

УДК 620.97

СИСТЕМА РЕКУПЕРАЦИИ ЭНЕРГИИ В МАЛОЙ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ ОБРАТНОГО ОСМОСА: ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Кызыров К.Б., Кокабаева Р.А.

Карагандинский технический университет, Караганда, e-mail: raushan-1997@mail.ru

В данной статье рассматриваются пути повышения энергической эффективности при опреснении морской воды обратным осмосом, которые позволяют решить проблему с нехваткой чистой (питьевой) воды в засушливых регионах. Мембрана обратного осмоса представляет собой полупроницаемую мембрану, которая позволяет отделять растворенные ионы и более крупные растворенные частицы от питательной воды. В сосуде высокого давления используется одинарная мембрана. Система снижает энергопотребление за счет уменьшения размера основного насоса высокого давления. Кроме того, эксплуатационные расходы снижаются за счет повышения давления части опресненной воды в мембране за счет сброса соленой воды из мембраны. Проведена экспериментальная проверка предложенной системы, разработана имитационная модель и проведено сравнение с экспериментальным результатом для проверки системы в различных рабочих условиях. В этом исследовании изучается эффективность установки обратного опреснения воды в сочетании с СРЭ. В качестве системы рекуперации энергии используется теплообменник давления. Была изготовлена установка обратного опреснения воды, которая была подключена к СРЭ через четыре соленоидных клапана высокого давления. Система автоматически управляется с помощью отдельно разработанного блока управления.

Ключевые слова: водоснабжение, обратный осмос, мембранная технология, энергическая эффективность, опреснение, восстановление энергии

ENERGY RECOVERY SYSTEM IN A SMALL REVERSE OSMOSIS DESALINATION PLANT: EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES

Kyzyrov K.B., Kokabayeva R.A.

Karaganda Technical University, Karaganda, e-mail: raushan-1997@mail.ru

This article discusses ways to improve energy efficiency in seawater desalination by reverse osmosis, which can solve the problem with the lack of clean (drinking) water in arid regions. The reverse osmosis membrane is a semi-permeable membrane that separates dissolved ions and larger dissolved particles from the feed water. The pressure vessel uses a single diaphragm. The system reduces energy consumption by reducing the size of the main high pressure pump. In addition, operating costs are reduced by increasing the pressure of a portion of the desalinated water in the membrane due to the discharge of salt water from the membrane. An experimental check of the proposed system is carried out, a simulation model is developed and a comparison is made with the experimental result to test the system under various operating conditions. This study examines the efficiency of a reverse desalination plant in combination with an EDS. A pressure heat exchanger is used as an energy recovery system. A reverse desalination unit was manufactured, which was connected to the SRP through four high pressure solenoid valves. The system is automatically controlled by a separately developed control unit.

Keywords: water supply, reverse osmosis, membrane technology, energy efficiency, esalination, energy recovery

Нехватка питьевой воды, особенно в развивающихся странах, побудила исследователей попытаться решить эту проблему. Опреснение – один из самых эффективных методов решения этой проблемы. Среди методов опреснения обратный осмос (ОО) имеет более высокий приоритет, чем методы термического опреснения, из-за его сравнительно ограниченного потребления энергии. Были внедрены различные методы для повышения производительности опреснительных установок обратного осмоса. В этом исследовании основное внимание уделялось использованию системы рекуперации энергии (СРЭ) для повышения производительности небольшой установки обратного осмоса в удаленных районах. Емкость агрегата составила 2,4 м³/день, занятые двумя цилиндрами двустороннего действия, элементы управления которых работают как СРЭ. Экспериментальная установка ис-

пользуется для проверки эффективности предложенного СРЭ.

Имитационная модель спроектирована и реализована, чтобы позволить изменять системные параметры завода. Были представлены и сравнены экспериментальные и модельные результаты различных систем давления. Полученные результаты показали хорошее соответствие значений экспериментальной и имитационной модели. Выделено влияние коэффициента восстановления на энергосбережение. СРЭ сэкономила потребление энергии на 80%. Анализ стоимости небольшой опреснительной установки обратного осмоса с системой СРЭ и без нее был проведен и показал значительное снижение общей стоимости.

Общий объем запасов воды в мире составляет около 1,4 млрд км³. 97% этого количества находится в океанах, а 2% хранится в виде льда в полярных регионах. До-

ступный процент пресной воды составляет около 1 %, и она используется для нужд растений, животных и человека [1].

В последние годы подземные воды были загрязнены из-за роста населения, объемов промышленности и сельского хозяйства. Чистая вода – самый ценный ресурс в мире. Опреснение морской и солоноватой воды – важное решение проблемы нехватки питьевой воды в мире. Есть два разных метода получения пресной воды путем опреснения. Первый метод известен как опреснение с фазовым переходом, или метод термического опреснения, а второй – мембранный процесс. В процессе опреснения с фазовым переходом вода переходит из жидкой фазы в пар с использованием тепла и снова возвращается в жидкость за счет конденсации. В природе опреснение с фазовым переходом приводит к дождю, который является основным источником пресной воды на нашей планете.

Материалы и методы исследования

Процессы термического опреснения требуют большого количества энергии. Было подсчитано, что для производства 22×10^6 м³ воды в сутки требуется около 203×10^6 т нефти в год.

Мембранный процесс зависит от действия движущей силы, такой как градиенты давления, концентрации и температуры. Принцип действия мембранных процессов может быть электродиализным (ЭД) и обратным осмосом (ОО). В электродиализных системах перенос ионов из камеры питательной воды снижает соленость. Соленая вода содержит растворенные соли, разделенные на положительно и отрицательно заряженные ионы. Положительные ионы (катионы) будут двигаться к отрицательному электроду (катоде), а отрицательные ионы (анионы) будут двигаться к положительному электроду (аноду) через мембраны. Система обратного осмоса зависит от свойств полупроницаемых мембран. Эти мембраны используются для отделения воды от со-

леного раствора под высоким давлением. Пресная вода может попасть в отсек рассола под действием осмотического давления. В таблице показаны наиболее важные приемы опреснительных процессов.

Производительность и долговечность одноступенчатого обратного осмоса с морской водой были проанализированы. Исследованы одноступенчатые системы опреснения морской воды при высоких температурах и солености с использованием мембранных модулей обратного осмоса ПЭК-1000 а также оптимизировали работу установок мембранной фильтрации обратного осмоса [2].

Были изучены эффекты конструкции и условий эксплуатации. Кроме того, была разработана упрощенная математическая модель, чтобы показать эффект отторжения одновалентных и двухвалентных ионов. Результаты показали, что производительность можно увеличить на 20%, используя мембраны обратного осмоса для опреснения морской воды. Изучено влияние температуры наружного воздуха и условий влажности почвы на скорость мембранной фильтрации воды. Результаты показали, что при высокой температуре наружного воздуха скорость просачивания воды через мембрану увеличивается. Также при низкой температуре наружного воздуха снижается скорость фильтрации воды.

При высокой влажности почвы скорость просачивания воды через мембрану увеличивалась, а при низкой влажности почвы скорость просачивания воды снижалась. Системы подповерхностного забора для установок обратного опреснения морской воды использовались для улучшения качества воды, сокращения использования химикатов, уменьшения углеродного следа и снижения стоимости производства. Их результаты показали, что общие эксплуатационные расходы установок обратного опреснения морской воды снизились с 5 до 30% при использовании подземных систем забора воды.

Процессы опреснения

Процессы фазового перехода	Мембранные процессы
1. Многоступенчатая вспышка (МСВ)	1. Обратный осмос (ОО)
2. Многоступенчатое кипячение (МК)	
3. Компрессия пара (БК) – Механический (MVC) – Тепловой (TVC)	
4. Замораживание	
5. Солнечные кадры – Обычные кадры – Специальные кадры	2. Электродиализ (ЭД)

Исследовали работу опреснительной установки обратного осмоса при различных значениях солености морской воды. В качестве системы рекуперации энергии использовалась турбина Пелтона. Было изучено влияние компонентов системы на экономику и анализ затрат на производительность. По результатам можно сделать вывод, что система достигла максимальной эффективности 5,82%, а стоимость продукта составляет 2,451 долл. США/м³ при солености исходной воды 35 000 частей на миллион.

Добавление импульсной турбины с турбоагенателем в качестве системы рекуперации было изучено Грюндишем и Шнайдером, было проанализировано потребление энергии для трех заводов. Было проведено сравнение энергопотребления систем высокого давления и насосов высокого давления. Результаты показали, что потребление энергии 2,58 кВтч/м³ воды для всей системы питательного насоса высокого давления возможно. Между тем использовали подкачивающий насос в сочетании с турбиной Пелтона в системе опреснения СРЭ для обратного осмоса. Эта СРЭ снизила удельное потребление энергии для опреснительных установок. Также при использовании гидравлического оборудования уменьшается рассеяние энергии, без необходимости дросселировать какие-либо клапаны. Другой СРЭ, в котором используется обменник давления с большим ротором, был разработан Стовером для установок обратного осмоса. Результаты показали, что роторный обменник давления влияет на производительность опреснительных установок. Были изучены различные методы, используемые для снижения потребления энергии. Эти методы включали различные типы теплообменников давления, такие как турбины типа Фрэнсиса, турбины Пелтона и усилители гидравлического давления. Кроме того, были проанализированы и оценены данные нескольких реальных заводов, включая простую партию и простую партию с установками подачи и отбора. Был сделан вывод, что подходят только гидроусилители давления, поскольку они компактны, не требуют обслуживания и доступны в различных размерах. Анализ и принцип работы теплообменника динамического давления, используемого в установках обратного осмоса [3].

Из предыдущих исследований можно сделать вывод, что использование методов мембранного опреснения обратного осмоса очень важно для производства питьевой воды по экономической цене для отдаленных районов. Это исследование пытается восполнить пробел, связанный с наличием простой, экономической, легко управляемой,

но эффективной системы СРЭ для использования в удаленных районах.

Предлагаемый СРЭ в сочетании с ОО сравнивается с предыдущими испытаниями с точки зрения эффективности и экономики. Это делается с помощью следующих шагов:

- В эксперименте используется система рекуперации энергии, соединенная с установкой обратного осмоса, и выходящая пресная вода проверяется, чтобы подтвердить пригодность добытой воды для питья.

- Постройте математическую модель и изучите влияние различных параметров на производительность и эффективность установки.

- Сравните экспериментальные результаты и результаты моделирования с предыдущими исследованиями.

- Проверьте наглядность предлагаемой системы с экономической точки зрения.

Текущее исследование предлагает СРЭ, которым легко управлять, с возможностью изменения контроллера для соответствия различным условиям эксплуатации, а также с возможностью производства дешевой пресной воды с использованием небольшой установки обратного осмоса для удаленных районов. Система снижает энергопотребление за счет уменьшения размера основного насоса высокого давления. Кроме того, эксплуатационные расходы снижаются за счет повышения давления части опресненной воды в мембране за счет сброса соленой воды из мембраны. Проведена экспериментальная проверка предложенной системы, разработана имитационная модель и проведено сравнение с экспериментальным результатом для проверки системы в различных рабочих условиях.

В этом исследовании изучается эффективность установки обратного опреснения воды в сочетании с СРЭ. В качестве системы рекуперации энергии используется теплообменник давления. Была изготовлена установка обратного опреснения воды, которая была подключена к СРЭ через четыре соленоидных клапана высокого давления. Система автоматически управляется с помощью отдельно разработанного блока управления. Основные компоненты установки обратного опреснения воды:

- Насос высокого давления (НВД) предназначен для обеспечения оптимального потока, необходимого для мембраны, в зависимости от солености и производительности системы. Тип насоса – плунжерный, медный, с расходом 11,0 л/мин, давлением до 100 бар и мощностью двигателя 2,0 л.с. при частоте вращения 1450 об/мин.

- Насос низкого давления (ННД) используется для обеспечения подачи по-

ложительного давления в насос высокого давления для уменьшения кавитации и зарядки элементов теплообменника давления на такте всасывания. ННД подает 20 л/мин при давлении 4 бара.

– Насос подкачки (НП) используется для повышения давления питательной воды до рабочего уровня ГЭС. Это позволяет передавать на мембрану большую мощность без увеличения мощности ГЭС.

– Реле низкого давления используется в качестве контроллера, который включает и выключает систему, обеспечивая нормальную работу устройства.

Реле высокого давления подключено к нагнетательной линии насоса для защиты стороны высокого давления системы от чрезмерного давления. На рис. 1 показана схема опреснительной установки обратного осмоса с системой рекуперации энергии.

Мембрана обратного осмоса представляет собой полупроницаемую мембрану, которая позволяет отделять растворенные ионы и более крупные растворенные частицы от питательной воды. В сосуде высокого давления используется одинарная мембрана.

Модель мембраны SW30-2540 с активной площадью 2,8 м² и расходом 2,6 м³ в день. Максимальная рабочая температура и давление составляют 45 °С и 69 бар соответственно при перепаде давления 1,0 бар. Сосуд высокого давления из специальной нержавеющей стали используется для поддержания максимального рабочего давления мембраны 70 бар [4].

Патронный фильтр используется для удаления умеренного количества частиц

из жидкостей размером от 50 до 0,035 мкм. Материал фильтрующего картриджа – полипропилен, с расходом 30 л/мин и максимальным рабочим давлением 6 бар, с перепадом давления 0,14 бар. Загрязнения и примеси удаляются с помощью угольного фильтра на основе химической адсорбции.

СРЭ – это элемент обменника давления (ТОД), который имеет два цилиндра двухстороннего действия, четыре двухходовых направляющих клапана, четыре обратных клапана и игольчатый клапан. Каждый цилиндр имеет следующие характеристики: длина хода 350 мм, рабочий объем 7,2 л, вес 15 кг, максимальное и минимальное рабочее давление 80 и 3,5 бар соответственно. СРЭ использует рассол под высоким давлением и высокой соленостью, выходящий из мембраны, для повышения давления морской воды. Вместо того чтобы выбрасывать воду под высоким давлением и высокой соленостью с помощью дроссельного клапана, СРЭ использует эту воду для повышения давления морской воды от низкого до значения, близкого к рабочему давлению мембраны. Для управления потоком на входе и выходе на стороне высокого давления используется электромагнитный клапан, управляемый микроконтроллером PIC18F2550.

Результаты исследования и их обсуждение

Клапан имеет максимальное рабочее давление 70 бар. Система управления теплообменником давления состоит в основном из импульсного источника питания 24 В постоянного тока в качестве источника питания.



Рис. 1. Схема опреснительной установки обратного осмоса с использованием системы рекуперации энергии

Морская вода используется для подпитки системы опреснения обратного осмоса. Вода поступает в насос низкого давления, который повышает давление до 4 бар. Реле низкого давления делит нагнетание на два пути. Первый путь входит в насос высокого давления, который повышает давление заборной воды до желаемого давления в системе в зависимости от характеристик воды. Слив от насосов высокого давления подается в мембранный напорный резервуар. Этот процесс дает 10% от общего расхода, который поступает в резервуар в качестве доочистки пермеата угольным фильтром. Остальные 90% используются как рассол высокого давления и высокой солености (ВДВС) под давлением в системе и регулируются электромагнитными клапанами. Второй путь используется для зарядки элементов ТОД на такте всасывания и регулируется через задвижку, подключенную к расходомеру. СРЭ имеет два хода для каждого цилиндра, и каждый цилиндр работает попеременно, как показано на рис. 2.

Во время такта всасывания неочищенная морская вода поступает в элемент ТОД под давлением 4 бар и расходом 12 л/мин. Другая сторона поршня питается рассолом и соединена с атмосферным давлением, а дроссельная заслонка используется

для регулирования потока. В ходе нагнетания рассол под высоким давлением попадает в элемент ТОД, который заполняется неочищенной морской водой, позволяя воде проходить через дроссельный клапан с давлением нарастания сопротивления ниже, чем давление рассола на 4 бара, при расходе 12 л/мин.

В конце каждого хода подачи направление движения противоположно, чтобы изменить путь рассола к другому элементу и соединить линию разгрузки с элементом, завершившим ход подачи [5].

Было установлено, что соленость пермеатной воды составляет 400 частей на миллион. Весь пермеат и отклоненный поток сливаются обратно в один и тот же питающий резервуар, система работает по замкнутому циклу из-за отсутствия линии подачи на площадке эксперимента. Давление в системе регулируется с помощью дроссельной заслонки на линиях подачи ТОД, а скорость всасываемого потока регулируется дроссельной заслонкой на сливе рассола. Перед началом экспериментов компоненты опреснительной установки обратного осмоса были собраны и подключены с использованием соответствующих соединений высокого и низкого давления на экспериментальной площадке.

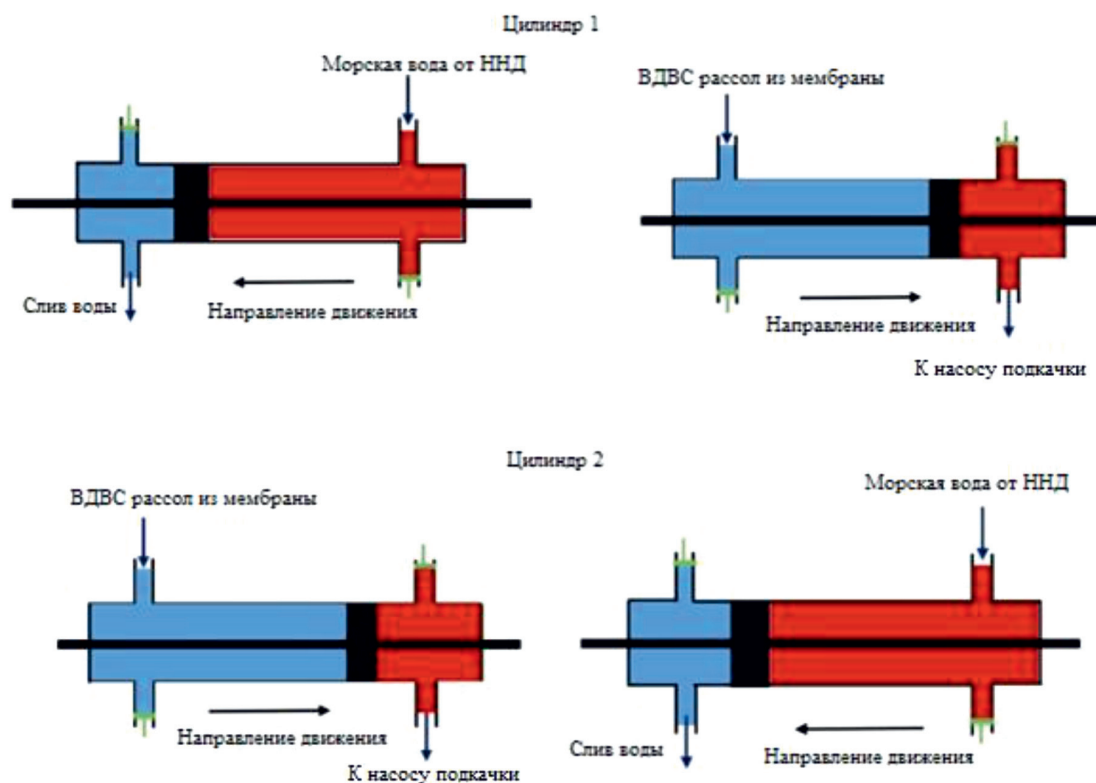


Рис. 2. Принципиальная схема двух цилиндров теплообменника давления

Опреснительная установка была испытана при различных давлениях от 10 до 60 бар, каждый раз увеличивая давление на 5 бар. Все данные о расходе рассола и давлениях записывались одновременно. Эффективность нагнетательного теплообменника рассчитывалась как отношение давления рассола к давлению подачи нагнетательного обменника.

$$\eta_{\text{тод}} = \frac{\rho_F \cdot P_d}{\rho_b \cdot P_b},$$

где ρ_F – плотность морской воды в кг/м³, P_d – давление подачи в Па, ρ_b – плотность рассола в кг/м³, а P_b – давление рассола в Па.

Энергосбережение – это разница в мощности, потребляемой с СРЭ и без нее, и рассчитывается следующим образом:

$$\text{Энергосбережение} = [W_{\text{нвд}} - (\eta_{\text{тод}} \times P_b \times \\ \times (1 - RR) \times Q_F)] - W_{\text{пн}},$$

где $W_{\text{нвд}}$ – мощность насоса высокого давления, $\eta_{\text{тод}}$ – КПД теплообменника давления, RR – коэффициент извлечения мембраны и представляет собой соотношение между расходом пермеата и расходом исходного материала, Q_F – расход исходного материала в м³/с, $W_{\text{пн}}$ – мощность подкачивающего насоса. Мощность насоса высокого давления и подкачивающего насоса рассчитывается следующим образом:

$$W_{\text{нвд}} = \Delta P_{\text{вд}} \times Q_{\text{вд}} / \eta_{\text{вд}},$$

$$W_{\text{вд}} = \Delta P_{\text{вд}} \times Q_{\text{пн}} / \eta_{\text{пн}},$$

где $\Delta P_{\text{вд}}$ и $\Delta P_{\text{пн}}$ – перепады давления в насосе высокого давления и в подкачивающем насосе, $Q_{\text{вд}}$ и $Q_{\text{пн}}$ – скорости потока насоса высокого давления и подкачивающего насоса, соответственно, $\eta_{\text{вд}}$ и $\eta_{\text{пн}}$ – КПД насоса высокого давления и подкачивающего насоса соответственно.

Заключение

Значения КПД НВД и ПН экспериментально составили 80 % и 70 % соответственно. Количество энергии, используемой подкачивающим насосом для повышения скорости потока рассола до рабочего давления мембраны, намного меньше энергии, сэкономленной в насосе высокого давления.

Производительность установки повышается за счет добавления СРЭ для использования рассола высокого давления, выделяемого из потока отвода мембраны. Было замечено, что чем ниже коэффициент восстановления, тем больше экономится энергии. Энергосбережение может достигать 80 % при коэффициенте восстановления 10 %. При сравнении результаты экспериментов и моделирования показали лишь незначительные различия. Экономический анализ показал, что СРЭ снизит стоимость производства пресной воды до 65 % от ее стоимости при использовании установки с суточной производительностью 12 м³. Этот коэффициент увеличивается до 78 %, когда ежедневная производительность завода составляет 100 м³.

Список литературы

1. Как утеплить аккумулятор на зиму своими руками? [Электронный ресурс]. URL: <https://akbzona.ru/stati/uteplitel-dlya-akkumulyator> (дата обращения: 22.03.2021).
2. Эксплуатация автомобильного аккумулятора: работоспособность, неисправности и уход. [Электронный ресурс]. URL: <https://avtonov.info/ekspluatatsija-avtomobilnogo-akkumuljatora> (дата обращения: 22.03.2021).
3. Особенности зимней эксплуатации АКБ. [Электронный ресурс]. URL: <https://220volt.com.ua/news/useful/akkumulyatornie-batarei/osobennosti-zimnej-ekspluatatsii-akb.html> (дата обращения: 22.03.2021).
4. Аккумуляторная батарея с автоматическим внутренним подогревом // Патент России № 2398315. Патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Транспорт», опублик. 27.08.2010 г.
5. Бухтояров И.В., Бухтояров В.Ф. Устройство для автоматического подогрева аккумуляторной батареи в зимнее время // Патент РФ № 2672948. Патентообладатели Бухтояров И.В., Бухтояров В.Ф. 2018. Бюл. № 31.