

ПЕРСПЕКТИВЫ ОПРЕСНЕНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ ДЛЯ УСТОЙЧИВОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРИЧЕРНОМОРСКИХ РЕГИОНОВ

PROSPECTS OF SEA WATER DESALINATION FOR SUSTAINABLE WATER SUPPLY OF THE BLACK SEA COASTAL REGIONS

Кандидат технических наук, доцент Сергей СУРКОВ

*Одесский национальный политехнический университет, кафедра Прикладной экологии,
65044, Украина, г. Одесса, проспект Шевченко, 1
e-mail: ssv@onu.ua*

аспирант Хуссам ГАНЕМ (Республика Ливан)

*Одесский национальный политехнический университет, кафедра Прикладной экологии,
65044, Украина, г. Одесса, проспект Шевченко, 1
e-mail: sami98_lb@yahoo.com*

Резюме. *Опреснение морской воды становится все более актуальным фактором для устойчивого развития многих регионов. В ближайшие десятилетия для водоснабжения населения и потребностей сельского хозяйства будет опресняться вода из различных водоемов, в том числе и из Черного моря. Одной из наиболее энергоэффективных технологий опреснения морской воды является механическое сжатие пара (МСП). В статье выполнено математическое моделирование опреснительной установки с механическим сжатием пара. Определены режимы работы опреснительной установки, обеспечивающие минимальную себестоимость опресненной воды при различной солености морской воды. Установлено, для каждого значения солесодержания морской воды существует оптимальное значение солесодержания кипящего рассола в испарителе. Получена аппроксимирующая зависимость для расчета оптимального солесодержания.*

Ключевые слова: *устойчивое водоснабжение, опреснение морской воды, механическое сжатие пара, математическое моделирование.*

Abstract. *Desalination of sea water is becoming an increasingly important factor for the sustainable development of many regions. In the coming decades, water from the various reservoirs, including from the Black Sea, will be desalinated for water supply of the population and the needs of agriculture. One of the most energy efficient technologies for the desalination of seawater is mechanical vapor compression (MVC). The article contains mathematical modeling of a desalination plant with mechanical vapor compression. The modes of operation of the desalination plant, which provide the minimum cost of desalinated water at different salinities of seawater, have been determined. It is established that for each value of the salt content of sea water there is an optimal value of the salt content of boiling brine in the evaporator. A correlation is obtained for calculating of the optimal salt content.*

Key words: *sustainable water supply, seawater desalination, mechanical vapor compression, mathematical modeling.*

1. Введение

Устойчивое водоснабжение населения является одним из важнейших факторов устойчивого развития. Однако, по прогнозам аналитиков, в ближайшие десятилетия пресная вода станет одним из наиболее дефицитных ресурсов в мире. Всё большее количество стран и регионов будут потреблять опресненную воду [1]. Коснётся эта проблема юга

Украины и других стран, расположенных на побережье Черного моря, где преобладает засушливый климат [2].

Цель данной статьи – проанализировать перспективы опреснения воды Черного моря и сравнить ожидаемую стоимость опресненной воды со стоимостью воды, получаемой из других морей и океанов.

Основное внимание уделено технологии механического сжатия пара (МСП), имеющей

ряд преимуществ по сравнению со своим главным конкурентом – технологией обратного осмоса (ОО). При сопоставимой себестоимости технология МСП обеспечивает значительно лучшее качество воды. Кроме того, установки МСП проще в эксплуатации и не нуждаются в регулярном техническом обслуживании со стороны фирмы-производителя мембран.

Установки с механическим сжатием пара небольшой производительности автономны и экономически выгодны, и могут использоваться для орошения сельскохозяйственных земель, водоснабжения домов, гостиниц и т.д.

2. Основная часть

Схема опреснительной установки с механическим сжатием пара приведена на рис. 1.

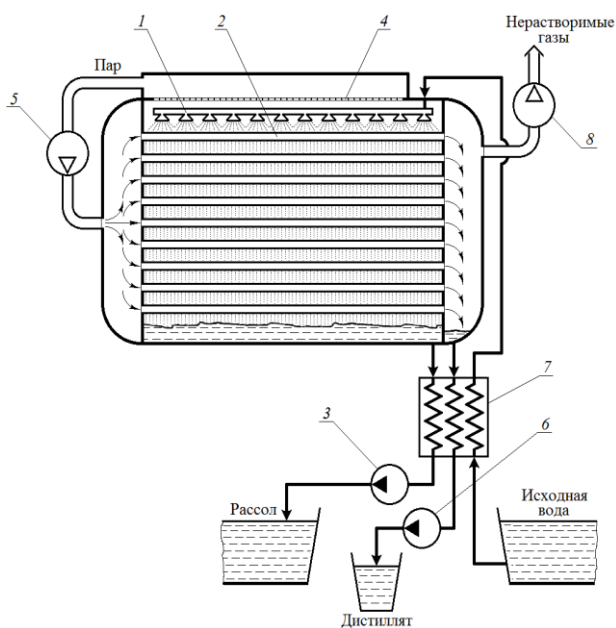


Рис. 1. Схема опреснительной установки с механическим сжатием пара.

Исходная вода разбрызгивается через форсунки 1, попадая на наружную поверхность нагретых труб испарителя-конденсатора 2. Там вода испаряется в тонких пленках. Рассол стекает вниз и откачивается насосом 3, а пар через туманоуловитель (дефлегматор) 4 поступает в компрессор 5. Сжатый и нагретый пар поступает в трубы 2, где он охлаждается и конденсируется. Конденсат откачивается насосом 6. Горячий конденсат и горячий рассол в теплообменнике 7 отдают

тепло питающей морской воде. Вакуум-насос 8 поддерживает внутри испарителя-конденсатора вакуум, что обеспечивает кипение морской воды при заданной температуре (обычно не выше 70 °С).

Следует отметить, что благодаря сжатию пара рассматриваемая установка реализует принцип теплового насоса: низкопотенциальная энергия уходящих потоков трансформируется в высокопотенциальную при повышении температуры, и передается кипящей исходной жидкости. Такая система снижает затраты энергии на производство дистиллята в десятки раз.

Стационарная математическая модель опреснительной установки с механическим сжатием пара разработана в [3, 4]. Однако приведенная там система уравнений является переопределенной, в результате чего итерационный процесс решения приводит к «тривиальному» нулевому решению. Проблема возникает из-за того, что сжатие пара в компрессоре предполагается адиабатным, что однозначно определяет не только давление, но и температуру сжатого пара. Поэтому в [5, 6] был введен дополнительный параметр «избыток мощности», учет которого обеспечил сходимость решения системы уравнений во всем исследованном диапазоне.

В ранее выполненных расчетах [3...5] принималось только одно значение массового содержания морской воды – 4,2 %, что соответствует условиям Красного моря.

В данной статье, используя ранее разработанную математическую модель, определяются оптимальные режимы работы опреснительных установок с механическим сжатием пара при различной солености морской воды, соответствующей различным морям и заливам. Это позволило, в частности, оценить стоимость опресненной воды для условий Черного моря.

Влияние солености морской воды на работу опреснительной установки определяется параметром BPE – повышением температуры кипения по сравнению с температурой кипения пресной воды. Эту величину можно рассчитать с помощью системы уравнений, приведенной в [4], и переписанной с учетом правил вычисления полиномов:

$$A = (4,02 \cdot 10^{-6} T + 1,883 \cdot 10^{-4}) T + 8,25431 \cdot 10^{-2}$$

$$B = (-5,2 \cdot 10^{-7} T + 9,02 \cdot 10^{-5}) T - 7,625 \cdot 10^{-4}$$

$$C = (-3 \cdot 10^{-8} T - 3 \cdot 10^{-6}) T + 1,522 \cdot 10^{-4}$$

$$BPE = ((CX + B)X + A)X$$

где BPE – повышение температуры кипения, °C;

T – температура кипения, °C;

X – массовое солесодержание, %.

На рис. 2 приведены графики зависимости параметра BPE от солесодержания при постоянной температуре рассола.

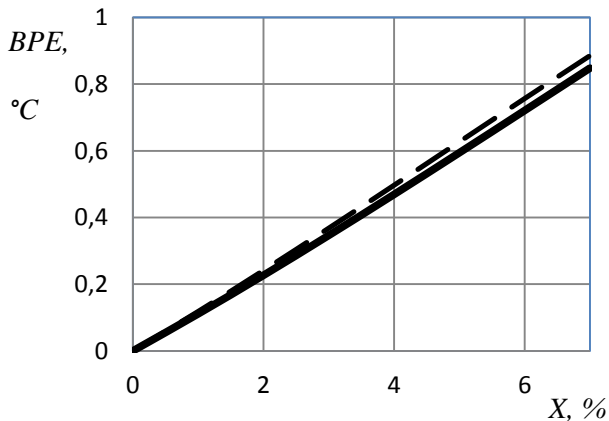


Рис. 2. Зависимость параметра BPE от солесодержания при постоянной температуре рассола $T = 60^\circ\text{C}$ («—») и $T = 70^\circ\text{C}$ («- -»).

Анализ влияния различных эксплуатационных параметров показал, что на себестоимость воды влияет не непосредственно солесодержание морской воды X_f , а солесодержание кипящего раствора в испарителе X_b . Поскольку часть поступающей морской воды испаряется, концентрация X_b всегда больше, чем X_f . В процессе работы опреснительной установки концентрация X_b определяется расходом питающей морской воды M_f . Связь между этими параметрами следует из уравнений сохранения массы воды и соли:

$$\frac{M_f}{M_b} = \frac{X_b}{X_b - X_f}, \quad (1)$$

где M_f – массовый расход поступающей морской воды, кг/с;

M_d – массовый расход производимого дистиллята, кг/с.

При выборе режимов работы опреснителя необходимо минимизировать отложение накипи на стенках испарителя. Как известно, при температуре кипения рассола до 75°C преобладает отложение карбоната кальция, от 75°C примерно до 110°C – гидроксида магния, а свыше 110°C – отложение сульфатной накипи [7]. В большинстве судовых опреснительных установок рекомендуется поддерживать температуру кипения T_b не выше 70°C путем создания в установке соответствующего вакуума [7]. С этими рекомендациями согласуются данные работы [4], где в расчетных примерах, ориентированных на практическое применение, принимается температура кипящего рассола 60°C , а солесодержание – 7%.

На рис. 3 показаны соотношения расходов M_f/M_d , обеспечивающие заданную концентрацию рассола X_b при солесодержании морской воды 1,8%.

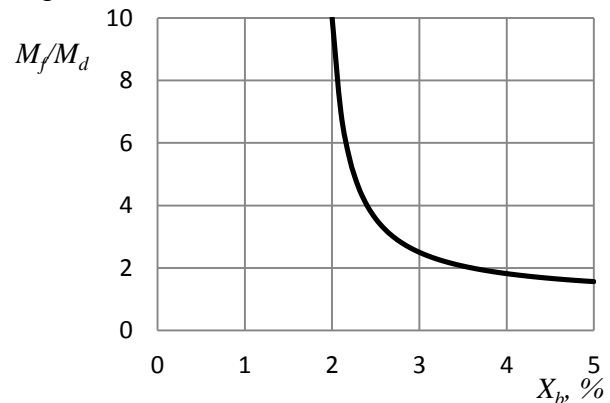


Рис. 3. Зависимость отношения расходов воды M_f/M_d от солесодержания кипящего рассола X_b при солесодержании морской воды $X_f = 1,8\%$.

Методика расчета приведенных годовых затрат на производство опресненной воды приведена в [5]. Согласно принятым допущениям, вся поступающая морская вода нагревается до температуры кипящего рассола в испарителе T_b . После испарения части воды, уходящий рассол должен отдать теплоту поступающей морской воде. Поэтому увеличение расхода питающей морской воды M_f требует значительного увеличения площади предварительных теплообменников.

Методика учитывает все капитальные и эксплуатационные затраты, за исключением затрат на персонал, которые определяются не техническими параметрами установки, а размерами предприятия, законодательством конкретной страны и т.д.

В качестве целевой функции оптимизации, по аналогии с большинством публикаций по теме (например, в [8]), была выбрана себестоимость одного кубометра опресненной воды. Пересчет годовых затрат к себестоимости одного кубометра воды проводился при условии, что опреснительная установка работает 22 часа в сутки и 360 суток в году. Рассматривалось влияние на целевую функцию удельной площади испарителя-конденсатора и солесодержания кипящего раствора. По каждому из этих параметров выполнялась одномерная оптимизация.

Одним из важнейших конструктивных параметров, влияющих на стоимость воды, является площадь испарителя-конденсатора (hidden heat exchanger) A_e , относящаяся к аппарату с производительностью 1 кг/с. Задав этот параметр можно однозначно определить требуемую мощность компрессора, площади вспомогательных теплообменников и потребляемую электрическую мощность, и, следовательно, капитальные и эксплуатационные затраты.

На рис. 4 в качестве примера показаны зависимости приведенных капитальных затрат, эксплуатационных затрат и суммарных затрат от удельной площади испарителя-конденсатора A_e , рассчитанные при солесодержании морской воды $X_f = 1,8 \%$ (Черное море) и солесодержании кипящего рассола $X_b = 2,7 \%$.

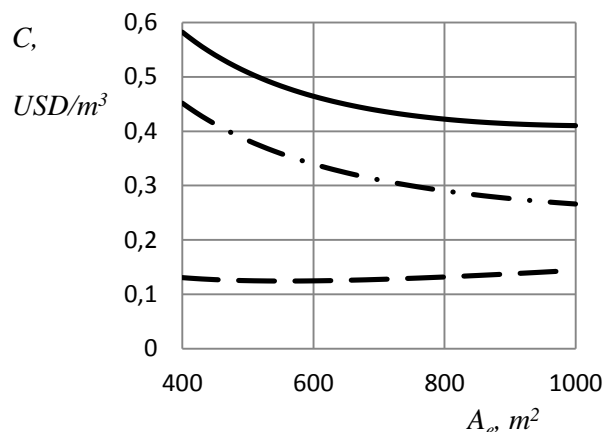


Рис. 4. Зависимость компонентов затрат от удельной площади теплообмена в испарителе-конденсаторе.
«—» — приведенные суммарные затраты;
«- - -» — приведенные капитальные затраты;
«- · - · -» — удельные эксплуатационные затраты.

Из рис. 4 видно, что при увеличении площади поверхности теплообмена испарителя-конденсатора возрастают капитальные затраты из-за увеличения стоимости теплообменника. Но при этом уменьшаются эксплуатационные затраты благодаря снижению потребления электроэнергии.

В исследуемом диапазоне кривая приведенных суммарных затрат не имеет явного минимума. Однако удельные площади поверхности испарителя-конденсатора свыше 1000 м² признаны нереальными, так как это приводит к увеличению стоимости перевозки и монтажа оборудования, не учтенных непосредственно в данной модели.

На рис. 5 показаны зависимости приведенных суммарных затрат от относительной площади теплообменника при $X_f = 1,8 \%$ (Черное море) и при различных значениях X_b .

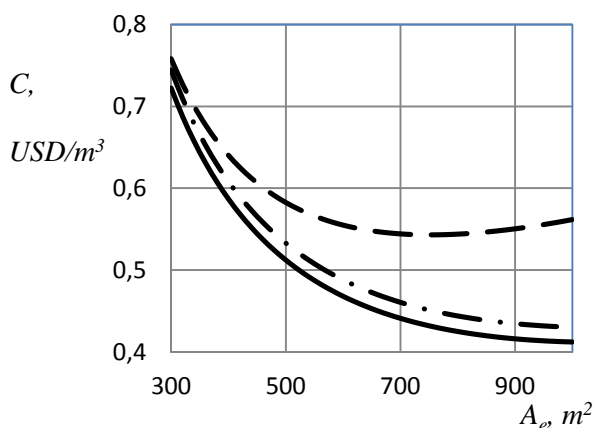


Рис. 5. Зависимость суммарной стоимости 1 м³ опресненной воды при $X_f = 1,8\%$ и различных значениях солесодержания кипящего рассола:

«---» – $X_b = 2\%$; «—» – $X_b = 3\%$;
«-·-·-» – $X_b = 4\%$.)

Из рис. 5 видно, что суммарные затраты имеют минимальные значения, когда X_b составляет около 3 %.

Дальнейшие расчеты выполнялись для постоянной поверхности теплообмена испарителя-конденсатора $A_e = 1000$ м². На рис. 6 показаны зависимости суммарных затрат C от X_b для условий Черного и Средиземного морей и Персидского залива.

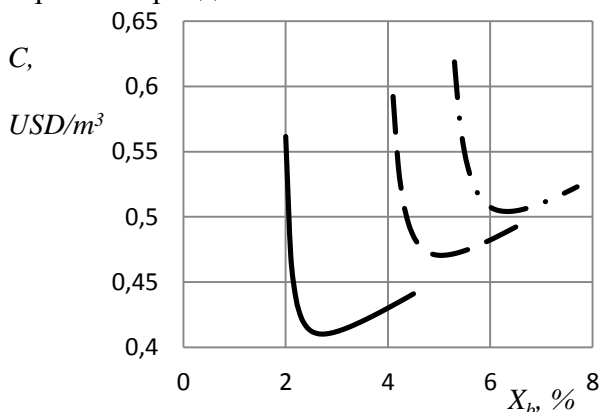


Рис. 6. Зависимость себестоимости опресненной воды C от солесодержания кипящего рассола X_b :

«—» – $X_f = 1,8\%$ (Черное море);
«---» – $X_f = 3,7\%$ (Средиземное море);
«-·-·-» – $X_f = 4,8\%$ (Персидский залив).

Из рис. 6 видно, что каждому значению солёности морской воды X_f соответствует некоторое оптимальное значение солёности кипящего рассола X_b . Очевидно также, что в условиях Черного моря может быть до-

стигнута наименьшая стоимость опресненной воды – примерно 0,41 USD/m³.

На рис. 7 оптимальные значения солесодержания кипящего рассола представлены как функции от солесодержания питающей морской воды.

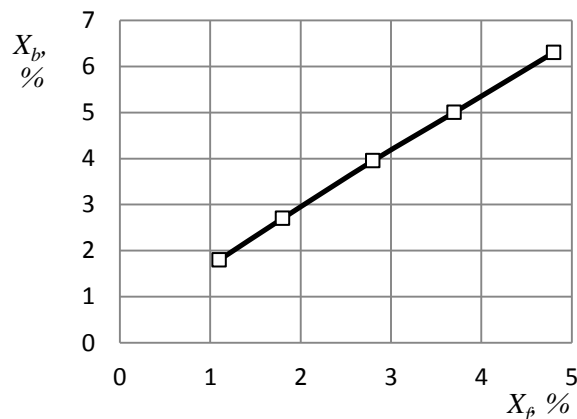


Рис. 7. Оптимальные значения солесодержания рассола X_b для различных значений X_f .

Оптимальные значения X_b можно аппроксимировать линейной зависимостью $X_b = 0,050292 + 1,2138X_f$.

Коэффициент детерминации полученного уравнения близок к единице ($R^2 = 0,9996$), что говорит о хорошем соответствии аппроксимирующей зависимости и исходных точек.

Оптимальное солесодержание рассола можно поддерживать путем регулирования расхода питающей морской воды в соответствии с формулой (1). Например, из рис. 3 видно, что солёности морской воды $X_f = 1,8\%$ и оптимальному значению $X_b = 2,7\%$ со-

ответствует отношение расходов $\frac{M_f}{M_b} = 3$.

3. Заключение

Выполнено математическое моделирование опреснительных установок с МСП, что позволило определить их оптимальные эксплуатационные параметры при опреснении воды из различных водоемов.

Выявлены эксплуатационные параметры, оказывающие наиболее существенное влияние на стоимость опресненной воды. Исследовано влияние этих параметров на приве-

денные капитальные затраты и эксплуатационные затраты.

Одним из важнейших факторов, влияющим на себестоимость опресненной воды, является солесодержание рассола, кипящего в испарителе. Расчеты показали, что каждому значению солёности морской воды X_f соответствует некоторое оптимальное значение солёности кипящего рассола X_b . Получена аппроксимирующая зависимость для оптимального солесодержания рассола.

Опреснение воды Черного моря с помощью установок МСП, например, для потребностей сельского хозяйства, может стать в ближайшие десятилетия экономически выгодным благодаря низкому солесодержанию морской воды. Однако препятствие для широкого внедрения установок МСП состоит в том, что на рынке отсутствуют компрессоры, предназначенные для сжатия водяного пара со степенью сжатия 1,2 – 1,5 с уплотнениями, выдерживающими вакуум около 0,8 – 0,9 bar как на входе, так и на выходе.

Литература

1. Escobar I. C. Sustainable water for future: water recycling versus desalination. / Isabel C. Escobar, Andrea I. Schäfer – Amsterdam: Elsevier, 2010. – 416 p. – ISBN: 978-0-444-53115-5.
2. Тенденції змін планетарного клімату та їх можливого впливу на основні сектори української економіки / за ред. Хвесика М. А. – К.: Логос, 2012. – 268 с.
3. Al-Juwayhel F., El-Dessouky H., Ettouney H. Analysis of single-effect evaporator desalination systems combined with vapor compression heat pumps. – Desalination, № 114 (1997), p. 253-275.
4. El-Dessouky H.T. Fundamentals of sea water desalination. / Hisham T. El-Dessouky, Hisham M. Ettouney. – Amsterdam: Elsevier, 2002. – 670 p. – ISBN: 0-444-50810-4.
5. Kravchenko V.P., Surkov S.V., Ghanem Hussam. Modelling and optimization of seawater desalination process using mechanical vapor compression. – Odes'kyi Politechnichniy Universytet. Pratsi, Issue 2(49), 2016 DOI 10.15276/opu.2.49.2016.08.
6. Surkov S.V., Ghanem Hussam. Optimal operational regimes of sea water desalination plants with mechanical vapor compression. Odes'kyi Politechnichniy Universytet, Pratsi, 2 (52), 54-58. Odessa, 2017. DOI 10.15276/opu.2.52.2017.08
7. Коваленко В.Ф., Лукин Г.Я. Судовые водоопреснительные установки. – Л.: Судостроение, 1970.
8. Lara J.R., Osunsan O., Holtzapple M.T. Advanced Mechanical Vapor-Compression Desalination System. / Desalination, Trends and Technologies, Michael Schorr (Ed.), ISBN: 978-953-307-311-8, InTech, 2011.