

УДК 628.165

Мария Владимировна Козлова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Александр Васильевич Банников

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Светлана Андреевна Банникова

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Исследование работы термической опреснительной установки с контактным испарителем и компрессией паровоздушной смеси

Авторское резюме

Состояние вопроса. Одной из глобальных проблем современности является дефицит пресных водных ресурсов. Опреснение морских и солоноватых вод является перспективным вариантом решения данной проблемы. Наиболее распространенными технологиями опреснения являются термические (дистилляция) и баромембранные (обратный осмос и нанофильтрация) процессы. При проектировании станций деминерализации с обратноосмотическими установками необходимо принимать во внимание ряд ограничений, связанных с более высокими требованиями к предварительной подготовке воды, поступающей в установку. Применение термических опреснительных установок позволяет получать пресную воду более высокого качества, а к предварительной подготовке воды для такого типа установок предъявляются менее жесткие требования. Однако в процессе работы опреснителей данного типа на поверхностях нагрева образуется накипь, которая негативно влияет на эффективность работы установок. Менее интенсивно накипь образуется в установках с контактными испарителями, поскольку в таком случае процесс испарения происходит в объеме. В связи с этим разработка тепловых схем таких установок и исследование их работы является актуальной задачей.

Материалы и методы. Поставленные задачи решены с использованием методов экспериментальных исследований процессов теплообмена и балансовых расчетов энергетических установок.

Результаты. Разработана тепловая схема термической опреснительной установки с контактным испарителем с компрессией паровоздушной смеси. Составлены тепловой и материальный балансы, на основе которых определены затраты энергии для получения 1 м³ пресной воды. Доказано определяющее влияние температуры опресняемой воды в зоне барботажа на производительность опреснительных установок с контактным испарителем. Получена поправка, позволяющая при расчете цикла работы установки учесть исходную соленость воды и рассола.

Выводы. В результате анализа полученных результатов установлено, что увеличение температуры воды в зоне барботажа позволяет повысить производительность установки, повышение температуры осушки паровоздушной смеси приводит к снижению энергопотребления опреснителя. Введение поправки, учитывающей соленость исходной воды и рассола, позволяет повысить точность расчета увлажнения воздуха до 15 %.

Ключевые слова: термическое опреснение, контактный испаритель, барботажа, соленость воды, рассол, пресная вода, цикл работы установки

Maria Vladimirovna Kozlova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: mariyakozlova1996@gmail.com

Alexander Vasilyevich Bannikov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: avbannikov_pte@mail.ru

Svetlana Andreevna Bannikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Industrial Thermal Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: sabannikova_pte@mail.ru

Study of operation of thermal desalination plant with contact evaporator and compression of vapor-air mixture

Abstract

Background. One of the global issues of our time is the shortage of freshwater resources. Desalination of marine and brackish waters is a promising solution to this problem. The most common desalination technologies are thermal (distillation) and baromembrane (reverse osmosis and nanofiltration) processes. When designing demineralization stations with reverse osmosis units, it is necessary to consider a number of limitations associated with higher requirements for pretreatment of water entering the unit. The use of thermal desalination plants makes it possible to obtain fresh water of higher quality, and less stringent requirements are imposed on the preliminary preparation of water for this type of unit. However, during the operation of desalination plants of this type, scale forms on the heating surfaces, which negatively affects the efficiency of the unit. Scale is formed less intensively in the units with contact vapors, since in this case the evaporation process occurs in volume. Thus, the development of thermal scheme of such unit and the study of their operation is relevant.

Materials and methods. The tasks have been solved using the methods of experimental studies of heat and mass transfer processes, mathematical processing of experimental data, and balance calculations of power plants.

Results. A thermal scheme of a thermal desalination plant with a contact evaporator with compression of a vapor-air mixture has been developed. Thermal and material balance has been compiled, on the basis of which energy costs have been determined to obtain m^3 of fresh water. The authors have proved the determining influence of the temperature of desalinated water in the bubbling zone on the productivity of desalination plants with a contact evaporator. An amendment has been obtained that allows the initial salinity of water and brine to be considered when calculating the operating cycle of the unit.

Conclusions. As a result of the analysis of the results obtained, it is found that an increase in the water temperature in the bubbling zone allows us to increase the productivity of the unit, and an increase of the drying temperature of the vapor-air mixture leads to a decrease of the energy consumption of the desalination plant. The introduction of an amendment considering the salinity of the source water and brine makes it possible to increase the accuracy of calculating air humidification up to 15 %.

Key words: thermal desalination, contact evaporator, bubbling, salinity, brine, fresh water, operation cycle of the unit

DOI: 10.17588/2072-2672.2024.5.021-030

Введение. Альтернативным вариантом решения проблемы дефицита пресных водных ресурсов является опреснение морских и солоноватых вод. Суммарная производительность действующих опреснительных станций составляет более 100 тысяч $\text{m}^3/\text{год}$ [1], на большинстве из них обессоленную воду получают термическим (64 %) и обратноосмотическим методами (33 %).

Основными факторами, определяющими выбор метода опреснения, являются: параметры получаемой обессоленной воды; характеристики исходной воды; принцип действия и стоимость установки; затраты на ее монтаж и обслуживание; производительность установки; метеорологические условия эксплуатации.

Термические опреснительные установки нашли широкое применение в системах промышленного, питьевого и хозяйственного водоснабжения [2, 3]. В данных установках процесс опреснения осуществляется путем

частичного испарения воды и последующей конденсации пара.

Главными преимуществами данного типа установок являются: высокое качество получаемого дистиллята; возможность предельного упаривания рассола с доведением до сухого остатка; возможность использования регенерации теплоты.

В процессе эксплуатации термических опреснителей на нагревательных поверхностях образуется накипь, которая негативно влияет на эффективность работы установок [4]. Стоит отметить, что менее активное накипеобразование характерно для термических опреснительных установок с контактным испарителем [5].

Достоинствами установок с контактными испарителями являются: простота эксплуатации; низкий оборот расходных материалов; возможность очистки исходной воды от солей тяжелых металлов; незначительное накипеобразование; возможность использования тепла низкого потенциала.

При этом основными недостатками существующих установок являются их крупные габариты и относительно низкая интенсивность тепломассообменных процессов, протекающих в их элементах [6, 7].

Совершенствование опреснительной техники в целях повышения ее энергоэффективности, снижения затрат на производство пресной воды соответствует мировым тенденциям по рациональному использованию энергоресурсов, снижению энергопотребления.

Основные тенденции в области совершенствования опреснительных установок заключаются в уменьшении энергетических затрат на производство дистиллята, утилизации тепла дистиллята и рассола, использовании альтернативных источников энергии.

Затраты энергии для получения пресной воды зависят от параметров протекания процесса, конструкции опреснителя, технологической схемы, наличия или отсутствия регенерации отработанной энергии в установке.

Поскольку в ходе опреснения термическим методом необходимо осуществлять отвод тепла от конденсировавшегося потока и подвод тепла более высокого потенциала для осуществления процесса испарения морской воды, то для повышения эффективности таких установок актуальным становится включение в цикл их работы трансформатора тепла.

Ниже приведены результаты исследования, позволившие разработать конструкцию термической опреснительной установки с контактным испарителем с компрессией паровоздушной смеси (ПВС).

Принципиальная схема оригинальной опреснительной установки представлена на рис. 1 [8].

В ходе работы установки предварительно подогретая за счет теплообмена с пресной водой морская вода поступает в нижнюю часть испарительной камеры. Затем она направляется в зону барботажа, где взаимодействует с воздушным потоком. В результате тепломассообменных процессов, протекающих между морской водой и потоком газа, воздух увлажняется. Насыщенный влагой воздух поступает в компрессор, где происходит его сжатие, сопровождающееся повышением температуры. Далее ПВС поступает в осушитель, где за счет теплообмена с морской водой происходит конденсация влаги. Окончательное разделение воздушного потока и конденсата,

представляющего собой пресную воду, осуществляется в сепараторе, после которого осушенный воздух вновь поступает в газораспределительную решетку, а пресная вода отправляется в теплообменник исходной опресняемой воды.

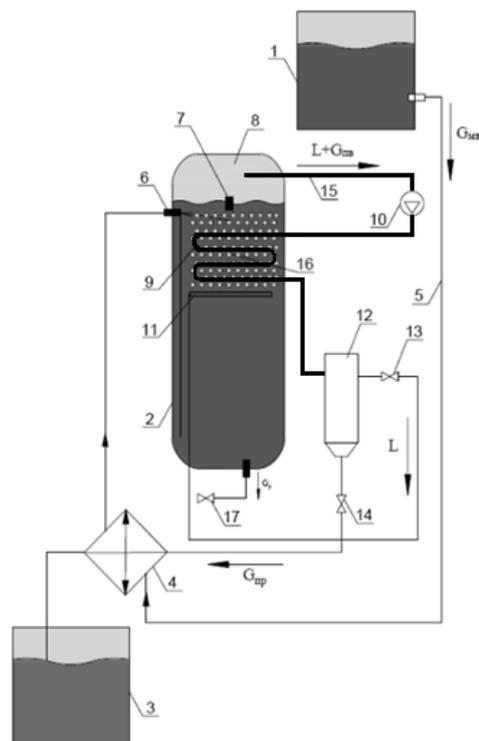


Рис. 1. Принципиальная схема термической опреснительной установки с контактным испарителем: 1 – емкость опресняемой воды; 2 – испарительная камера; 3 – емкость-сборник пресной воды; 4 – теплообменник исходной опресняемой воды; 5 – переливная труба; 6 – клапан; 7 – датчик уровня воды; 8 – зона паровоздушной смеси; 9 – нагревательный элемент; 10 – компрессор; 11 – газораспределительная решетка; 12 – сепаратор; 13, 14 – регулирующие клапаны; 15 – труба паровоздушной смеси; 16 – зона нагрева; 17 – сливное устройство; $G_{мв}$ – поток морской воды; L – поток осушенного воздуха; $G_{пв}$ – поток пресной воды; $G_{р}$ – поток рассола

Данная установка работает в соответствии с циклом, представленным на рис. 2, и включает в себя следующие процессы: 1–2 – процесс сжатия ПВС в компрессоре; 2–3 – процесс осушки ПВС; 3–4 – процесс понижения давления в регулирующем клапане; 4–1 – насыщение ПВС при барботаже.

Цикл построен в $h-d$ -диаграмме В.И. Прохорова [9], на которой нанесены кривые ϕ/p , что позволяет отображать процессы, протекающие с изменением давления.

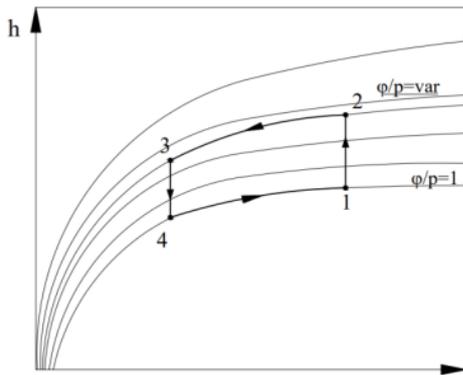


Рис. 2. Цикл работы гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС: 1–2 – процесс сжатия ПВС; 2–3 – осушка ПВС; 3–4 – понижение давления ПВС в регулирующем клапане; 4–1 – насыщение ПВС

Одним из способов повышения энергетической эффективности термических опреснительных установок является регенерация тепловой энергии. В связи с тем что деминерализация воды в термических опреснительных установках с контактным теплообменным аппаратом требует нагрева входящего потока (опресняемой воды) и охлаждения выходящих (пресной воды), целесообразно осуществлять эти процессы совместно. Таким образом можно обеспечить рациональное использование энергии отходящих потоков.

Отличительной особенностью предлагаемого технического решения является наличие трансформатора тепла в цикле работы установки, что позволяет повысить эффективность процесса опреснения. При этом

в качестве рабочего тела используется паровоздушная смесь, состав которой в ходе работы установки меняется, так как концентрация водяных паров в цикле не постоянна.

Методы исследования. Для исследования процессов, протекающих в элементах термического опреснителя, была создана экспериментальная установка, принципиальная схема и внешний вид которой приведены на рис. 3. Для оценки влияния режимных параметров на производительность опреснительной установки были проведены эксперименты.

В рамках экспериментального исследования проведен полнофакторный эксперимент (ПФЭ), параметром оптимизации которого была выбрана производительность установки.

В качестве варьируемых факторов принимались температура воды и воздуха в зоне барботаж. Рассматриваемые факторы отвечают двум основным требованиям, предъявляемым к совокупности факторов: 1) между ними отсутствует корреляция, что означает возможность установления какого-либо фактора на любой уровень вне зависимости от уровней других факторов; 2) они являются совместимыми [10]. При этом каждый фактор изначально рассматривался лишь на двух фиксированных уровнях. Верхний уровень для температуры воды – 100 °С, нижний – 70 °С, а для воздуха верхний уровень – 100 °С, нижний – 20 °С.

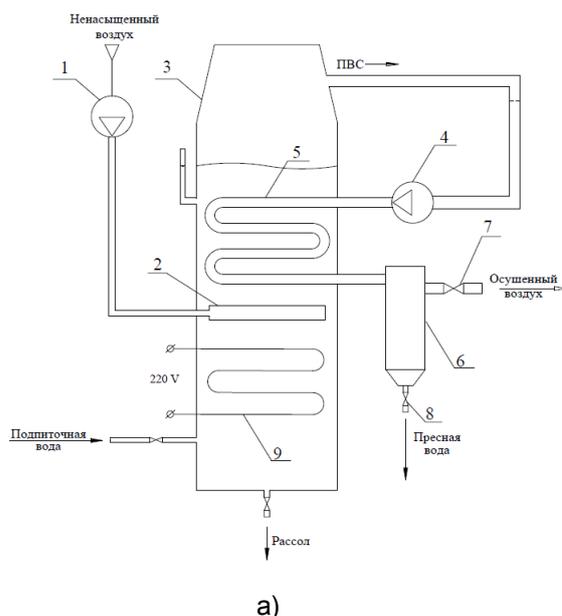


Рис. 3. Принципиальная схема (а) и внешний вид (б) экспериментальной установки: 1 – нагнетательное устройство; 2 – барботажное устройство; 3 – испарительная камера; 4 – компрессор; 5 – нагревательный элемент; 6 – сепаратор; 7, 8 – регулирующие клапаны; 9 – ТЭН

При проведении экспериментального исследования на постоянном уровне поддерживались давление в испарительной колонне, высота барботажного слоя и расход воздуха. При этом общая минерализация в конденсате на выходе из установки составляла не более требуемых значений, т. е. не более 1 г/л.¹

Было проведено несколько серий опытов для каждого эксперимента. Каждый эксперимент повторялся 5 раз.

Однако при проведении эксперимента изначально планировалось получить модель первого порядка, в результате вычислений было установлено, что такая модель неадекватна.

В этой связи сформированный план ПФЭ был достроен до плана второго порядка (композиционного плана) [11] и была сформирована новая функция отклика в виде полного квадратичного полинома без потери информации о ранее сделанных опытах.

В связи с тем что процесс насыщения воздушного потока влагой является одним из процессов, определяющих производительность установки, его исследование вызывает особый интерес, поэтому дальнейшие экспериментальные исследования были направлены на изучение процесса насыщения воздушного потока влагой при его барботаже в слой нагретой опресняемой воды. При этом в качестве варьируемого фактора рассматривалась температура опресняемой воды.

Для исследования влияния температуры опресняемой воды в зоне барботажа на количество влаги, испаряющейся в результате теплообменных процессов, выполнялись следующие измерения: температуры воздуха на входе в барботажное устройство по сухому t_b^c и мокрому термометрам t_b^m ; температуры воды в зоне барботажа $t_{\text{воды}}$; расхода ПВС; температуры ПВС по сухому $t_{\text{ПВС}}^c$ и мокрому термометрам $t_{\text{ПВС}}^m$; количества влаги W , унесенного воздухом. На рис. 4 приведена схема размещения замеров.

В ходе экспериментального исследования соленость исходной воды составляла 35 г/л, что соответствует средней солености вод Мирового океана [12]. Расход ненасы-

щенного воздуха, поступающего в барботажное устройство, поддерживался постоянным и составлял 5,85 кг/ч.

Измерение температур ненасыщенного воздуха и паровоздушной смеси осуществлялось термопреобразователями сопротивления. Расход паровоздушной смеси измерялся косвенно, для чего фиксировался перепад давлений на местном сопротивлении посредством использования трубки Пито и дифференциального манометра. В экспериментальной установке воздух распределяется через газораспределительную решетку с отверстиями диаметром 2 мм.

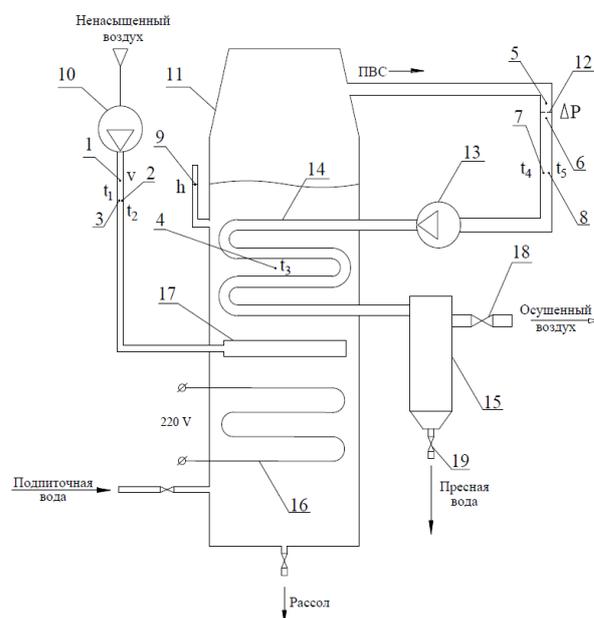


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки с узлами замеров: 1 – узел измерения скорости; 2, 3, 4, 7, 8 – датчики измерения температур; 5, 6 – узел измерения перепада давления; 9 – указатель уровня; 10 – нагнетательное устройство; 11 – испарительная камера; 12 – диафрагма; 13 – компрессор; 14 – нагревательный элемент; 15 – сепаратор; 16 – ТЭН; 17 – барботажное устройство; 18, 19 – регулирующие клапаны

Поддержание уровня воды в испарительной камере осуществлялось автоматически.

Математическое описание работы установки разработано на основе балансовых уравнений, при этом в используемых зависимостях заложена модель идеального газа [13].

¹ ГОСТ 2874-82. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. С изменениями №1 и 2. – М.: Изд-во стандартов, 1989. – 12 с.

В установку поступает поток морской воды, который в результате теплообменных процессов в последующем разделяется на пресную воду и рассол. В ходе массообменных процессов изменяется состав фаз. Это приводит к изменению количества (массы) компонентов в каждой из фаз, а также к изменению массы самих фаз. Взаимосвязи масс компонентов и фаз описываются уравнениями материального баланса. Основными способами выражения составов фаз, актуальными при рассмотрении процессов массообмена, являются концентрации и доли компонента.

Соответственно, уравнение материального баланса установки по морской воде имеет вид

$$G_{\text{МВ}} = G_{\text{ПВ}} + G_{\text{Р}}, \quad (1)$$

где $G_{\text{МВ}}$ – массовый расход поступающей в установку морской воды, кг/с; $G_{\text{ПВ}}$ – массовый расход пресной воды, удаляемой из установки, кг/с; $G_{\text{Р}}$ – массовый расход рассола, кг/с.

Если уравнение материального баланса опреснительной установки записать через соленость опресняемой воды и рассола, получим

$$G_{\text{МВ}} = \frac{S}{S''} G_{\text{МВ}} + \left(1 - \frac{S}{S''}\right) G_{\text{МВ}}, \quad (2)$$

где S – соленость исходной морской воды, ‰; S'' – заданная соленость рассола, ‰.

Количество полученного дистиллята соответствует количеству испаренной в результате барботирования жидкости и определяется по формуле

$$G_{\text{ПВ}} = W = \beta_d F \frac{d_{\text{H}} - d_{\text{B}}}{1000}, \quad (3)$$

где β_d – коэффициент влагоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м²·с(г/кг)); d_{H} – влагосодержание воздуха в пограничном слое жидкости при температуре ее поверхности, г/кг с.в.; d_{B} – влагосодержание воздуха перед барботажным устройством, г/кг с.в.; F – площадь влагообмена, м².

Уравнение материального баланса по соли имеет вид

$$\frac{G_{\text{МВ}} S}{1000} = \frac{G_{\text{ПВ}} S'}{1000} + \frac{G_{\text{Р}} S''}{1000}, \quad (4)$$

где S' – заданная соленость пресной воды, ‰.

В соответствии с принципиальной схемой, приведенной на рис. 1, количество тепловой энергии, отводимое в нагревательном элементе, расходуется на процесс нагрева

воды до требуемой температуры и последующее ее испарение, компенсацию тепловых потерь. Уравнение теплового баланса рассматриваемой установки имеет вид

$$(L + G_{\text{ПВ}})(h''_{\text{K}} - h'_{\text{K}}) + G_{\text{МВ}} c_{\text{рмв}} t'_{\text{МВ}} = G_{\text{МВ}} c_{\text{рмв}} (t'_{\text{МВ}} - t''_{\text{МВ}}) + G_{\text{МВ}} c_{\text{рп}} \frac{S}{S''} t_{\text{P}} + G_{\text{ПВ}} t_{\text{ПВ}} c_{\text{рпв}}, \quad (5)$$

где L – массовый расход сухого воздуха, кг/с; h'_{K} , h''_{K} – энтальпия ПВС до и после компрессора, кДж/кг; $c_{\text{рмв}}$, $c_{\text{рпв}}$, $c_{\text{рп}}$ – массовая изобарная теплоемкость морской, пресной воды и рассола, кДж/(кг·К); $t'_{\text{МВ}}$ – температура морской воды, поддерживаемая в зоне барботажа, °С; $t''_{\text{МВ}}$ – температура морской воды после теплообмена с пресной водой, циркулирующей в змеевике пресной воды, °С; t_{P} – температура пресной воды, °С.

Принимаем во внимание, что расход сухого воздуха, циркулирующего в установке, связан с количеством получаемой пресной воды через влагосодержание:

$$L = \frac{G_{\text{ПВ}}}{d_{\text{H}} - d_{\text{B}}} = \frac{G_{\text{МВ}} \left(1 - \frac{S}{S''}\right)}{d_{\text{H}} - d_{\text{B}}}, \quad (6)$$

где d_{H} , d_{B} – влагосодержание паровоздушной смеси до и после барботажного устройства, кг/кг с.в.

Записав расход пресной воды и рассола через расход исходной морской воды, получим

$$\left(\frac{G_{\text{МВ}} \left(1 - \frac{S}{S''}\right)}{d_{\text{H}} - d_{\text{B}}} + G_{\text{МВ}} \left(1 - \frac{S}{S''}\right) \right) (h''_{\text{K}} - h'_{\text{K}}) = G_{\text{МВ}} c_{\text{рмв}} (t'_{\text{МВ}} - t''_{\text{МВ}}) + G_{\text{МВ}} c_{\text{рп}} \frac{S}{S''} t_{\text{P}} + G_{\text{МВ}} \left(1 - \frac{S}{S''}\right) t_{\text{ПВ}} c_{\text{рпв}}. \quad (7)$$

Тогда для 1 кг морской воды уравнение теплового баланса примет вид

$$\left(1 - \frac{S}{S''}\right) \frac{1 + d_{\text{H}} - d_{\text{B}}}{d_{\text{H}} - d_{\text{B}}} (h''_{\text{K}} - h'_{\text{K}}) = c_{\text{рмв}} (t'_{\text{МВ}} - t''_{\text{МВ}}) + c_{\text{рп}} \frac{S}{S''} t_{\text{P}} + \left(1 - \frac{S}{S''}\right) t_{\text{ПВ}} c_{\text{рпв}}. \quad (8)$$

На основе данных уравнений были рассчитаны затраты энергии на получение 1 м³ пресной воды в зависимости от поддерживаемых параметров.

При расчете цикла работы данной опреснительной установки необходимо учитывать то обстоятельство, что, в соответствии с законом Рауля, давление паров воды над морской водой пропорционально мольной доле пресной воды.

Данное обстоятельство позволяет учесть тот факт, что воздушный поток взаимодействует не с чистой водой, а с водным раствором. Тогда в ходе расчета цикла работы установки при вычислении влагосодержания, которого достигает воздух при контакте с морской водой, следует учитывать начальную соленость морской воды, поступающей в установку, и рассола, образующегося в ходе насыщения воздуха влагой.

При расчете молярной доли воды в растворе необходимо учитывать, что хлорид натрия является электролитом и диссоциирует на ионы Na^+ и Cl^- . В этом случае молярная доля воды рассчитывается следующим образом:

$$x = \frac{m_{H_2O} / \mu_{H_2O}}{m_{H_2O} / \mu_{H_2O} + (m_{NaCl} / \mu_{NaCl})_{Cl} + (m_{NaCl} / \mu_{NaCl})_{Na} + \sum (m_i / \mu_i)_i} = \frac{(1000 - S) / \mu_{H_2O}}{(1000 - S) / \mu_{H_2O} + (S / \mu_{NaCl})_{Cl} + (S / \mu_{NaCl})_{Na} + \sum (m_i / \mu_i)_i}, \quad (9)$$

где m_{H_2O} , m_{NaCl} , m_i – масса воды, хлорида натрия и i примесей в растворе, г; μ_{H_2O} , μ_{NaCl} , μ_i – молярная масса воды, натрия хлорида и i примесей в растворе, г/моль.

При расчете влагосодержания ПВС после барботаж необходимо ввести поправку, представляющую молярную долю воды в растворе (9).

Результаты исследования. В результате обработки экспериментальных данных, полученных на основе ортогонального центрального композиционного плана, было получено уравнение регрессии:

$$y = 33,75 + 38 \cdot x_1 - 2,10 \cdot x_2 - 1,56 \cdot x_1 x_2 + 17,22 \cdot x_1^2, \quad (10)$$

где x_1 – температура нагретой воды в зоне барботаж, °С; x_2 – температура барботируемого воздуха, °С

Согласно (10), наиболее значительное влияние на производительность оказывает фактор x_1 – температура опресняемой воды в зоне барботаж, так как он имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент. Увеличение температуры воздуха приводит к снижению производительности, а также оказывает меньшее влияние на отклик.

После преобразования уравнения регрессии был построен график зависимости

производительности установки от температуры воды и воздуха в зоне барботаж (рис. 5).

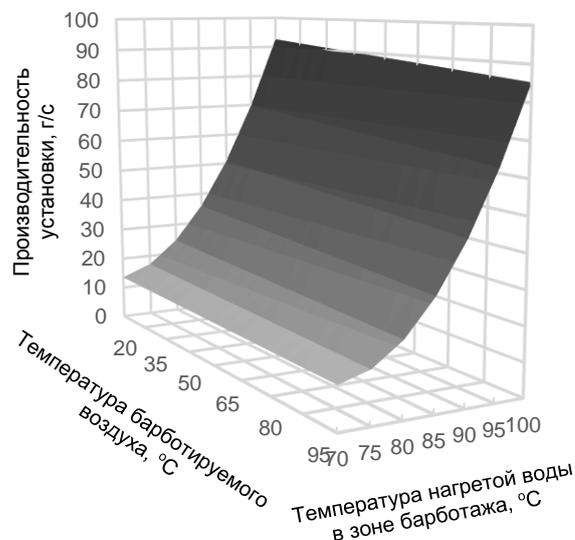


Рис 5. Зависимость производительности установки от температуры воды и воздуха в зоне барботаж

Относительная погрешность измерения температуры изменялась в диапазоне от 1,5 до 5 %, а расхода ПВС – от 5 до 8 %.

Полученный в результате эксперимента конденсат, исследованный на микроэлементы, согласно заключениям санитарно-гигиенической и микробиологической экспертизы СЭС, соответствует всем нормам, предъявляемым к питьевой воде. Результаты санитарно-гигиенического исследования приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты санитарно-гигиенического исследования полученной пресной воды

Показатель	Результаты измерений	Норматив	Единицы измерений
Цветность	10,0±2,0	20	град.
Водородный показатель	6,15±0,20	6–9	ед. рН
Окисляемость перманганатная	3,08±0,31	5,0	мг/дм ³
Общая минерализация	670±60	1000	мг/дм ³
Жесткость общая	2,1±0,3	7,0	мг-экв/дм ³
Сульфаты	45,1±5,0	500	мг/дм ³
Хлориды	317,6±28,6	350	мг/дм ³
Железо общее	0,21±0,05	0,3	мг/дм ³
Марганец	0,020±0,005	0,1	мг/дм ³
Медь	0,03±0,01	1,0	мг/дм ³

В ходе исследования процесса насыщения воздушной смеси были получены результаты, приведенные в табл. 2.

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований процесса насыщения воздушного потока влагой

Параметр	Температура воды в зоне барботаж, °С			
	70	80	90	100
$t_{в}^c$, °С	28,1	28,1	28,1	28,0
$t_{в}^M$, °С	20,9	20,9	20,9	20,9
$t_{пвс}^c$	66,4	77,9	87,9	97,2
$t_{пвс}^M$	65,8	77,7	87,6	96,9
Расход ПВС, кг/ч	34,1	39,4	53,2	168,9
Расход влаги, кг/ч	7,7	12,9	26,7	142,4

В результате экспериментального исследования установлено, что при приближении температуры воды в зоне барботаж к температуре насыщения при данной солёности количество испаряющейся влаги существенно возрастает.

Использование коэффициента (9) при определении влагосодержания паровоздушной смеси позволяет повысить точность инженерных расчетов, связанных с оценкой эффективности работы опреснительных установок.

В соответствии с графиком зависимости концентрации пара в ПВС от концентрации солей в исходной опресняемой воде и рассоле (рис. 6), расхождение значений предельной равновесной концентрации водяных паров в ПВС над пресной и морской водой существенно увеличивается с повышением температуры. Соответственно, в ходе расчетов насыщения воздушного потока следует учитывать солёность морской воды.

Если не учитывать поправку (9), то при условии предельного упаривания морской воды погрешность при выполнении расчетов циклов опреснительных установок с контактным испарителем может достигать 15 %.

Далее с учетом всех вышеописанных обстоятельств был выполнен расчет тепловой схемы опреснительной установки, в результате которого были определены затраты энергии для получения 1 м³ пресной воды при температуре воды в зоне бар-

ботаж, равной 100 °С, и солёности исходной воды 10–35 %. Результаты расчетного исследования приведены на рис. 7.



Рис. 6. Зависимости концентрации пара в ПВС от концентрации солей в исходной опресняемой воде и рассоле: 1 – концентрация пара в ПВС при температуре морской воды в зоне барботаж 100 °С; 2 – 90 °С; 3 – 80 °С; 4 – 70 °С; 5 – концентрация пара в ПВС при температуре дистиллированной воды 100 °С; 6 – 90 °С; 7 – 80 °С; 8 – 70 °С

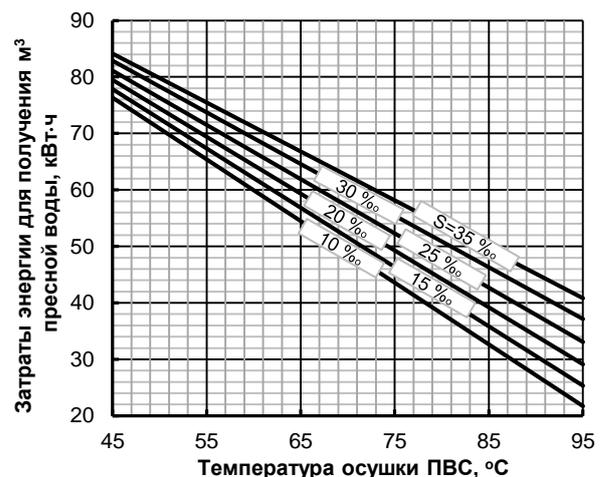


Рис. 7. Зависимости энергопотребления термической опреснительной установки с контактным испарителем от температуры осушки ПВС и солёности исходной воды

Анализ данных, приведенных на рис. 7, показывает, что энергопотребление установки существенно зависит от температуры осушки ПВС, что, в первую очередь, связано с использованием тепла получаемого дистиллята для нагрева морской воды, поступающей в установку.

Стоит отметить, что температура осушки также влияет на интенсивность процессов теплообмена, протекающих в нагревательном элементе, поскольку при понижении температуры доля воздуха, содержащегося в ПВС, возрастает (рис. 8).

В соответствии с вышеизложенным, предпочтительнее является работа гигроскопических опреснительных установок при более высоких температурных уровнях увлажнения и осушки.

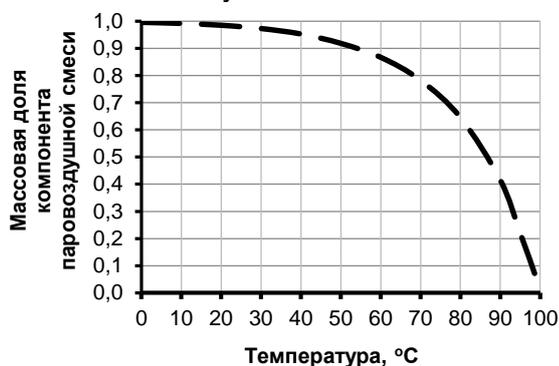


Рис 8. Зависимости концентрации воздуха в насыщенной ПВС в зависимости от температуры

Выводы. В результате экспериментальных исследований установлено:

1. Зависимость производительности установки от температуры воды носит нелинейный характер, ее увеличение приводит к существенному возрастанию расхода получаемого дистиллята. Влияние температуры воздуха в зоне барботажа несущественно влияет на производительность установки.

2. Получаемый в процессе работы термической опреснительной установки с контактным испарителем и компрессией паровоздушной смеси дистиллят соответствует требованиям, предъявляемым к питьевой воде.

3. Введение поправки, учитывающей соленость исходной воды и рассола, позволяет повысить точность расчета процесса увлажнения воздуха при контакте с морской водой вплоть до 15 %.

4. Увеличение температуры осушки приводит к снижению энергопотребления установки. Затраты энергии в опреснительных установках с контактным испарителем при температуре воды в зоне барботажа 100 °С находятся в диапазоне от 22 до 88,5 кВт·ч/м³.

Список литературы

1. **Sivamani S.** Flow energy analysis of reverse osmosis unit in seawater desalination plant with energy recovery device // *International Journal of Advanced Research*. – 2022. – Vol. 10, No. 12. – P. 381–388.

2. **Соколов П.С., Козлова М.В., Банников А.В.** О применении и реализации гигроскопического метода опреснения для деминерализации морских и солоноватых вод // *Энергосбережение: теория и практика: труды X Междунар. школы-семинара молодых ученых и специалистов*, Москва, 19–23 октября 2020 г. – Курск: Закрытое акционерное общество «Университетская книга», 2020. – С. 93–98.

3. **Мизин А.И., Сокирко Т.И.** Обзор методов опреснения морской и солесодержащей воды // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт*. – 2023. – № 12. – С. 58–68.

4. **Исследование** влияния процесса накопления накипи в теплообменниках предварительного подогрева дистилляционной опреснительной установки на эффективность их работы / Е.В. Благин, А.А. Шиманов, М.Ю. Анисимов и др. // *Вестник Международной академии холода*. – 2019. – № 2. – С. 37–42.

5. **Sokolov P.S., Kozlova M.V., Bannikov A.V.** Hygroscopic method application and realization for demineralization of sea and salted water // *Journal of Physics: Conference Series*: 3, Moscow, 19–23 октября 2020 г. – Moscow, 2020. – P. 1–7.

6. **Гриценко А.Н., Стрекалов С.Д.** Энергоэффективные установки опреснения минерализованной воды // *Международ. науч. журнал «Альтернативная энергетика и экология»*. – 2015. – № 7(171). – С. 108–115.

7. **Слесаренко В.Н.** Дистилляционные опреснительные установки. – М.: Энергия, 1980. – 248 с.

8. **Пат.** на полезную модель № 194759 U1 Российская Федерация МПК C02F 1/04. Паровоздушная опреснительная установка: № 2019128616: заявл. 11.09.2019: опубл. 23.12.2019 / А.В. Банников, П.С. Соколов, М.В. Козлова.

9. **Прохоров В.И.** I-d-диаграммы влажного воздуха для переменных давлений. – М.: Книга, 1973. – 30 с.

10. **Липин В.А.** Методы оптимизации: учеб. пособие. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2022. – 47 с.

11. **Сорокин М.Н., Ануфриева К.С.** Расширение множества центральных композиционных планов // *Известия МГТУ МАМИ*. – 2015. – Т. 2, № 1(23). – С. 40–48.

12. **Данилов-Данильян В.И.** Водные ресурсы: мир и Россия // *Доклад о человеческом развитии в Российской Федерации за 2017 год: Экологические приоритеты для России*. – М.: Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации, 2017. – С. 147–172.

13. **Козлова М.В., Соколов П.С., Банников А.В.** Исследование влияния реальных физических свойств влажного воздуха на точность расчета тепломассообменных процессов // *Вестник ИГЭУ*. – 2020. – Вып. 4. – С. 5–13.

References

1. Sivamani, S. Flow energy analysis of reverse osmosis unit in seawater desalination plant with energy recovery device. *International Journal of Advanced Research*, 2022, vol. 10, no. 12, pp. 381–388.
2. Sokolov, P.S., Kozlova, M.V., Bannikov, A.V. O primeneni i realizatsii gigroskopicheskogo metoda opresneniya dlya demineralizatsii morskikh i solonovatykh vod [On the application and implementation of the hygroscopic desalination method for demineralization of marine and brackish waters]. *Trudy X Mezhdunarodnoy shkoly-seminara molodykh uchenykh i spetsialistov «Energosbezrezhenie teoriya i praktika», Moskva, 19–23 oktyabrya 2020 g.* [Proceedings of the Tenth International School-seminar of Young Scientists and Specialists “Energy saving theory and practice”, Moscow, October 19–23, 2020]. Kursk: Zakrytoe aktsionerное obshchestvo «Universitetskaya kniga», 2020, pp. 93–98.
3. Mizin, A.I., Sokirko, T.I. Obzor metodov opresneniya morskoy i solesoderzhashchey vody [Review of methods of desalination of marine and saline water]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2023, no. 12, pp. 58–68.
4. Blagin, E.V., Shimanov, A.A., Anisimov, M.Yu., Uglanov, D.A., Pan'shin, R.A. Issledovanie vliyaniya protsessa nakipeobrazovaniya v teploobmennikakh predvaritel'nogo podogreva distillyatsionnoy opresnitel'noy ustanovki na effektivnost' ikh raboty [Investigation of the effect of the scale formation process in heat exchangers of preheating distillation desalination plant on the efficiency of their operation]. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii kholoda*, 2019, no. 2, pp. 37–42.
5. Sokolov, P.S., Kozlova, M.V., Bannikov, A.V. Hygroscopic method application and realization for demineralization of sea and salted water. *Journal of Physics: Conference Series: 3, Moscow, October 19–23, 2020*. Moscow, 2020, pp. 1–7.
6. Gritsenko, A.N., Strekalov, S.D. Energoeffektivnye ustanovki opresneniya mineralizovannoy vody [Energy-efficient desalination plants of mineralized water]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Alternativnaya energetika i ekologiya»*, 2015, no. 7(171), pp. 108–115.
7. Slesarenko, V.N. *Distillyatsionnye opresnitel'nye ustanovki* [Distillation desalination plants]. Moscow: Energiya, 1980. 248 p.
8. Bannikov, A.V., Sokolov, P.S., Kozlova, M.V. *Parovozdushnaya opresnitel'naya ustanovka* [Steam-air desalination plant]. Patent RF, no. 2019128616, 2019.
9. Prokhorov, V.I. *I-d-diagrammy vlazhnogo vozdukha dlya peremennykh davleniy* [I-d diagrams of humid air for variable pressures]. Moscow: Kniga, 1973. 30 p.
10. Lipin, V.A. *Metody optimizatsii* [Optimization methods]. Saint-Petersburg: VShTE SPbGUPTD, 2022. 47 p.
11. Sorokin, M.N., Anufrieva, K.S. Rasshirenije mnozhestva tsentral'nykh kompozitsionnykh planov [Expansion of the set of central compositional plans]. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2015, vol. 2, no. 1(23), pp. 40–48.
12. Danilov-Danil'yan, V.I. Vodnye resursy: mir i Rossiya [Water resources: the world and Russia]. *Doklad o chelovecheskom razvitii v Rossiyskoy Federatsii za 2017 god: Ekologicheskie prioritety dlya Rossii* [Human Development Report in the Russian Federation for 2017: Environmental Priorities for Russia]. Moscow: Analiticheskiy tsentr pri Pravitel'stve Rossiyskoy Federatsii, 2017, pp. 147–172.
13. Kozlova, M.V., Sokolov, P.S., Bannikov, A.V. Issledovanie vliyaniya real'nykh fizicheskikh svoystv vlazhnogo vozdukha na tochnost' rascheta teplomassoobmennyykh protsessov [Investigation of the influence of real physical properties of moist air on the accuracy of calculation of heat and mass transfer processes]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 4, pp. 5–13.