

На правах рукописи



КОЗЛОВА Мария Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ
УСТАНОВОК ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА**

Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Банников Александр Васильевич**

Официальные оппоненты:

Гаряев Андрей Борисович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»», заведующий кафедрой «Тепломассообменные процессы и установки»;

Дмитриев Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново.

Защита состоится «23» сентября 2022 г. в 11:30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен:

http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Kozlova_M.V._0.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01



Ледуховский
Григорий Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одной из актуальных проблем современности является растущий дефицит пресных водных ресурсов, обусловленный их неравномерным распределением, нерациональным использованием и загрязнением природных источников воды. Вариантом преодоления дефицита пресной воды является опреснение морских и солоноватых вод.

Анализ эффективности агрегатно-технологических схем различных методов опреснения на исходной воде одинакового качества, показывает, что капитальные и эксплуатационные затраты для них различны. Величина затрат энергии на опреснение определяется параметрами процесса, конструкцией опреснительной установки, компоновкой технологической схемы, наличием или отсутствием регенерации отработанной энергии. Наряду с этим в статьи эксплуатационных затрат могут входить затраты на расходные материалы, например, на замену мембран в обратноосмотических установках.

Для целей промышленного, питьевого и хозяйственного водоснабжения в основном используются обратноосмотический и дистилляционный методы опреснения. В силу своих особенностей каждый из них требует существенных энергетических и материальных затрат. Одним из направлений дальнейшего развития опреснительных систем является совершенствование существующих методов опреснения, а также поиск и исследование альтернативных им.

Перспективным методом опреснения является гигроскопический. К преимуществам опреснительных установок, функционирующих на основе данного метода, относятся: простота эксплуатации, низкий оборот расходных материалов, возможность очистки исходной воды от солей тяжелых металлов, незначительное накипеобразование, не препятствующее испарению в контактном аппарате, возможность использования тепла низкого потенциала, предельное упаривания рассола с доведением до сухого остатка. При этом основным недостатком таких установок являются их крупные габариты и относительно низкая интенсивность тепломассообменных процессов, протекающих в их элементах.

В связи с вышеизложенным актуальным является решение комплекса задач по повышению эффективности опреснения в гигроскопических установках, включая разработку их принципиальных схем и математическое описание тепломассообменных процессов, протекающих при насыщении воздушного потока влагой. Тема диссертации соответствует приведенному в указе Президента №899 приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», критической технологии «Технологии создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и использования энергии», а также положениям ФЗ №261 «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности».

Степень разработанности темы диссертации. Значимые результаты в области

опреснительной техники обобщены в работах Слесаренко В.Н., Апельцина И.Э., Клячко А.В., Лукина Г.А., Коваленко В.Ф., Клименюка И.В., Фейзиева Г. К., Кульского Л.А., Дытнерского Ю.И., Смагина В.Н., Якубовского Ю.В., Давыдова В.Г., Неплюева И.Ф. Исследованию работы опреснительных установок посвящен ряд научных работ и диссертаций Рахматулина И.Р., Романова А.В., Малофеева А.Г., Княжева В.В., Мелиновой Л.В., Алвана Н.Т., Мелинова Л.В., Ковалева О.П., Сейтжановой М.А., Кахарова С., Малафеева И.И. Однако большинство работ посвящены дистилляционным и обратноосмотическим опреснительным установкам. Исследования гигроскопических опреснительных установок с контактными испарителями ограничены. Здесь следует отметить работы Стаценко В.Н., Бернавской М.В., Арефьева К.М. Тем не менее, остаются малоизученными вопросы повышения эффективности работы опреснительных установок гигроскопического типа, в том числе путем включения трансформаторов тепла в цикл их работы.

Целью диссертации является повышение эффективности опреснительных установок гигроскопического типа путем разработки и научного обоснования режимных и схемных мероприятий.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**:

1) разработка и исследование технических решений, обеспечивающих повышение эффективности процесса опреснения в гигроскопических установках за счет включения в цикл их работы трансформаторов тепла ;

2) разработка и создание экспериментальной установки для исследования процесса опреснения гигроскопическим методом;

3) проведение экспериментальных исследований процесса опреснения в гигроскопической опреснительной установке с целью определения влияния температур воды и воздуха на количество испаряющейся влаги и получения опытных данных для верификации математической модели насыщения воздушного потока;

4) разработка математического описания процесса насыщения воздушного потока влагой при его барботаже в слой нагретой опресняемой воды;

5) оценка экономической эффективности опреснительной станции, функционирующей на базе опреснительных установок гигроскопического типа.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности *в части формулы специальности*: «совершенствование промышленных теплоэнергетических систем..... разработка и создание нового теплотехнического оборудования»; «поиск структур и принципов действия теплотехнического оборудования, которые обеспечивают сбережение энергетических ресурсов, уменьшение энергетических затрат на единицу продукции»; *в части области исследования* – пункту 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и

установках, использующих тепло»; – пункту 4 «Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками».

Научная новизна работы обусловлена следующим:

1. Разработан способ повышения эффективности работы опреснительных установок гигроскопического типа на основе включения в цикл их работы трансформаторов тепла.

2. На основе экспериментальных исследований и математической модели процессов теплообмена, протекающих при насыщении воздушного потока в результате его контакта с нагретой опресняемой водой, установлены количественные характеристики влияния режимных параметров на расход влаги, испаряющейся в зоне барботажа в опреснительных установках гигроскопического типа.

Теоретическая значимость работы обусловлена следующим. *Доказана* возможность использования законов идеальных газов применительно к водяному пару, входящему в состав паровоздушной смеси, при расчете циклов работы атмосферных опреснительных установок гигроскопического типа. *Изложены:* результаты экспериментальных исследований влияния начальной температуры воды и воздуха на производительность опреснительной установки гигроскопического типа, а также результаты экспериментальных исследований процесса насыщения воздушного потока влагой при его барботаже в слой нагретой опресняемой воды для верификации соответствующей математической модели; основные положения разработанной математической модели процессов теплообмена, протекающих при взаимодействии воздушного потока и нагретой опресняемой воды. *Раскрыты* способы повышения эффективности работы опреснительных установок гигроскопического типа. *Изучено* влияние солености исходной воды и рассола, с которыми контактирует воздушный поток, на количество получаемой пресной воды.

Практическая значимость результатов заключается в том, что в диссертации разработаны новые технические решения, обеспечивающие повышение эффективности процесса опреснения гигроскопическим методом, определены условия их эффективного использования.

Методология и методы исследований. Поставленные задачи решались с использованием методов математического моделирования теплообменных процессов в специализированном программном комплексе; экспериментального исследования процессов теплообмена; математической обработки экспериментальных данных; балансовых расчетов энергетических установок; экономических методов оценки эффективности.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждаются использованием апробированных методов и программных средств моделирования теплоэнергетических

процессов; совпадением в пределах погрешности результатов расчета с экспериментальными данными.

Положения, выносимые на защиту:

- 1) технические решения по повышению эффективности опреснительных установок гигроскопического типа за счет включения в цикл их работы трансформаторов тепла;
- 2) результаты математического моделирования, в том числе в программном пакете ANSYS, процесса насыщения воздушного потока влагой при его взаимодействии с нагретой опресняемой водой при изменении режимных параметров;
- 3) разработанная экспериментальная установка, предназначенная для исследования процесса опреснения гигроскопическим методом;
- 4) результаты экспериментальных исследований процесса насыщения воздушного потока в зоне его контакта с нагретой опресняемой водой.

Реализация результатов работы подтверждена двумя актами внедрения и проведена по следующим направлениям:

- 1) техническое решение по повышению эффективности опреснителей гигроскопического типа за счет включения трансформаторов тепла в цикл работы установки получения пресной воды принято ООО «АКВА ЛАЙФ» (г. Иваново) в качестве типовой схемы; запланировано проведение испытаний установки с целью сбора данных, необходимых для разработки технико-экономического обоснования;
- 2) положения диссертационной работы, имеющие теоретическую и практическую значимость, а также математическая модель процесса взаимодействия воздушного потока и нагретой опресняемой воды внедрены в учебный процесс на кафедре «Промышленная теплоэнергетика» ИГЭУ им. В.И. Ленина при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника».

Личное участие автора в получении результатов работы заключается в определении цели и задач исследования; разработке технических решений по повышению энергетической эффективности процесса опреснения гигроскопическим методом за счет включения в цикл работы установок трансформаторов тепла; разработке и реализации в программном комплексе ANSYS математической модели процессов теплообмена, протекающих при насыщении воздушного потока влагой в результате его взаимодействия с нагретой опресняемой водой; в проведении экспериментального исследования процесса насыщения воздуха влагой при его барботаже в слой нагретой опресняемой воды и обработке полученных экспериментальных данных; в определении условий применения законов состояния идеальных газов к паровоздушной смеси в гигроскопических установках; в разработке и создании экспериментальной установки; в подготовке публикаций по теме диссертации.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы и обсуждались на девяти конференциях: XIV и XV Международной научно-технической

конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия» (ИГЭУ, Иваново, 2019, 2020); XX Международной научно-технической конференции «Бенардосовские чтения» (ИГЭУ, Иваново, 2019, 2021); Международной научно-технической конференции «Smart Energy Systems 2019» (КГЭУ, г. Казань, 2019); XIV Международной молодежной научной конференции «Гинчуринские чтения» (КГЭУ, г. Казань, 2019); XXV Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, Москва, 2020), Десятой международной школе семинаре молодых ученых и специалистов «Энергосбережение - теория и практика» (МЭИ Москва, 2020), I Всероссийской научно-технической конференции «Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетике» (УлГТУ, Ульяновск, 2021).

Публикации. Получено 2 патента на полезные модели, 1 свидетельство на программу ЭВМ. Материалы диссертации опубликованы в 18 работах, в том числе в 1 статье в рецензируемом журнале из списка ВАК, 2 статьях, индексируемых в международной базе Scopus, 12 тезисах и полных текстах докладов конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения по работе, списка использованных источников из 128 наименований. Текст диссертации изложен на 146 стр. машинописного текста, содержит 33 рисунка, 13 таблиц и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе проведен анализ опубликованных данных по тематике исследования. Приведена классификация и краткая характеристика существующих методов опреснения. Проанализированы различные схемные решения опреснительных установок гигроскопического типа с контактным испарителем. Показано, что гигроскопический метод опреснения в силу своих преимуществ является конкурентноспособным по отношению к дистилляционному и обратноосмотическому методам опреснения, однако является нерешенным вопросом повышения эффективности опреснительных установок, основанных на данном методе. Проведен аналитический обзор особенностей свойств рабочих тел гигроскопических опреснителей, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава посвящена исследованию направлений повышения энергетической эффективности опреснительных систем, функционирующих на базе гигроскопических установок.

Основной вектор в совершенствовании тепловых схем гигроскопических опреснительных установок в настоящей работе направлен на сокращение расходов энергии на опреснение воды. Решение этой задачи возможно за счет улучшения как технологических, так и конструктивных характеристик всех элементов, обеспечивающих работу установки. К их числу относятся: обеспечение развитой межфазной поверхности; ис-

пользование возобновляемых источников энергии и тепловых вторичных энергоресурсов в качестве источников энергоснабжения; комбинирование тепловых схем; включение трансформаторов тепла в цикл работы опреснительных установок.

В связи с тем, что в процессе опреснения гигроскопическим методом возникает необходимость отвода тепловой энергии от насыщенной паровоздушной смеси и потребность в тепловой энергии более высокого потенциала для обеспечения процесса насыщения воздушного потока, то актуальным становится включение в цикл работы установки трансформатора тепла. Одно из технических решений включения трансформатора тепла в схему работы установки приведено на рисунке 1.

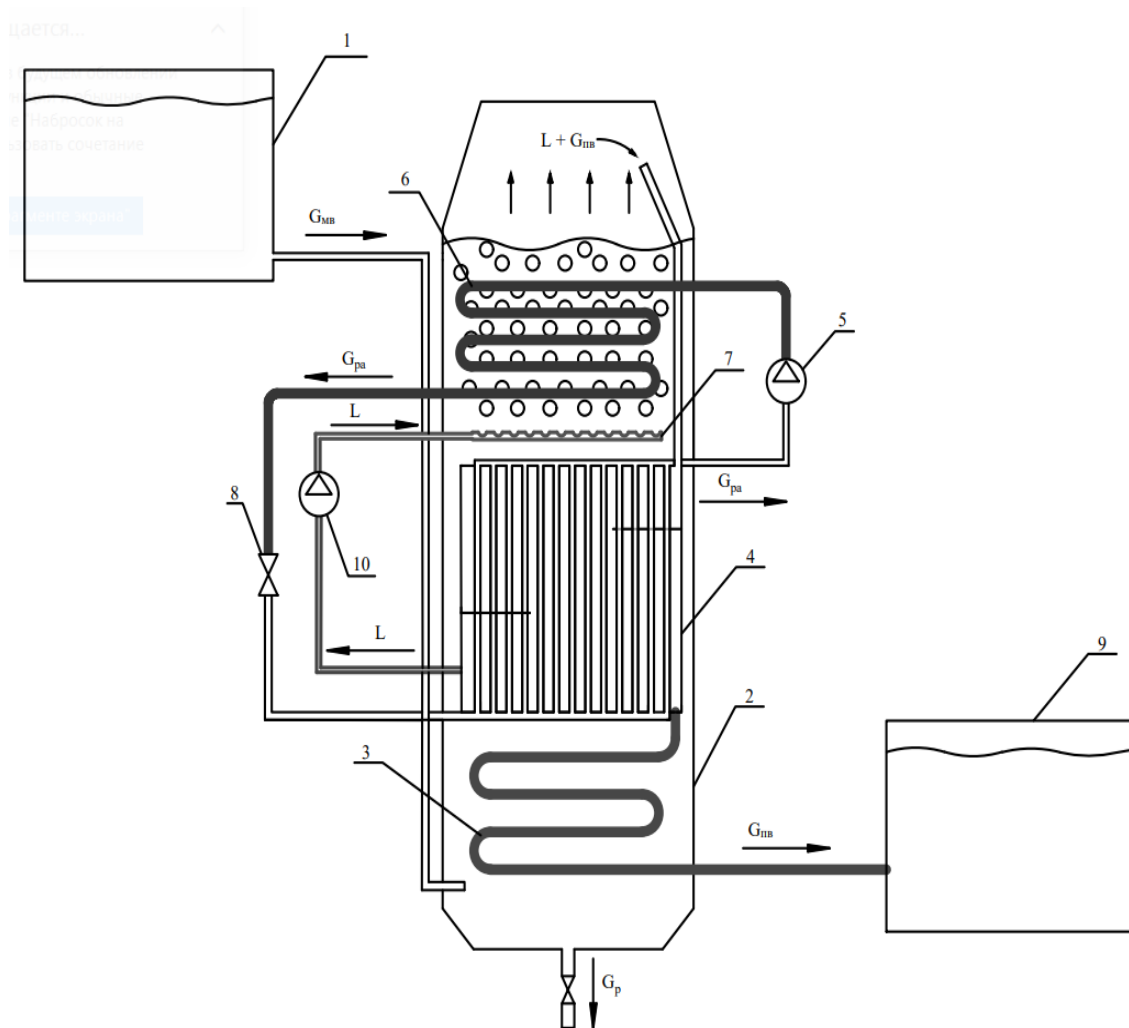


Рисунок 1. Принципиальная схема гигроскопической опреснительной установки на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем: 1 – емкость исходной воды; 2 – реактор опреснительной установки; 3 – змеевик; 4 – испаритель; 5 – компрессор; 6 – конденсатор; 7 – газораспределительная решетка; 8 – дроссельное устройство; 9 – емкость пресной воды; 10 – нагнетательное устройство; $G_{мв}$ – поток пресной воды; L – поток воздуха; $G_{пв}$ – поток пресной воды; G_p – поток рассола; $G_{ра}$ – поток рабочего агента

В соответствии с данной схемой соленая вода из емкости исходной воды 1 подается в нижнюю часть реактора опреснительной установки 2, и далее, нагреваясь в результате теплообмена с пресной водой, поступающей в змеевик 3, с поверхностью испарителя

трансформатора тепла 4, рабочим агентом, поступающим после сжатия в компрессоре 5 в конденсатор трансформатора тепла 6, отправляется в зону барботажа, где взаимодействует с воздухом, поступающим из газораспределительной решетки 7. В результате тепломассообмена между нагретой соленой водой и воздушным потоком воздух насыщается. Полученная паровоздушная смесь (ПВС) поступает в испаритель трансформатора тепла 4, в котором отдавая тепловую энергию рабочему агенту, поступающему после дроссельного устройства 8, разделяется на обессоленный конденсат и осушенный воздух. Далее конденсат охлаждается в змеевике 3, а затем отводится в емкость пресной воды 9, осушенный воздух нагнетательным устройством 10 вновь подается в газораспределительную решетку 7. Вода с повышенным содержанием соли под действием гравитации поступает в нижнюю часть реактора 2 и выводится из него в виде рассола.

В качестве энергоносителя трансформаторов тепла в данном случае должны использоваться вещества с относительно высокими рабочими температурами, минимальными удельными затратами энергии на сжатие при исследуемых параметрах работы установки. Данными требованиям соответствуют рабочие агенты: R717, R22, R11, R12, R21 и вода, но наиболее безопасным является использование воды.

В связи с тем, что с увеличением высоты теплоподъема (разницы между температурами конденсации и кипения рабочего агента в цикле работы пароконденсационного трансформатора тепла) коэффициент трансформации снижается, выбор температурных уровней работы испарителя и конденсатора должен осуществляться с учетом данного обстоятельства. На рисунке 2 представлены зависимости коэффициентов трансформации и потребляемой энергии в зависимости от температуры испарения и конденсации для производства 1 м^3 пресной воды с начальной соленостью 35‰, соответствующей средней солености вод мирового океана.

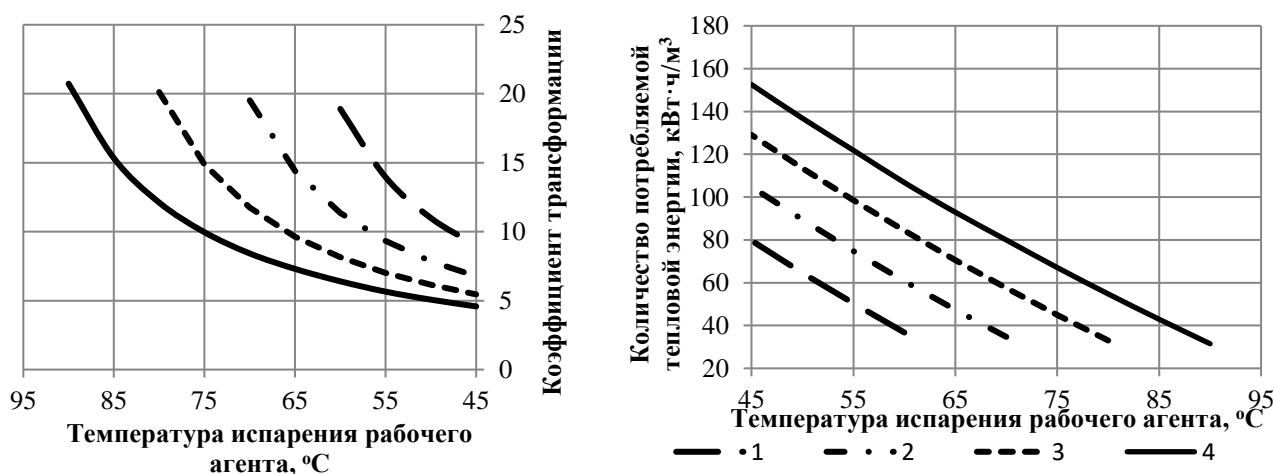


Рисунок 2. Зависимость коэффициента трансформации и потребляемой мощности для производства м^3 пресной воды от параметров работы испарителя и конденсатора трансформатора тепла:

1 – температура конденсации рабочего агента 105 °C; 2 – 95 °C; 3 – 85 °C; 4 – 75 °C;

Особенностью расчета процессов взаимодействия воздушного потока и опресняемой

воды является то, что морская вода представляет собой раствор солей, газов, электролитов, неэлектролитов, различных органических соединений, соответственно, при расчете процесса насыщения воздушного потока влагой должно учитываться это обстоятельство. По причине того, что в составе морской воды преобладает содержание натрия хлорида, морская вода рассматривается в работе как раствор данной соли.

В соответствии с законом Рауля, давление паров воды над морской водой пропорционально ее мольной доле. При этом при расчете молярной доли воды в растворе необходимо учитывать, что хлорид натрия, содержащийся в морской воде, является электролитом и диссоциирует на ионы Na^+ и Cl^- . В связи со всем вышеизложенным при расчете циклов работы опреснительных установок гигроскопического типа в формулу определения предельного влагосодержания должна быть введена поправка, учитывающая соленость исходной опресняемой воды и рассола:

$$x = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}/\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}}/\mu_{\text{H}_2\text{O}} + (m_{\text{NaCl}}/\mu_{\text{NaCl}})_{\text{Cl}} + (m_{\text{NaCl}}/\mu_{\text{NaCl}})_{\text{Na}} + \sum (m_i/\mu_i)_i} = \frac{(1000 - S)/\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{(1000 - S)/\mu_{\text{H}_2\text{O}} + (S/\mu_{\text{NaCl}})_{\text{Cl}} + (S/\mu_{\text{NaCl}})_{\text{Na}} + \sum (m_i/\mu_i)_i}, \quad (1)$$

где $m_{\text{H}_2\text{O}}$, m_{NaCl} , m_i – масса воды, хлорида натрия и i примесей в растворе, г; $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$, μ_{NaCl} , μ_i – молярная масса воды, натрия хлорида и i примесей в растворе, г/моль; S – соленость опресняемой воды, ‰.

Исходя из представленных данных, следует, что при одинаковой высоте теплоподъема количество энергии, потребляемой компрессором для производства 1 м³ пресной воды, изменяется незначительно. Отличительными являются затраты на перемещение паровоздушной смеси, так как для получения 1 м³ пресной воды при различных температурах насыщения и осушки расход перемещаемого воздушного потока для данных условий варьируется от 0,1 до 4 кг/с.

При более низких температурах конденсации и испарения доля воздуха, входящего в состав насыщенной паровоздушной смеси, поступающей для осушки, существенно увеличивается с уменьшением температуры, что в последствии приводит к снижению коэффициента теплоотдачи со стороны ПВС.

Другим вариантом включения трансформатора тепла в цикл работы установки является использование ПВС в качестве рабочего агента (рисунок 3).

Представленная установка работает следующим образом. Испарительная камера 2 заполняется опресняемой водой поступающей по переливной трубе 5 через теплообменник 4 из емкости опресняемой воды 1. Уровень жидкости определяется датчиком уровня воды 7 и регулируется посредством клапана 6. Паровоздушная смесь из зоны

паровоздушной смеси 11 по трубе для паровоздушной смеси 12 поступает в солнечный коллектор 13, где нагревается.

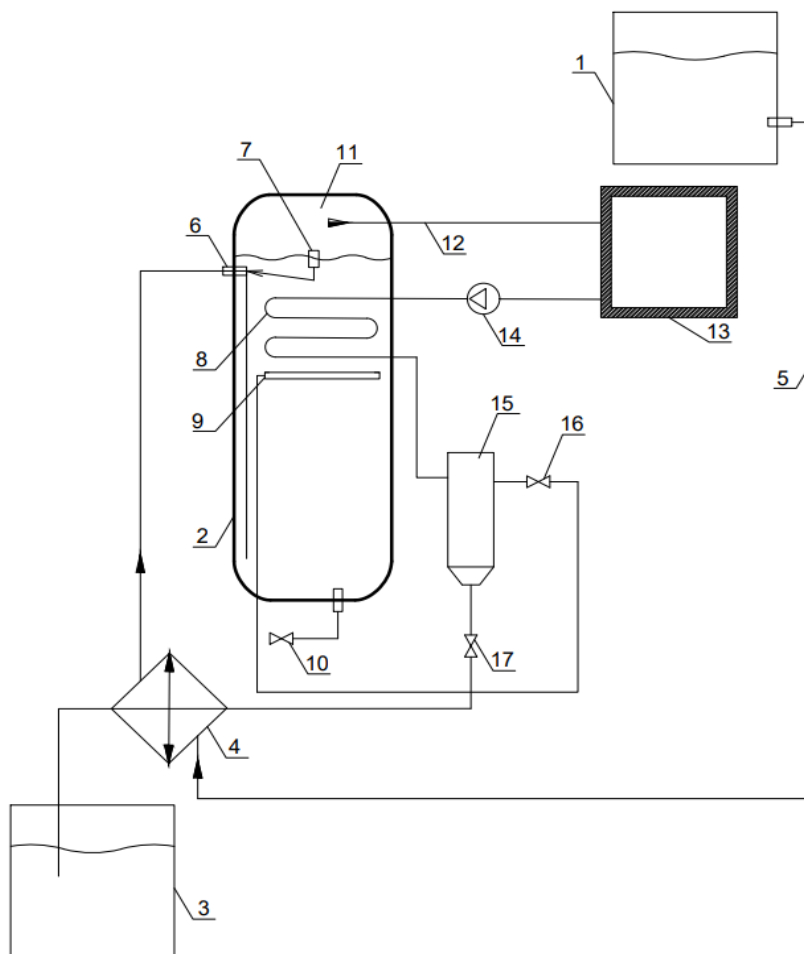


Рисунок 3. **Принципиальная схема гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС:** 1 – емкость опресняемой воды; 2 – испарительная камера; 3 – емкость-сборник пресной воды; 4 – теплообменник исходной опресняемой воды; 5 – переливная труба; 6 – клапан; 7 – датчик уровня воды; 8 – нагревательный элемент; зона паровоздушной смеси; 9 – барботажное устройство; 10 – сливное устройство; 11– зона паровоздушной смеси; 12 труба паровоздушной смеси; 13 – солнечный коллектор; 14 – компрессор; 15 – сепаратор; 16 – регулирующий вентиль; 17 – сливное устройство.

Затем нагретая паровоздушная смесь поступает в компрессор 14, где, сжимаясь, перегревается и направляется в нагревательный элемент 8, где в процессе теплообмена с опресняемой водой конденсируется и следует в сепаратор 15. Нагревательный элемент 8 за счет подвода тепловой энергии от сжатой компрессором 14 паровоздушной смеси обеспечивает нагрев воды. В сепараторе 15 происходит разделение паровоздушной смеси на осушенный воздух и опресненную воду. Осушенный воздух из сепаратора 15 через редукционный клапан 16, в котором понижается его давление, поступает в барботажное устройство 9 и подается в зону нагрева, где в процессе барботажа насыщается влагой и направляется в зону паровоздушной смеси 11. Опресненная вода из сепаратора

15 через регулирующий клапан 17 поступает теплообменник 4, где нагревает опресняемую воду, поступающую из емкости опресняемой воды 1, а затем отправляется в емкость-сборник пресной воды 3. Удаление рассола осуществляется через кран слива рассола 10.

Установка работает в соответствии с циклом, представленным на рисунке 4, и включает в себя следующие процессы: 1-2 процесс нагрева ПВС в солнечном коллекторе и последующее ее сжатие, 2-3 процесс осушки ПВС, 3-4 процесс понижения давления в регулирующем клапане; 4-1 насыщение ПВС при барботаже. Построение циклов работы гигроскопических опреснительных установок следует осуществлять в $h-d$ диаграмме Прохорова В.И., на которой нанесены кривые ϕ/p , что позволяет отображать на ней процессы, протекающие с изменением давления.

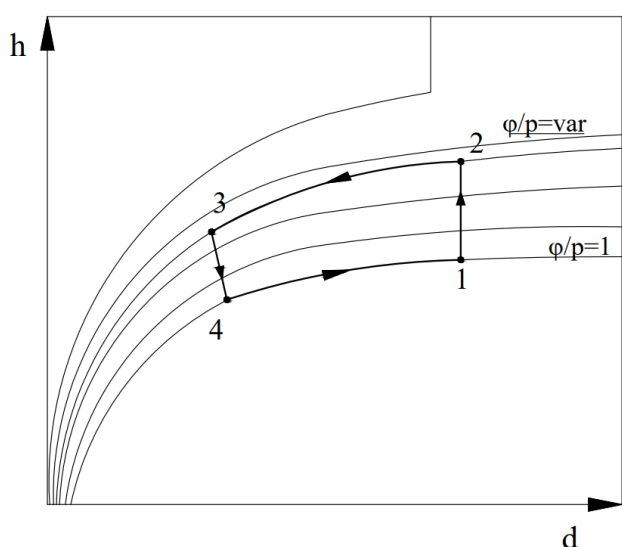
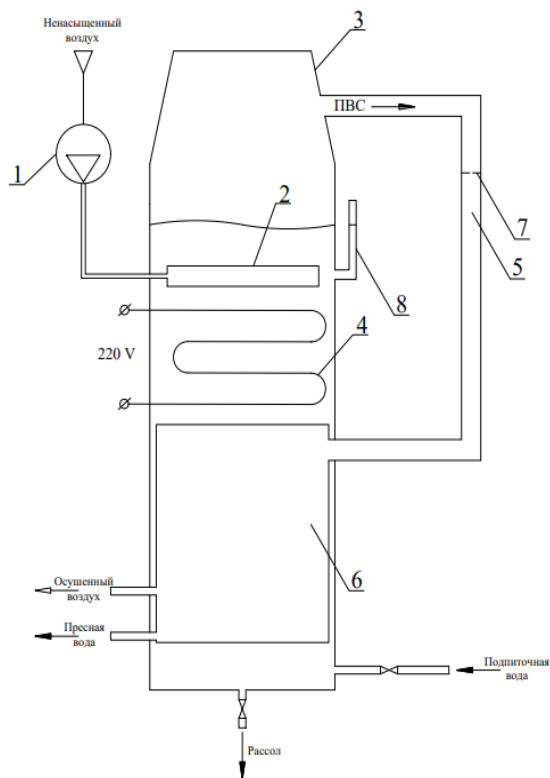


Рисунок 4. Цикл работы гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС: 1-2 – процесс предварительного подогрева и сжатия ПВС; 2-3 – осушка ПВС; 3-4 – понижение давления ПВС в регулирующем клапане; 4-1 – насыщение ПВС

В результате расчетов цикла работы гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС установлено, что количество энергии, потребляемой для опреснения м^3 пресной воды в зависимости от поддерживаемых параметров при исходной солёности 35‰ находится в диапазоне от 6 до 30 кВт·ч.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию работы опреснительной установки гигроскопического типа.

Экспериментальная установка, представленная на рисунке 6, включает в себя испарительную камеру 3, которая представляет собой цилиндрическую емкость диаметром 350 мм, высотой 2,5 м, с верхней частью в виде усеченного конуса, в которой ниже уровня опресняемой воды установлено барботажное устройство 2, под которым располагается нагревательный элемент 4, представленный 3 ТЭНами, мощностью 2 кВт каждый. Под нагревательным элементом 4 располагается конденсатор-сепаратор 6, представляющий собой рекуперативный теплообменник, который разделяет паровоздушную смесь на пресную воду и осушенный воздух. Для перемещения ПВС по тракту установлено нагнетательное устройство 1, а для измерения контроля уровня опресняемой воды предусмотрен измеритель уровня 8.



А



Б

Рисунок 6. Принципиальная схема экспериментальной установки (а) и ее внешний вид (б):

1- нагнетательное устройство; 2 – барботажное устройство; 3 – испарительная камера; 4 – нагревательный элемент; 5 – трубопровод паровоздушной смеси; 6 –конденсатор-сепаратор; 7 – диафрагма, 8 – указатель уровня

Ненасыщенный воздушный поток с помощью нагнетателя 1 подается в барботажное устройство 2, представляющее собой газораспределительную решетку площадью поперечного сечения $19,6 \text{ см}^2$. Далее воздушный поток взаимодействует с нагретой водой, при этом он насыщается влагой. Полученная ПВС по трубопроводу, проходя через диафрагму 7, поступает в конденсатор-сепаратор 6, где осушается, в результате чего разделяется на осушенный воздух и пресную воду.

Экспериментальная установка прошла испытания на Азовском море, при этом соленость исходной морской воды в ходе опытов составляла 6 г/л . Полученный в результате этого эксперимента конденсат в соответствии с заключениями санитарно-гигиенической и микробиологической экспертизы СЭС, исследованием на микроэлементы соответствует всем нормам, предъявляемым к питьевой воде.

В рамках исследования проводился двухфакторный эксперимент, реализующий ортогональный центрально-композиционный план Бокса-Бенкина второго порядка. Результаты экспериментального исследования производительности опреснительной уста-

новки гигроскопического типа были аппроксимированы уравнениями регрессии по методу планирования эксперимента. Параметром оптимизации в данном случае являлась производительность установки.

В качестве варьируемых факторов были приняты температуры воды и воздуха в зоне барботажа. При этом каждый фактор изначально рассматривается лишь на двух фиксированных уровнях. Верхним уровнем для температуры воды было значение 100 °С, нижним – 70 °С, для температуры воздуха верхний предел составляет 100 °С, а нижний – 20 °С.

По результатам экспериментального исследования было получено уравнение регрессии для зависимости производительности установки по пресной воде y , г/мин, от начальных температур воды и воздуха в зоне барботажа. Полученное уравнение регрессии вид:

$$y=4321,58-123,67 \cdot x_1+2,252 \cdot x_2-0,035 \cdot x_1 \cdot x_2+0,919 \cdot x_1^2, \quad (1)$$

где x_1 – температура воды в зоне барботажа, °С; x_2 – температура воздуха в зоне барботажа, °С.

Графики зависимости производительности установки от температуры воды и воздуха в зоне барботажа приведены на рисунке 7.

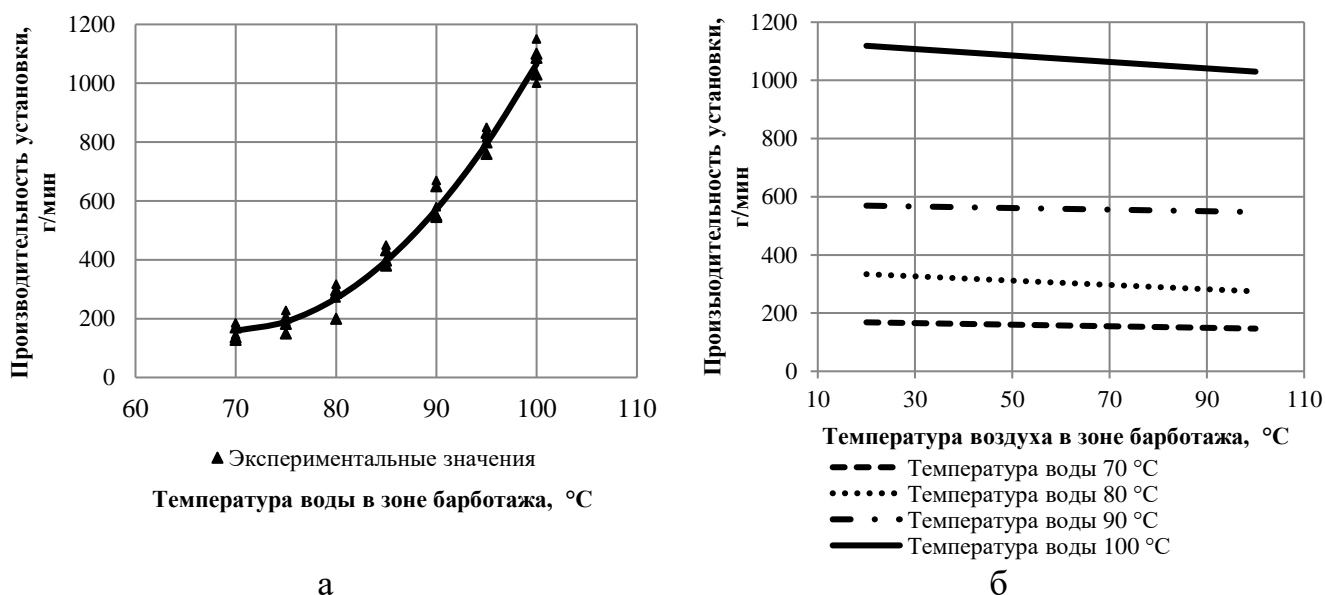


Рисунок 7. Графическая зависимость производительности гигроскопической опреснительной установки от температуры воды (а) и воздуха (б) в зоне барботажа

Из анализа полученных результатов следует, что ключевое влияние на производительность установки оказывает начальная температура воды в зоне барботажа, в отличие от температуры воздуха.

Дальнейшие экспериментальные исследования были направлены на определение влияния температуры опресняемой воды в зоне барботажа на процесс насыщения воздуха. Замеры проводились при постоянном расходе воздуха, составляющем 22,6 м³/ч, толщине барботажного слоя 5 см.

В ходе экспериментального исследования проводились замеры: температуры воздуха на входе в барботажное устройство по сухому $t_{в}^c$ и мокрому термометрам $t_{в}^M$, температуры воды в зоне барботажа $t_{воды}$, расхода ПВС, температуры ПВС по сухому $t_{ПВС}^c$ и

мокрому термометрам $t_{\text{ПВС}}^M$, количества влаги W , унесенной воздухом. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 1.

Измерение температур ненасыщенного воздуха и паровоздушной смеси осуществлялось термопреобразователями сопротивления, расход паровоздушной смеси измерялся косвенно, для этого фиксировался перепад давлений на местном сопротивлении.

В ходе обработки результатов эксперимента определялись среднее квадратичное отклонение, относительная, случайная и абсолютная погрешность измерений, с учетом инструментальной погрешности. При измерении температуры относительная погрешность измерения изменялась в диапазоне от 1,5 до 5%, расхода ПВС – от 5 до 8%.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований процесса насыщения воздушного потока влагой

Параметр	Температура воды в зоне барботажа, °С			
	70	80	90	100
t_B^C , °С	28,06	28,13	28,09	28,03
t_B^M , °С	20,92	20,95	20,94	20,87
$t_{\text{ПВС}}^C$	66,42	77,98	87,88	97,20
$t_{\text{ПВС}}^M$	65,84	77,70	87,61	96,90
Расход ПВС, кг/ч	34,13	39,35	53,15	168,88
W , кг/ч	7,68	12,90	26,70	142,43

В результате проведенного исследования установлено, что интенсивность процесса насыщения существенно зависит от температуры воды в зоне барботажа, при этом изменение количества влаги, уносимого воздушным потоком, с возрастанием температуры происходит нелинейно.

Четвертая глава посвящена разработке математической модели процессов теплообмена, протекающих при контакте воздушного потока и опресняемой воды.

Математическое моделирование осуществлялось с использованием САЕ-пакета конечно-элементного анализа ANSYS (CFD-модуль ANSYS Fluent).

Процесс переноса теплоты и массы описывается системой дифференциальных уравнений неразрывности (2), движения (3,4) и энергии (5), диффузии (6), при составлении которых были приняты допущения, с учетом которых задача свелась к двухмерной постановке.

Основные определяющие уравнения для нахождения полей скорости, температуры, и концентрации в процессе теплообмена в прямоугольной декартовой системе координат с учетом принятых допущений приведены ниже.

$$\frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

$$\rho \cdot \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right); \quad (3)$$

$$\rho \cdot \left(u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right); \quad (4)$$

$$u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{D}{C_p} (C_{\text{пр}} - C_{\text{пв}}) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} \right); \quad (5)$$

$$u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (6)$$

где ρ – плотность, кг/м³; T – температура, К; u – скорость движения, м/с; P – давление, Па; μ – динамическая вязкость, Па·с; $c_{\text{рв}}$, $c_{\text{рп}}$ – массовая изобарная теплоемкость воздуха и водяного пара, Дж/(кг·К); C – массовая концентрация водяного пара, кг/кг; D – коэффициент диффузии, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

При моделировании процесса насыщения морская вода рассматривается как раствор хлорида натрия, ее свойства задаются аппроксимирующими функциями.

В качестве условий однозначности выступают: скорость всплытия пузырьков, начальная температура воздуха и воды, состав паровоздушной смеси на входе в газораспределительную решетку.

При моделировании воздух рассматривается как смесь азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара. Для включения в модель процессов массообмена, добавления дополнительных параметров и условий протекания насыщения воздуха влагой на языке программирования Си был создан UDF-файл (User-Defined Function).

Математическое моделирование процессов тепломассообмена при барботаже воздушного потока в слой нагретой опресняемой воды в программном продукте ANSYS подразумевает использование модели многофазности, тепломассообмена.

Для верификации математической модели использовались полученные в главе 3 экспериментальные данные, при этом относительное отклонение в определении количества влаги, уносимой воздушным потоком, лежит в диапазоне от 8 до 12,4 %.

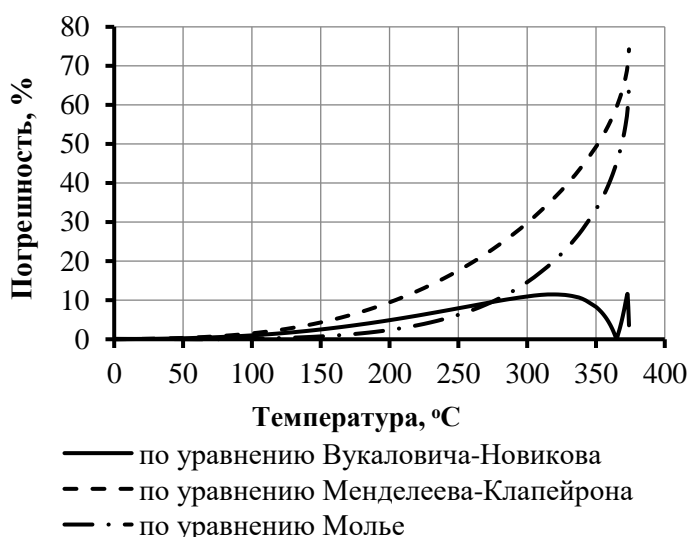
В процессе насыщения воздушного потока в гигроскопических опреснительных установках его теплофизические свойства существенно изменяются, так как концентрация водяных паров в ПВС после контакта с нагретой опресняемой водой значительно увеличивается. Если в смеси содержится достаточно большое количество пара, близкого к состоянию насыщения, то применение законов идеальных газов к парогазовой смеси приводит к погрешности, величина которой возрастает с увеличением доли пара в паровоздушной смеси. Для оценки данной погрешности было проведено исследование применимости законов идеальных газов к водяному пару, входящему в состав ПВС.

В основе большинства теоретических исследований свойств влажного воздуха лежит уравнение идеального газа Менделеева-Клапейрона, не учитывающее ассоциацию, межмолекулярное взаимодействие и особенности термодинамического поведения

влажного воздуха как смеси газов. Известно более 150 уравнений состояния реального газа, для исследования действительных параметров состояния влажного воздуха и его свойств использовались уравнения состояния реального газа Вукаловича-Новикова и Молье.

В результате проведенного исследования установлено, что использование модели идеального газа в диапазоне температур от 0 до 100 °С приводит к незначительной погрешности, которая не превышает 1,5%, что позволяет использовать данную модель при расчете атмосферных гигроскопических опреснительных установок. Уравнение Молье достаточно хорошо учитывает свойства водяного пара, на основании выполненных расчетов установлено, что оно позволяет более точно определять параметры водяного пара в диапазоне температур от 0 до 270 °С (рисунок 8), в связи с этим рекомендуется использовать данное уравнение при расчете циклов гигроскопических установок с компрессией ПВС.

Рисунок 8. Зависимость величины средних относительных отклонений параметров состояния насыщенного водяного пара от его температуры



В связи с этим при расчете действительного влагосодержания влажного воздуха после компрессора должна быть введена поправка:

$$V = \frac{R_n T}{\left(0,00461 \cdot T - 1,45 \cdot p_n \left(\frac{100}{T} \right)^{3,2} - 5,8 \cdot p_n \left(\frac{100}{T} \right)^{13,5} \right)}, \quad (7)$$

где p_n – парциальное давление водяного пара, Па; R_n – газовая постоянная водяного пара, Дж/(кг·К); T – температура паровоздушной смеси, К.

Пятая глава посвящена определению технико-экономических показателей опреснительной станции на базе опреснительных установок гигроскопического типа.

В результате технико-экономического расчета опреснительной станции установлено, что в условиях Алжира при производительности 5000 м³/сут стоимость 1 м³ пресной воды составляет 1 Евро, а срок окупаемости составляет 10 месяцев.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен анализ существующих методов повышения эффективности работы опреснительных установок, получение пресной воды в которых основано на изменении агрегатного состояния. В результате были определены основные направления повышения эффективности работы гигроскопических опреснительных установок и сделан вывод об отсутствии в настоящее время технических решений по повышению эффективности их работы за счет включения трансформаторов тепла в цикл гигроскопических опреснителей.

2. Определены особенности расчета параметров циклов работы опреснительных установок гигроскопического типа. Для расчетных формул параметров состояния влажного воздуха получены поправочные коэффициенты, позволяющие повысить точность расчета отдельных величин на 15%. Установлена возможность применения законов идеальных газов к водяному пару, входящему в состав паровоздушной смеси, при расчете атмосферных опреснительных установок гигроскопического типа. Для расчета процессов, протекающих при давлениях выше атмосферного введена поправка, учитывающая реальные свойства влажного воздуха.

3. Разработана программа ЭВМ «Расчет термодинамических и теплофизических свойств паровоздушной смеси», в которой расчеты выполняются с учетом того, что водяные пары, входящие в ее состав, являются реальным газом.

4. Разработаны технические решения по повышению энергетической эффективности опреснительных установок гигроскопического типа за счет включения в цикл работы трансформаторов тепла. Установлено, что при солености опресняемой воды равной 35‰ для гигроскопических опреснительных установок на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем затраты электрической энергии составляют от 30 до 150 кВт·ч/м³ пресной воды, а для установок с компрессией ПВС от 6 до 30 кВт·ч/м³ пресной воды.

5. Разработана и создана экспериментальная установка для исследования процесса опреснения гигроскопическим методом. Проведены экспериментальные исследования работы опреснительной установки гигроскопического типа, направленные на определение влияния температуры воды и воздуха в зоне барботажа на производительность опреснительных установок гигроскопического типа. Проведено исследование процесса насыщения воздушного потока влагой при его контакте с нагретой опресняемой водой. Выявлено ключевое влияние температуры воды в зоне барботажа на производительность установки.

6. В программном продукте ANSYS разработана математическая модель процессов теплообмена, протекающих при насыщении воздушного потока влагой при его контакте с нагретой опресняемой водой. Относительное отклонение результатов расчета от экспериментальных значений составило не более 12,4%.

7. Техническое решение по повышению эффективности опреснителей гигроскопического типа за счет включения трансформаторов тепла в цикл работы установки получения пресной воды принято ООО «АКВА ЛАЙФ» (г. Иваново) в качестве типовой схемы; запланировано проведение испытаний установки с целью сбора данных, необходимых для разработки технико-экономического обоснования;

8. Положения диссертационной работы, имеющие теоретическую и практическую значимость, а также математическая модель процесса взаимодействия воздушного потока и нагретой опресняемой воды внедрены в учебный процесс на кафедре «Промышленная теплоэнергетика» ИГЭУ им. В.И. Ленина при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника».

9. На основе расчета технико-экономических показателей опреснительной станции, функционирующей на базе установок гигроскопического типа, установлено, что использование предлагаемого в работе технического решения для получения пресной воды в условиях Алжира является экономически эффективным.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. **Козлова, М.В.** Исследование влияния реальных физических свойств влажного воздуха на точность расчета тепломассообменных процессов / М.В. Козлова, П.С. Соколов, А.В. Банников // Вестник ИГЭУ. – 2020. – №4. – С. 5 – 13.

Статьи в изданиях, индексируемых в международной базе цитирования Scopus

2. Соколов, П.С. Experimental research of the operation of self-sufficient desalination setup of vapor-air type / П.С. Соколов, А.В. Банников, **М.В. Козлова** // E3S Web of Conferences: материалы конференции, 18-20 сентября 2019., – Les Ulis, France: EDP Sciences. – 2019. – №124. – С. 1 – 5.

3. Соколов, П.С. Hygroscopic method application and realization for demineralization of sea and salted water / П.С. Соколов, **М.В. Козлова**, А.В. Банников // Journal of Physics: Conference Series: журнал. – Cortona, Italy: Institute of Physics and IOP Publishing Limited. – 2020. – №1 683. – С. 1 – 7.

Патенты на полезные модели:

4. Патент 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**.

5. Патент на полезную модель № 204107 U1 Российская Федерация, МПК C02F 1/04. Гигроскопическая теплонасосная опреснительная установка : № 2020129312 : заявл. 03.09.2020 : опубл. 06.05.2021 / А. В. Банников, П. С. Соколов, **М. В. Козлова**.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021613483 Российская Федерация. Расчет термодинамических и теплофизических свойств паровоздушной смеси : № 2021612643 : заявл. 02.03.2021 : опубл. 09.03.2021 / А. В. Банников, М. В. Козлова

Тезисы и полные тексты докладов конференций

7. **Козлова, М.В.** Паровоздушный метод опреснения морской воды / М.В. Козлова, А.В. Банников, П.С. Соколов // Энергия-2019. Том 1. Теплоэнергетика: Четырнадцатая Межд. науч.-техн. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, 2-4 апреля 2019 г., г. Иваново: материалы

конференции – Иваново: ФГБОУВО "Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина".— 2019. – Т.1. – С.82 – 82.

8. **Козлова, М.В.** Планирование экспериментального исследования процесса паровоздушного опреснения воды / М.В. Козлова, П.С. Соколов, А.В. Банников // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать пятая Межд. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов (14-15 марта 2019 г., г. Москва): тезисы докладов. – Москва – 2019. – С.686 – 686.

9. Соколов, П.С. Исследование влияния температуры воды в зоне барботажа на эффективность опреснительных установок паровоздушного типа / П.С. Соколов, **М.В. Козлова**, А.В. Банников // Тинчуринские чтения. 2019: XIV Межд. молод. научн. конф., 23-26 апреля 2019 г. – Казань: РИО КГЭУ. – 2019. – Т.2, ч.2. – С.161 – 164.

10. Соколов, П.С. Экспериментальная установка автономного опреснителя паровоздушного типа / П.С. Соколов, **М.В. Козлова**, А.В. Банников // Тинчуринские чтения. 2019: XIV Межд. молод. научн. конф., 23-26 апреля 2019 г. – Казань: РИО КГЭУ. – 2019. – Т.2, ч.2. – С.164 – 168.

11. Соколов, П.С. Экспериментальное исследование процесса паровоздушного опреснения воды / П.С. Соколов, **М.В. Козлова**, А.В. Банников // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): сб. научн. трудов по материалам Межд. (XX Всероссийской) научн.-техн. конф., 29-31 мая 2019 г., г. Иваново. – Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина".— 2019. – Т.2. – С.371 – 374.

12. Соколов, П.С. Особенности математического моделирования работы автономной опреснительной установки паровоздушного типа / П.С. Соколов, **М.В. Козлова**, А.В. Банников // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии (Бенардосовские чтения): сб. научн. трудов по материалам Межд. (XX Всероссийской) научн.-техн. конференции, 29-31 мая 2019 г., г. Иваново. – Иваново – 2019. – Т.2. – С.378 – 380.

13. Банников, А.В. Особенности определения параметров влажного воздуха для гигроскопических опреснительных установок / А.В. Банников, П.С. Соколов, **М.В. Козлова** // Энергетические и электротехнические системы: междунар. сб. науч. трудов. – Магнитогорск – 2019. – №6. – С.297 – 306.

14. **Козлова, М.В.** К определению условий работы гигроскопических опреснительных установок / М.В. Козлова, А.В. Банников // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. 2020: тезисы докладов, 12-13 марта 2020 г. Москва. — 2020. – С.658 – 658.

15. Соколов, П.С. О применении и реализации гигроскопического метода опреснения для деминерализации морских и солоноватых вод / П.С. Соколов, **М.В. Козлова**, А.В. Банников // Энергосбережение - теория и практика. 2020: Труды Десятой Межд. школы-семинара молодых ученых и специалистов (Москва, 19–23 октября 2020 г.). – Курск – 2020. – С.93 – 98.

16. **Козлова, М.В.** Оценка влияния реальных физических свойств паровоздушной смеси на эффективность работы опреснительной установки / М.В. Козлова, П.С. Соколов, А.В. Банников // Энергия-2020. Том1. Теплоэнергетика: Пятнадцатая всероссийская (седьмая международная) научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых г. Иваново, 7-10 апреля 2020 года: материалы конференции. – Иваново – 2020. – Т.1. – С.126 – 126.

17. **Козлова, М.В.** Моделирование тепломассообменных процессов при барботировании паровоздушной смеси в жидкость / М.В. Козлова, А.В. Банников // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии: {XXI Бенардосовские чтения}: материалы Межд. научн.-техн. конф., 2-4 июня 2021 г., г. Иваново. – Иваново: ФГБОУВО "Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина".— 2021. – Т.2. – С.338 – 341.

18. Банников, А.В. Исследование влияния параметров взаимодействующих сред на эффективность опреснительных установок паровоздушного типа / А.В. Банников, **М.В. Козлова**, П.С. Соколов // «Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики»: I Всероссийская научн.-техн. конф. с межд. участием (г. Ульяновск, 6 - 7 октября 2021): сб. трудов конф. [Электронный ресурс] – Ульяновск: УлГТУ, 2021. – С.130 – 134.

Козлова Мария Владимировна

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 27.06.2022 г. Формат 60x84^{1/16} Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 122

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ