22. Liberman B. Three methods of forward osmosis cleaning for RO membranes // Desalination. 2018. V. 431. P. 22.
23. Liberman B., Lior E., Greenberg G. Pulse Flow RO – The new RO technology for waste and brackish water applications // Desalination. 2020. V. 479. P. 114336.
24. Смирнов А.А., Смирнов В.Б. Повышение эффективности двухступенчатых установок обратного осмоса // Новое в российской электроэнергетике. 2024. № 7. С. 24.

Reagent-Free Methods for Reducing the Amount of Concentrate from Reverse Osmosis Plants

A. A. Smirnov^{1,*}, V. B. Smirnov^{2,**}

¹National Research University „MPEI“, Krasnokazarmennaya, 14, Moscow, 111250, Russia

²Mediana-Filter Research and Production Company JSC, 1 Tkatskaya St., Moscow, 105318, Russia

*e-mail: SmirnovAlAlex@mpei.ru

**e-mail: Smirnov@mediana-filter.ru

Of all developed water desalination processes, reverse osmosis takes the leading place – 69% of the world's fresh water production is attributed to reverse osmosis plants, one of the efficiency criteria of which is the amount of concentrate produced. The article describes some modern baromembrane reagentless methods of reducing the amount of concentrate of reverse osmosis plants, the main criterion for the selection of which is the experience of their industrial application. Such processes as forward osmosis, pressure assisted forward

osmosis, osmotically assisted reverse osmosis, semi-batch reverse osmosis, pulse flow reverse osmosis are considered, their working principle and results of practical application in industry or large-scale pilot tests are given.

Keywords: reverse osmosis, efficiency, direct osmosis, osmotic assisted reverse osmosis, semi-periodic reverse osmosis, pulsed flow reverse osmosis