

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

На правах рукописи



**КОЗЛОВА Мария Владимировна**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ  
УСТАНОВОК ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА**

Специальность: 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент  
Банников Александр Васильевич

## Реферат

Диссертация 146 стр., 33 рис., 13 табл., 128 библ.

Опреснение, гигроскопический метод, паровоздушная смесь, морская вода, насыщение воздушного потока, математическая модель, экспериментальное исследование, трансформатор тепла

**Объектами исследования** являются гигроскопические опреснительные установки с контактным испарителем, в которых процесс насыщения воздушного потока влагой организован путем его диспергирования в слой нагретой опресняемой воды.

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

Выполнен аналитический обзор опубликованных данных о существующих методах опреснения, особенностях свойств рабочих веществ гигроскопических опреснительных установок, способах повышения эффективности опреснительных установок, принцип получения пресной воды в которых основан на изменении агрегатного состояния. Разработана математическая модель процесса насыщения воздушного потока влагой при его взаимодействии с нагретой опресняемой водой. Разработана экспериментальная установка, предназначенная для исследования процесса опреснения гигроскопическим методом. Проведены экспериментальные исследования работы опреснительной установки гигроскопического типа. Разработаны технические решения по повышению эффективности опреснительных установок гигроскопического типа путем включения в цикл их работы трансформаторов тепла.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ ДАННЫХ .	11
1.1. Проблема потребления пресных водных ресурсов .....	11
1.2. Пути преодоления водного кризиса .....	14
1.3. Обзор методов опреснения .....	15
1.3.1. Сравнительный анализ методов опреснения.....	18
1.3.2. Опреснительные установки гигроскопического типа.....	22
1.4. Особенности свойств рабочих веществ опреснительных установок гигроскопического типа .....	31
1.4.1 Свойства влажного воздуха .....	31
1.4.2. Параметры состояния влажного воздуха.....	32
1.4.3. Свойства морской воды .....	36
1.4.4. Уравнение состояния морской воды. Теплофизические свойства морской воды .....	38
Выводы по первой главе.....	41
Постановка цели и задач исследования .....	42
ГЛАВА 2. НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА .....	43
2.1. Теплообмен в опреснительных установках гигроскопического типа .....	43
2.2. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения опреснительных установок.....	45
2.3. Включение трансформаторов тепла в цикл работы гигроскопических опреснительных установок .....	47
2.3.1. Гигроскопические опреснительные установки на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем .....	47
2.3.1.1. Тепловой и материальный баланс гигроскопических опреснительных установок на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем .....	52
2.3.1.2. Особенности расчета циклов опреснительных установок гигроскопического типа.....	55
2.3.1.3. Оценка эффективности работы опреснительных установок гигроскопического типа на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем .....	57
2.3.2. Гигроскопические опреснительные установки с компрессией ПВС.....	60
Выводы по второй главе.....	64
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГИГРОСКОПИЧЕСКОЙ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ .....	66
3.1. Постановка цели и задач экспериментального исследования.....	66
3.2. Описание экспериментальной установки.....	66
3.3. Планирование экспериментального исследования .....	69

3.4. Экспериментальное исследование процесса насыщения воздушного потока влагой .....	76
Выводы по третьей главе.....	79
ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ НАСЫЩЕНИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ВЛАГОЙ .....	81
4.1. Обзор программного комплекса ANSYS применительно к решаемой задаче .....	81
4.2. Диспергирование газа в слой жидкости .....	82
4.3. Математическая модель процесса насыщения воздушного потока влагой при его барботаже в слой нагретой опресняемой воды.....	87
4.4. Особенности расчета параметров состояния паровоздушной смеси .....	92
ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ НА БАЗЕ УСТАНОВОК ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА.....	102
5.1. Экономические аспекты проблемы восполнения запасов пресной воды .....	103
5.1.1. <i>Технико-экономический расчет опреснительной станции, функционирующей на базе опреснительных установок гигроскопического типа .....</i>	<i>105</i>
5.1.2. <i>Оценка влияния производительности опреснительной станции на показатели экономической эффективности .....</i>	<i>114</i>
Выводы по пятой главе.....	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	118
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	131
Приложение 1 Протоколы лабораторных исследований пресной воды .....	132
Приложение 2 Документы, подтверждающие практическую реализацию результатов работы .....	140
Приложение 3 Объекты интеллектуальной собственности.....	143

## ВВЕДЕНИЕ

**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 статье 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 теплоты 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., Ковалева О.П., Сейтжановой М.А., Кахарова С.Д., 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.

**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 тепломассообмена, 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 тепломассообмена, 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 тепломассообменных процессов в специализированном программном комплексе; экспериментального исследования процессов тепломассообмена; математической обработки экспериментальных данных; балансовых расчетов энергетических установок; экономические методы оценки эффективности.

**Степень достоверности полученных результатов** подтверждаются использованием апробированных методов и программных средств моделирования теплоэнергетических процессов; совпадение 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 теплоты 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 тепломассообмена, 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 «Тинчуринские 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 энергетики» (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.

## ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ОПУБЛИКОВАННЫХ ДАННЫХ

### 1.1. Проблема потребления пресных водных ресурсов

Сегодня проблема недостатка чистой пресной воды является одним из факторов, воздействующих на мировое экономическое развитие. Дефицит пресных водных ресурсов становится ограничителем экономического роста в развивающихся странах и является одной из актуальных проблем современности [1-10].

Запасы водных ресурсов колоссальны, но возможность их использования ограничена природными и экологическими факторами [11-13]. От общих запасов водных ресурсов пригодными для потребления являются только 2,5%, из которых 0,3% доступны на поверхности в виде пресной воды (таблица 1.1). Вода Мирового океана имеет высокую соленость, что делает ее непригодной для использования, запасы воды в ледниковых покровах малодоступны, значительная часть подземных вод минерализована и залегает на больших глубинах, в связи с этим количество доступной пресной воды оказывается существенно ограниченным. При этом В. И. Вернадский предложил подразделить воды суши по содержанию в них минеральных веществ следующим образом: до 1 г/кг воды – пресная вода, от 1 до 10 г/кг воды – солоноватая, от 10 до 50 г/кг воды – соленая, свыше 50 г/кг воды – рассол [14].

Таблица 1.1. Мировые водные ресурсы [15]

Вид водных ресурсов	Объем запасов тыс. км <sup>3</sup>	В % от общих запасов воды	В % от общих запасов пресной воды
<i>Соленая вода</i>			
Океаны	1338000	96,5400	–
Соленые/ подземные воды	12870	0,9300	–
Соленоводные озера	85	0,0060	–
<i>Пресные воды суши</i>			
Ледники, снежный покров	24064	1,7400	68,700

Окончание таблицы 1.1.

Пресные подземные воды	10530	0,7600	30,060
Подземный лед, многолетняя мерзлота	300	0,0220	0,860
Пресноводные озера	91	0,0700	0,260
Почвенная влага	16,5	0,0010	0,050
Водяной пар в атмосфере	12,9	0,0010	0,040
Болота, переувлажненные территории	11,5	0,0010	0,030
Реки	2,12	0,0002	0,006
Влага живых организмов	1,12	0,0001	0,003
<b>Общие запасы воды</b>	<b>1386000</b>	<b>100</b>	–
<b>в т.ч. запасы пресной воды</b>	<b>35029</b>	–	<b>100</b>

В условиях современного мира пресная вода уже не является самовосстанавливающимся ресурсом. Она стала коммерческим продуктом, как нефть или газ, степень доступности и обеспеченности, которыми определяет экономическое и социальное состояние населения или отдельных стран и регионов [16,17].

Дефицит пресной воды остро ощущается на территории более 40 стран, расположенных в засушливых областях земного шара и составляющих около 60% всей поверхности суши [18]. Проблема недостатка пресной воды прежде всего характерна для стран Магриба, Ближнего Востока и Центральной Азии. Пресными водами менее обеспечены и самые населенные страны мира – Китай, Индия, Пакистан, Япония. Мировое потребление воды в начале XXI века достигло  $120 \div 150 \cdot 10^9$  м<sup>3</sup> в год [19,20].

Статистические данные о запасе пресных водных ресурсов на душу населения и объем среднегодового использования пресной воды для ряда стран представлены на диаграмме (рисунок 1.1) [14].

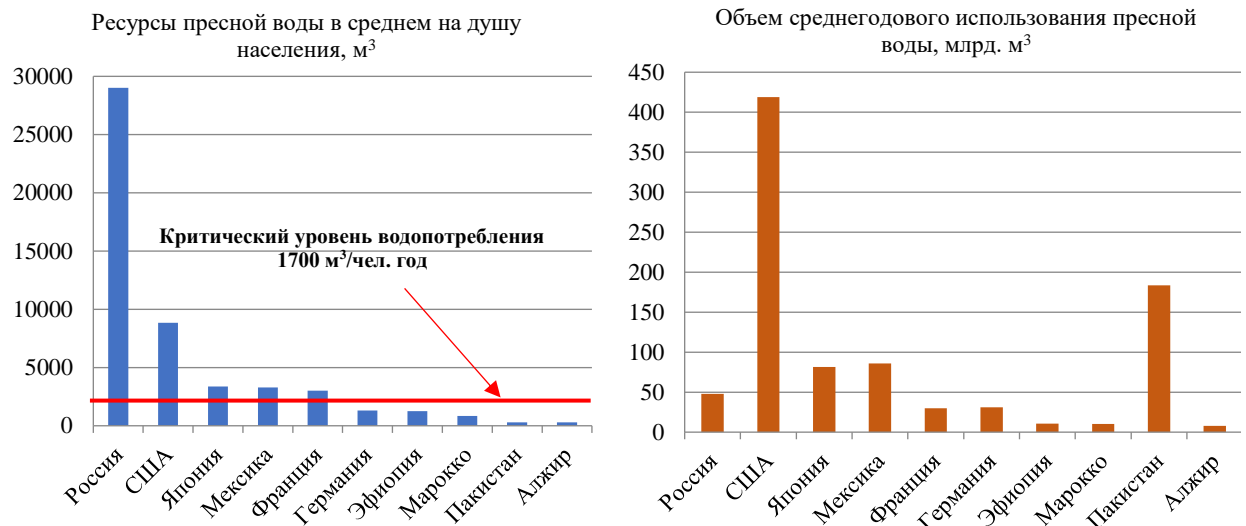


Рисунок 1.1. Ресурсы пресной воды в России и мире

Водные ресурсы используются человечеством для производства продовольственных продуктов, получения тепловой и электрической энергии, для бытовых нужд, санитарно-гигиенических потребностей, они являются одним из наиболее потребляемых природных ресурсов, ежегодно из водных источников на различные нужды (рисунок 1.2) отбирается порядка 4000 км<sup>3</sup> воды, что в разы превышает отбор остальных ресурсов в совокупности.

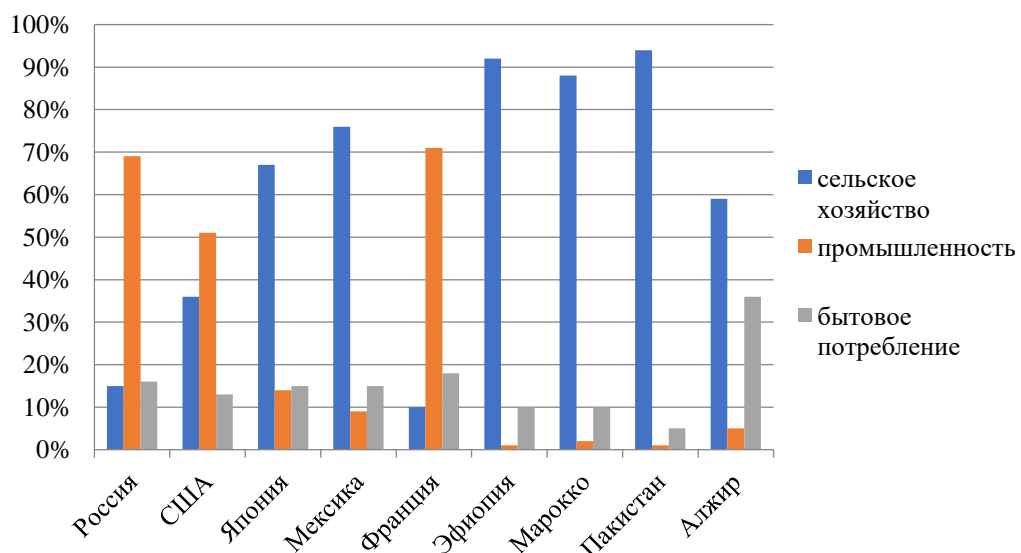


Рисунок 1.2. Структура использования пресной воды в России и мире

Недостаток пресной воды имеется также в России: в Крыму Курганской, Курской и ряде других областей [21].

## 1.2. Пути преодоления водного кризиса

На сегодняшний день существует несколько вариантов решения проблемы дефицита пресной воды [22-24]. К ним относится восполнение недостающих пресных водных ресурсов, осуществляемое за счет их транспортировки из смежных регионов и опреснения морской, океанической или солоноватых вод.

Изучением проблемы восполнения запасов пресной воды занимались Доброшевский Д.П., Кривенко В.Г., Кривицкий С.В., Опекунова Н.А., Магоматов А.С., Королева Ю.В., Семёнов И.Е., Калиев А.Ж., Дамрин А.Г., С.М. Романова, С.И. Кондратов, А.П. Купрюшин, А.А. Чудаков, С.С. Уланова [25-27].

При выборе способа водоснабжения населенных пунктов экономические затраты на транспортировку пресной воды играют определяющую роль. В условиях удаленности потребителя от источника пресной воды затраты на транспортировку могут существенно превышать стоимость опреснения [28].

Одним из вариантов преодоления дефицита воды является опреснение морских и солоноватых вод. Опреснительные заводы действуют на территориях Аравийского полуострова, прежде всего, Саудовской Аравии, Тунисе, Ираке, Иране, ОАЭ, Кувейте, а также Испании, Катаре и Алжире. Объемы мощностей по регионам представлены в таблице 1.2 [29].

Таблица 1.2. Страны-лидеры по опреснению воды

Страна	Млн. м <sup>3</sup> /день	Доля рынка
Саудовская Аравия	7,4	20,6
ОАЭ	7,3	20,3
Испания	3,4	9,4
Кувейт	2,1	5,8
Катар	1,4	3,9
Алжир	1,1	3,1
Китай	1,1	2,9
Ливия	0,8	2,3
США	0,8	2,2
Оман	0,8	2,2

На сегодняшний день общая производительность опреснительных станций составляет более 100 миллионов м<sup>3</sup>/сутки.

Проблема дефицита пресной воды должна решаться комплексно, при этом следует рассматривать энергетические, технологические, экологические и гигиенические аспекты.

### 1.3. Обзор методов опреснения

Процесс получения пресной воды может быть реализован двумя путями: путем извлечения молекул воды из раствора и путем удаления ионов солей. В соответствии с данными принципами все методы опреснения можно разделить на две большие группы: методы с изменением агрегатного состояния и без изменения агрегатного состояния. К первой группе относятся дистилляция, вымораживание и гигроскопический метод. Ко второй группе методов относится обратный осмос, ионный и химический методы.

Одним из направлений дальнейшего развития опреснительных систем является совершенствование существующих методов опреснения, а также поиск и исследование альтернативных им. [30,31].

Для целей промышленного, питьевого и хозяйственного водоснабжения в основном используются обратноосмотический и дистилляционный методы опреснения.

Современные методы опреснения классифицируют следующим образом [32]:

1. По характеру процесса:

а) с изменением агрегатного состояния рабочего тела (дистилляция, гелиоопреснение, естественное и искусственное вымораживание);

б) без изменения агрегатного состояния (ионный обмен, осаждение солей с помощью реагентов, электродиализ, обратный осмос и др.).

2. По назначению:

а) одноцелевые;

б) многоцелевые (выработка электроэнергии, теплоты, воды, извлечение побочных продуктов).

3. По конструкции:

- а) основанные на одном методе опреснения;
- б) комбинированные;

4. По компоновке:

- а) одноступенчатые, многоступенчатые;
- б) однорядные, многорядные;
- в) вертикальные, горизонтальные.

5. По сфере использования:

- а) промышленные;
- б) коммунальные;
- в) сельскохозяйственные.

6. По типу силы и методам воздействия на морскую воду (рисунок 1.3) [33] :

а) объемные (методы, основанные на воздействии сил на весь объем морской или солоноватой воды, способствующие удалению молекул воды или ионов солей);

б) поверхностные (методы, основанные на способности отдельных тел избирательно пропускать молекулы воды или ионы солей);

в) индивидуальные (методы, основанные на химическом или физико-химическом воздействии отдельных тел на ионы солей с целью образования новых легкоудаляемых соединений).

В процессе термической дистилляции к исходной воде подводится количество тепловой энергии, соответствующее скрытой теплоте парообразования, а затем от полученных водяных паров отводится тепловая энергия для их конденсации. Термический метод опреснения основан на фазовых превращениях воды и позволяет получить готовый продукт, очищенный от разнородных примесей, не оказывая на него химического воздействия. Однако процесс дистилляции требует существенных затрат энергии [34].

Деминерализация воды замораживанием основана на том, что при охлаждении в первую очередь будет кристаллизоваться чистая вода. Опреснение в подобных установках включает в себя следующие этапы: кристаллизация-



льдообразование; сепарация льда и рассола; плавление льда. Для реализации данного процесса требуются существенные капитальные затраты, значительные затраты энергии, в том числе на процесс сепарации льда. Кроме этого, недостатками опреснения замораживанием являются: сложное конструктивное исполнение установок, сильная зависимость параметров работы метеорологических параметров; нестабильное качество, получаемой пресной воды, усложняющее прогнозирование степени очистки; необходимость соблюдения последовательности циклов заморозки-плавления [35].

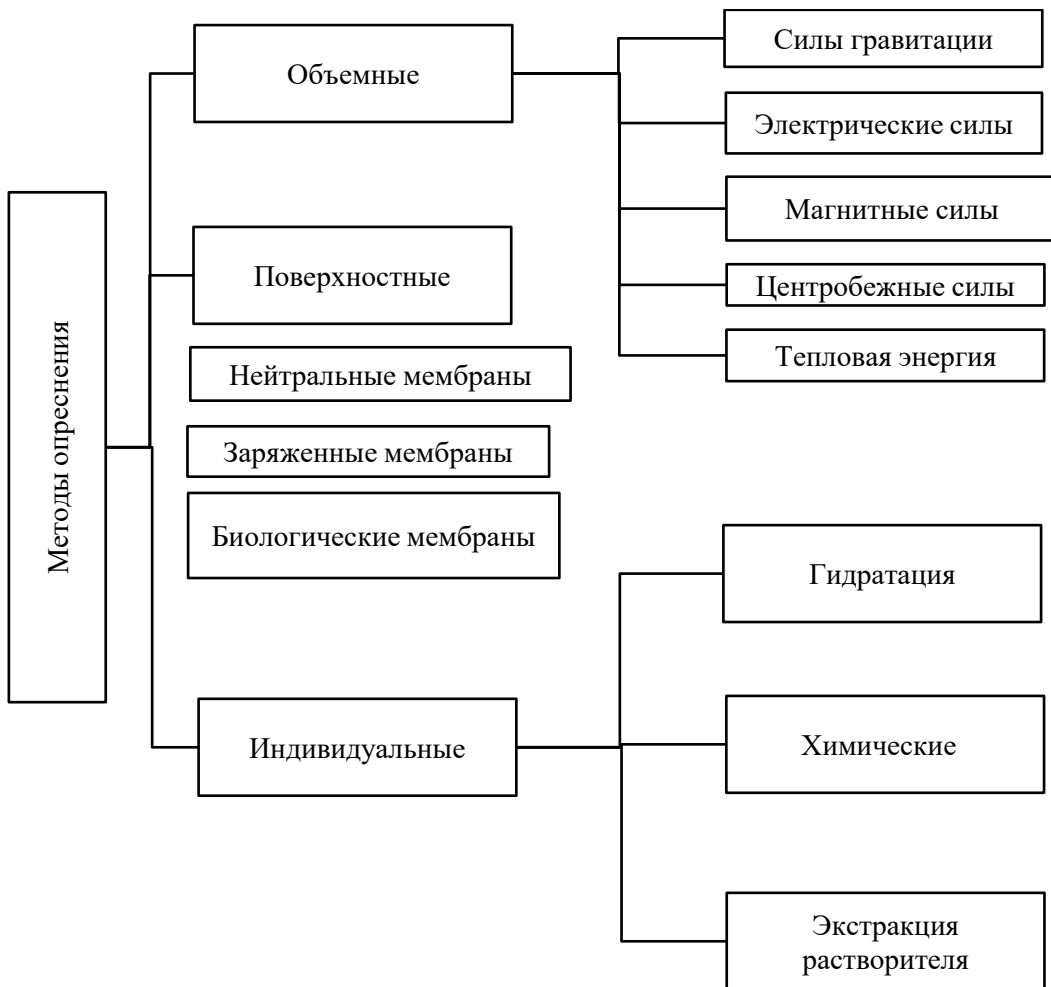


Рисунок 1.3. Классификация методов опреснения

К методам опреснения, в которых не происходит фазового перехода, относят метод обратного осмоса, химический, ионный и электродиализ.

Физическая сущность обратноосмотического метода опреснения заключается в пропускании морской воды через полупроницаемую мембрану, разделяющую раствор и чистый растворитель. Данный метод эффективен для

обессоливания вод с низкой и средней солёностью, практически не применяется в странах с высокой температурой окружающей среды (более 32 °С), так как в этом случае процесс гидролиза мембран идет более интенсивно, что сокращает период их эксплуатации. Соответственно обратноосмотическое опреснение требует существенных экономических затрат на его реализацию [36].

При опреснении морской воды методом электродиализа под действием электрического поля происходит выделение солей и растворов за счет их переноса через ионоселективные мембраны. Для реализации данного метода опреснения требуется предварительная подготовка исходной воды, кроме этого, он не применяется для опреснения высокоминерализованных вод, в связи с тем, что с возрастанием разности потенциалов между электродами, существенно возрастают затраты энергии и процесс износа мембран идет более интенсивно [37].

Ионный метод опреснения основан на поглощении растворенных в воде солей при пропускании исходного продукта через сорбционные фильтры, выполненные из ионообменной смолы. Опреснение воды химическим методом подразумевает введение в исходную воду химических реагентов, которые в результате взаимодействия с растворенными в ней солями образует осадок. В силу сложности исполнения и высокого расхода реагентов, применяемых в процессе деминерализации, химический и ионный методы опреснения не получили широкого распространения [38].

Одним из перспективных методов опреснения в силу его эффективности является гигроскопический [39,40]. При осуществлении данного метода морскую воду испаряют, используя поток воздуха, а затем конденсируют водяные пары, данный метод опреснения достаточно схож с механизмом природного образования пресной воды.

### ***1.3.1. Сравнительный анализ методов опреснения***

Основными факторами, определяющими выбор метода опреснения, являются: параметры получаемого продукта; принцип действия и стоимость

установки; затраты на ее обслуживание и монтаж; свойства обрабатываемой воды; производительность установки и ее месторасположение.

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.

На большинстве действующих опреснительных заводов установлены обратноосмотические и дистилляционные опреснительные установки (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4. Статистические данные об использовании опреснительных установок различного принципа действия

Каждый из вышеописанных методов имеет свои преимущества и недостатки.

Основными преимуществами дистилляционного метода опреснения являются [41]:

- высокое качество получаемой дистиллята;
- возможность предельного упаривания рассола;
- удаление из воды растворенных газов;
- возможность использования регенерации теплоты.

К недостаткам дистилляционного метода опреснения относят:

- необходимость предварительной подготовки воды;

- существенные материальные и энергетические затраты.

Преимуществами обратноосмотического опреснения являются:

- стабильно высокое качество воды по взвесям, биологическим и органическим загрязнениям;
- минимальные количества реагентов и суммарных сбросов солей в окружающую среду;
- возможность сброса концентрата без обработки в канализацию;
- отсутствие агрессивных реагентов.

Недостатками обратноосмотического метода опреснения являются:

- необходимость тщательной предварительной подготовки воды;
- большой расход питающей воды и объем сбросных вод;
- наличие в составе установки расходных материалов.

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 теплоты 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 таблице 1.3 представлена сводная информация по обратноосмотическому, дистилляционному и гигроскопическому методам опреснения.

Качество пресной воды, получаемой термическим методом, высокое, это обусловлено тем, что в процессе опреснения происходит деминерализация и обеззараживание воды. При опреснении методом обратного осмоса степень обеззараживания ниже, так как не происходит полного задерживания отдельных элементов, например, бора, данное обстоятельство приводит к усложнению конструкции установок для доведения воды до требуемого качества.

Таблица 1.3. Сравнительный анализ методов опреснения

Параметр	Обратноосмотический метод опреснения		Дистилляционный метод опреснения	Гигроскопический метод опреснения
Степень надежности	Средняя		Высокая	Высокая
Требования к предварительной подготовке воды	взвешенные вещества	менее 0,1 мг/л	Требуется удаление катионов жесткости, способствующих образованию накипи, и механическая очистка.	Требуется только механическая очистка
	коллоидные загрязнения по показателю КИ 15	менее 5 для промышленных установок (16–24 ч/сутки) КИ 15 < 3		
	Содержание Fe, Al, Mn	менее 0,1 мг/л		
	Органические загрязнения	менее 3 мг/л		
	рН исходной воды	3,5–7,2 для ацетатцеллюлозных мембран; 2,0–12,0 – для полиамидных мембран		
	содержание свободного хлора	менее 0,1 мг/л – для тонкопленочных композитных полиамидных мембран, более 0,6 мг/л – для ацетатцеллюлозных мембран		
Степень обессоливания	85%–98%		97–99,5%	97–99,5%
Удельный расход энергии на процесс опреснения	5-30 кВт·ч/(м <sup>3</sup> пресной воды)		70-250 кВт·ч/(м <sup>3</sup> пресной воды)	80-220 кВт·ч/(м <sup>3</sup> пресной воды)
Возможность утилизации тепла	Отсутствует		Присутствует	Присутствует

Энергоэффективность процесса опреснения в значительной степени зависит от потерь энергии, которые возникают при создании «движущих сил» данного процесса: разности температур, разности давлений и т.д.,

соответственно при совершенствовании и разработке опреснительных установок особое внимание уделяется вопросу снижения потерь энергии.

Резюмируя все вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что гигроскопический метод опреснения является конкурентноспособным по отношению к дистилляционному и обратноосмотическому. Однако на текущий момент энергозатраты для данного метода соизмеримы с затратами энергии для дистилляционного метода опреснения, в связи с этим актуальным является вопрос повышения эффективности опреснительных установок гигроскопического типа.

### ***1.3.2. Опреснительные установки гигроскопического типа***

Гигроскопическими называют опреснительные установки, в составе которых имеется контактный аппарат для осуществления процессов тепло- и массообмена между газом (воздухом) и водой. В зависимости от того газ или вода является греющей средой, гигроскопические опреснители бывают в основном двух типов: с контактными или адиабатными (мгновенного вскипания) испарителями.

Опреснительные установки гигроскопического типа могут быть выполнены по разомкнутой и замкнутой схемой движения газа, с вынесенными или встроенными нагревателями воды и охладителя дистиллята, могут быть одно- или многоступенчатыми, с аппаратами различных классов и конструкций [39].

Простейшую разомкнутую схему имеет, например, опреснитель с встроенным в конденсатор змеевиком охладителя, одновременно выполняющий роль кондиционера воздуха (рисунок 1.5 а). В нем вентилируемый воздух последовательно проходит через 3 испарительные камеры, где взаимодействует с распыляемой форсунками опресняемой водой. После этого паровоздушная смесь конденсируется в результате теплообмена с охлаждающей водой в поверхностном теплообменнике.

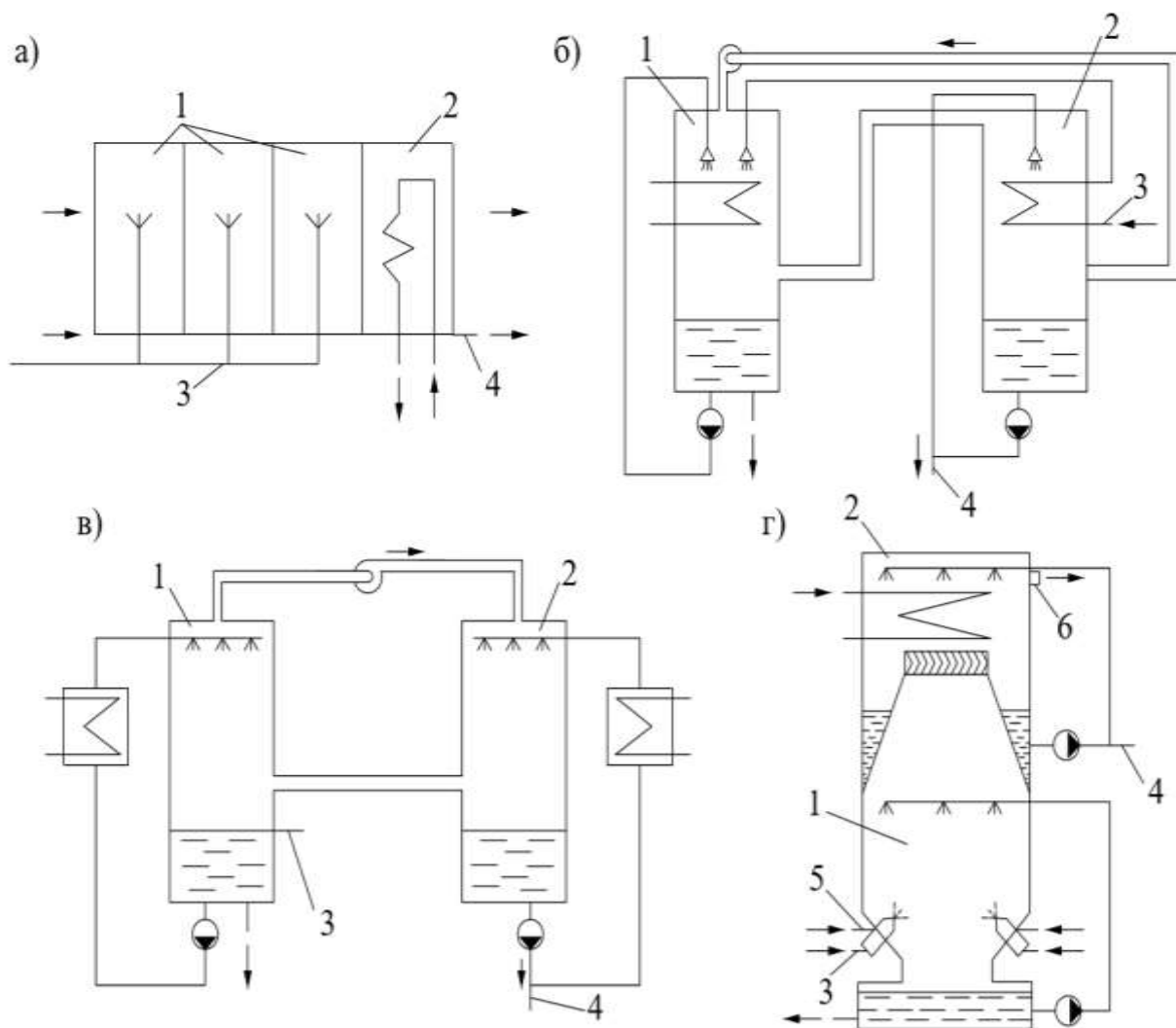


Рисунок 1.5. Гигроскопические опреснители с контактным испарителем:

- 1 – испаритель; 2 – конденсатор; 3 – трубопровод исходной воды;  
4 – выход дистиллята; 5 – вход сжатого воздуха; 6 – выход воздуха

Замкнутую схему имеет опреснитель (рисунок 1.5 б), включающий в себя встроенный в контактный испаритель змеевик нагревателя воды и встроенный в контактный конденсатор змеевик охладителя дистиллята, в котором циркулирует исходная вода. Предварительно нагретая в змеевике охладителя опресняемая вода диспергируется в испарительной камере. Также форсунками разбрызгивается вода, находящаяся в поддоне реактора установки. Попадая на поверхность змеевика, диспергируемая вода нагревается в результате теплообмена с циркулирующей в нем греющей средой. Подаваемый в испарительную камеру воздушный поток в результате контакта с водой насыщается влагой.

Далее паровоздушная смесь осушается в результате контактного теплообмена с разбрызгиваемой опресненной водой. Сконденсировавшаяся влага поступает в поддон конденсатора и отправляется потребителю. Перемещение воздуха обеспечивается вентилятором.

Включение в схемные решения змеевиковых теплообменников снижает эффективность процесса опреснения, за счет появления накипи на поверхности теплообмена. В силу того, что в испарительной камере в вышеописанном техническом решении поддерживается избыточное давление, создаваемое нагнетательным устройством, интенсивность процессов тепломассообмена снижается по сравнению с разрежением. Более совершенным техническим решением является гигроскопический опреснитель (рисунок 1.5 в) с вынесенным теплообменником для подогрева воды и охладителем дистиллята. Для интенсификации процессов тепломассообмена в данном опреснителе вентилятор в испарителе создает разрежение. Таким образом, удастся снизить габариты контактных аппаратов, уменьшить расход воздуха при той же производительности [40].

На рисунке 1.5 г изображено техническое решение по повышению эффективности опреснения за счет интенсификации процессов массообмена. Посредством сжатого воздуха нагретая вода форсунками диспергируется в испарительной камере, в верхней части расположен ороситель рассола, предназначенный для подачи рассола из поддона испарителя противоточно паровоздушной смеси. Далее насыщенный водовоздушный поток поступает в сепаратор, для происходит отделение уносимых воздушным потоком капель опресняемой воды. Затем данная паровоздушная смесь осушается. В данном техническом решении происходит интенсификация тепломассообменных процессов, что позволяет увеличить производительность аппарата [39].

В основе работы опреснительных установок по циклу Майсоценко [42] (рисунок 1.6) также лежит гигроскопический метод опреснения.



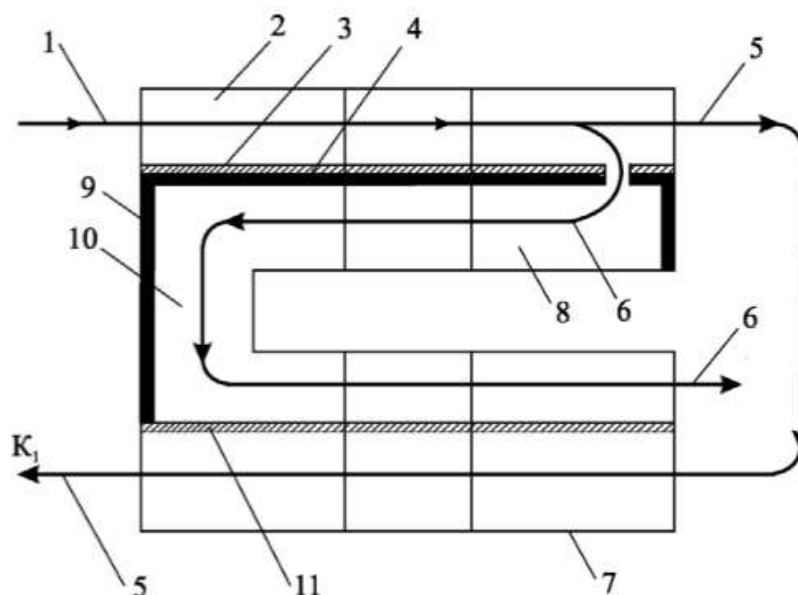


Рисунок 1.6. Гигроскопическая опреснительная установка на основе цикла Майсоценко: 1 – поток наружного воздуха; 2,7 – сухой канал; 3,11 – влагонепроницаемая стенка; 4 – теплообменная поверхность; 5 – первый поток воздуха; 6 – второй поток воздуха; 8,10 – влажный канал

В соответствии с данным циклом нагретый воздушный поток 1 поступает в сухой канал 2 и движется вдоль теплообменной поверхности, нагревая стенку 4. Затем поток поступает в смоченный канал 8 и 10, образованные стенками 4,11, по которым стекает пленка опресняемой воды. В ходе взаимодействия морской воды и воздушного потока часть воды испаряется, а стекающая пленка охлаждается. В результате данного процесса воздух насыщается, повышается солесодержание, воды взаимодействующей с воздушным потоком. В последующем насыщенный воздух осушается. Часть воздушного потока нагнетателем подается в сухой канал 7, где нагревает стенку 1.

В силу того, что опреснительные установки гигроскопического типа не получили широкого распространения, вопросы повышения эффективности данных опреснителей являются малоизученными.

На сегодняшний день основным направлением совершенствования гигроскопических опреснителей стало определение режимов их работы, которые бы обеспечивали достаточно малую скорость образования накипи при рациональном использовании первичной энергии.

Состав исходной опресняемой воды существенно влияет на качество получаемого продукта. Основными источниками для организации хозяйственно-питьевого водоснабжения населения пресной водой являются солоноватые (поверхностные и подземные) и соленые (морские и океанические) воды.

Выбор источника опресняемой воды определяется составом исходной воды, ее качеством и располагаемыми энергоресурсами. Перед выбором источника опресняемой воды предварительно проводится полный санитарно-химический и микробиологический анализ с учетом изменения солености на протяжении года, анализ макро- и микроэлементного и микробного состава, содержания основных органических загрязняющих веществ.

В морской и океанической воде содержится значительное количество ионов магния, кальция, сульфата серы, карбоната кальция, гидрокарбоната. Данное обстоятельство обуславливает повышенную жесткость морской воды. Причиной накипеобразования является разложение содержащихся в воде бикарбонатов кальция, которое может происходить даже при слабом (до 30 °С) нагреве воды.

Общее термическое сопротивление накипи, образующейся в гигроскопических опреснительных установках, зависит от ряда переменных факторов, что не позволяет нормировать его значения. В зависимости от условий работы опреснительной установки на теплообменных поверхностях могут образовываться отложения, различные по составу и физическим свойствам.

Разделяют следующие виды накипи. Карбонатная накипь характерна для вакуумных установок, в которых температура испарения не превышает 75-78°С. При более высоких температурах эта накипь практически не обнаруживается. Магнезиальная накипь – основной компонент накипи гигроскопических опреснительных установок, работающих при давлении, близком к атмосферному. Образование гидроокиси магния в испарителях обусловлено гидролизом карбонатных ионов, который интенсивно протекает при температурах более 75°С, и весьма малой растворимостью гидроокиси магния.

Устойчивость работы гигроскопических опреснительных установок во многом зависит от накипеобразования, происходящего на греющих элементах установки, снижающего коэффициент теплопередачи и ее производительность.

Основным фактором влияющим на образование накипи является температура опресняемой воды, она определяет качественный состав образующейся накипи, а изменение концентрации опресняемой воды приводит к изменению количественных соотношений солей, входящих в состав накипи, при данной температуре.

Отрицательные последствия накипеобразования:

1. Образующая накипь, покрывает поверхность теплообмена, что создает дополнительное термическое сопротивление, что в последствии влияет на коэффициент теплопередачи. Данные обстоятельства приводят к возрастанию расхода энергии. Наличие отложений толщиной 5 мм приводят к увеличению расхода энергии до 30%.

2. Наличие отложений со стороны опресняемой воды приводит к возрастанию температуры стенки, она тем больше увеличивается, чем выше термическое сопротивление слоя накипи. Возрастание температуры способствует снижению прочности и предела текучести материала, из которого выполнена теплообменная поверхность.

3. Некоторые виды твердых отложений способствуют процессу коррозии. Основной недостаток накипи состоит в том, что даже микронные слои «водного камня» ускоряют точечную коррозию и уменьшают производительность теплообменника.

На рисунке 1.7 показана классификация существующих методов борьбы с накипеобразованием. Однако при анализе известных методов основной задачей является экспертная оценка, которая подразумевает выбор наиболее приемлемого. Известно, что эффективность каждого метода зависит от состава питательной воды, условий процесса опреснения, конструктивных характеристик опреснительных установок, а также других особенностей. Причем

основным критерием для выбора того или иного метода служит его эффективность и стоимость затрат по его использованию.



Рисунок 1.7 Способы борьбы с накипеобразованием

Борьба с накипеобразованием ведется путем приспособления конструкций, совершенствованием режимов их работы и предварительным умягчением

воды [41]. Одним из способов снижения интенсивности накипеобразования является организация получения пресной воды под вакуумом.

И.Э. Апельцин и В.А. Клячко выделяют следующие методы с накипеобразованием [43]:

- подкисление воды и применение антинакипинов;
- добавление зернистых присадок (затравок);
- гидрофобное покрытие поверхности теплообмена;
- магнитная, ультразвуковая и радиационная обработка питательной воды.

Так как летучие фенолы при опреснении могут уноситься совместно с водяным паром и в последующем концентрироваться в полученном дистилляте (в 1,5-2 раза по отношению к исходной воде), то их содержание в опресняемой воды должны быть менее 0,001 мг/л.

В результате работы опреснительных установок различного принципа действия образуются сбросные воды, представляющие собой в основном концентрированный раствор растворенных в исходной воде веществ. Общий объем получаемого рассола весьма существенен и составляет в зависимости от принципа работы установки от 15 до 30 % от количества поступающего на опреснение воды. Получаемые сбросные воды представляют собой опасность для окружающей среды. Для снижения количества сбросных вод рационально применять схемы с частичной рециркуляцией концентрата.

Одним из преимуществ гигроскопического метода опреснения является то, что он позволяет осуществлять последующее упаривание рассола с доведением до сухого остатка с получением дополнительного продукта коммерциализации в виде кристаллической соли.

Получаемая в ходе работы опреснительных установок вода должна соответствовать требованиям нормативных документов. К основным параметрам опресненной воды в данном случае относятся: благоприятные органолептические свойства, безвредность химического состава и безопасность в эпидемиологическом (инфекционном отношении). Кроме этого полученная вода должна

соответствовать критерию физиологической полноценности и стабильности качества.

Полученная в ходе опреснения вода является низкоминерализованной. Исследования показали, что потребление такой питьевой воды не позволяет восполнить биологическую потребность организма в минеральных солях, таким образом полученная вода не является физиологически полноценным продуктом. При длительном потреблении опресненной воды, характеризующейся низким уровнем минерализации, щелочности, содержания солей жесткости и отдельных микроэлементов (например, фтора) происходит нарушение водно-солевого баланса организма, что приводит к ухудшению работы сердечно-сосудистой, пищеварительной, эндокринной, костной и других систем. Для доведения получаемой пресной воды до нужного качества проводится коррекция солевого состава.

В ходе опреснения гигроскопическим методом с водяными парами могут уноситься нежелательные компоненты, например, бром, содержащийся в значительных количествах в морской и подземных водах. В связи с этим для данного метода опреснения важным является определение и регламентация ряда микроэлементов, поступающих в конденсат веществ.

В связи с тем, что гигроскопический метод подразумевает нагрев и последующее испарение воды, то данный метод характеризуется достаточно высоким обеззараживающим действием. Однако сам по себе такой процесс опреснения не является надежным способом обеззараживания, так как различные микроорганизмы могут поступать в готовый продукт извне, они могут уноситься с водяным паром, поступать в осушители и другие поверхности, с которыми взаимодействует полученный конденсат. Тем не менее при высоких температурах большинство бактерий и микроорганизмов способны утрачивать свое санитарно-показательное значение.

Безопасность питьевой опресненной воды в эпидемическом отношении определяется общим числом микроорганизмов, числом бактерий группы кишечных палочек, а также отсутствием отдельных видов микроорганизмов,

имеющих санитарно-показательное значение для гигроскопического метода опреснения (термоустойчивые спорообразующие бактерии, железобактерии).

#### **1.4. Особенности свойств рабочих веществ опреснительных установок гигроскопического типа**

##### ***1.4.1 Свойства влажного воздуха***

Из большого числа газовых смесей и пара, которые являются рабочими телами во многих процессах, протекающих в различных аппаратах и агрегатах и технологических процессах, самой распространенной является смесь сухого воздуха и водяного пара. Для правильной эксплуатации, проведения конструктивных расчетов и определения режима работы, а также проведения анализа конкретных процессов необходимо особое внимание уделять изучению термодинамических особенностей и теплофизических свойств влажного воздуха. Учитывая, что в процессе получения пресной воды гигроскопическим методом, все параметры влажного газа меняются, то для анализа этих процессов недостаточно использовать классические методы термодинамики, которые применяются для анализа смесей постоянного состава [44].

Для гомогенной смеси сухого воздуха и перегретого пара (ненасыщенный влажный воздух) характерно не только то, что в отдельных процессах количество водяного пара меняется, но и то, что доля этого компонента в смеси не может быть произвольной, в этом заключается основное отличие рассматриваемой смеси от обычной смеси идеальных газов [45].

В связи с тем, что влага, входящая в состав влажного воздуха, может находиться в трех агрегатных состояниях, влажный воздух является гетерогенной двухкомпонентной смесью воздуха и влаги.

Сухой воздух является газовой смесью, при этом под газовой смесью подразумевается механическая смесь отдельных газов, не вступающих между собой ни в какие химические реакции [46]. Состав сухого атмосферного воздуха, рекомендуемый различными источниками [47-51] отличается незначительно, некоторые авторы предлагают учитывать только два компонента – азот и

кислород. В таблице 1.4 приведен рекомендуемый состав сухого воздуха, полученный сопоставлением химических анализов пробы, взятых в разных местах и разное время.

Таблица 1.4. Состав сухого воздуха [46]

Компоненты	Химическая формула	Объемная доля, %	Массовая доля, %
Азот	N <sub>2</sub>	78,087	75,52
Кислород	O <sub>2</sub>	20,95	23,15
Аргон	Ar	0,93	1,282
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	0,03	0,046
Неон	Ne	18·10 <sup>-4</sup>	12,5·10 <sup>-4</sup>
Гелий	He	5,24·10 <sup>-4</sup>	0,72·10 <sup>-4</sup>
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	2,03 ·10 <sup>-4</sup>	1,28·10 <sup>-4</sup>
Метан	CH <sub>4</sub>	1,5·10 <sup>-4</sup>	0,8·10 <sup>-4</sup>
Криптон	Kr	1,15·10 <sup>-4</sup>	3,3·10 <sup>-4</sup>
Водород	H <sub>2</sub>	0,5·10 <sup>-4</sup>	0,035·10 <sup>-4</sup>
Закись азота	N <sub>2</sub> O	0,5·10 <sup>-4</sup>	0,8·10 <sup>-4</sup>
Ксенон	Xe	0,08·10 <sup>-4</sup>	0,36·10 <sup>-4</sup>
<b>Сухой воздух</b>		100	100

#### 1.4.2. Параметры состояния влажного воздуха

Для влажного воздуха, как для смеси сухого воздуха и водяного пара справедлив закон Дальтона, в соответствии с которым сумма парциальных давлений, входящих в газовую смесь равна общему давлению газовой смеси (1.1) [52].

$$P_{см} = P_{в} + P_{п}, \quad (1.1)$$

где  $p_{в}$  – парциальное давление сухого воздуха, Па;  $p_{п}$  – парциальное давление водяного пара, Па.1

Предельное значение парциального давления пара при данной температуре воздуха соответствует давлению насыщения  $p_{н}$ . Давление насыщения является функцией температуры и не зависит от давления смеси.



Для сухого воздуха с достаточной точностью парциальное давление может быть определено в соответствии с уравнением Менделеева-Клапейрона (1.2):

$$p_{\text{св}} \cdot V = m_{\text{св}} \cdot R_{\text{св}} \cdot T, \quad (1.2)$$

где  $V$  – объем занимаемый сухим воздухом,  $\text{м}^3$ ;  $m_{\text{св}}$  – масса сухого воздуха, кг;  $R_{\text{св}}$  – газовая постоянная, Дж/(К·кг);  $T$  – температура смеси, К.

Основная задача расчета параметров состояния газовых смесей сводится к определению газовой постоянной, молекулярной массы, плотности и удельного объема на основе заданного состава.

Свойства паровоздушной смеси зависят от количественного состава компонентов. При незначительном содержании водяного пара или невысоких давлениях смесь обладает свойствами, близкими к свойствам идеального газа, законы которого могут быть применены с достаточной точностью. В этом случае для влажного воздуха, а точнее его компонентов справедливо уравнение Менделеева-Клапейрона, которое для водяного пара в состоянии перегретого и насыщенного пара имеет вид:

$$p_{\text{п}} \cdot v = R_{\text{п}} \cdot T, \quad (1.3)$$

$$p_{\text{п}} \cdot v'' = R_{\text{п}} \cdot T, \quad (1.4)$$

где  $R_{\text{п}}$  – газовая постоянная водяного пара, Дж/(К·кг);  $v$ ,  $v''$  – удельные объемы для перегретого и сухого насыщенного водяного пара,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;  $p_{\text{п}}$ ,  $p_{\text{п}}$  – парциальные давления для перегретого и сухого насыщенного водяного пара соответственно, Па.

Одной из основных характеристик влажного воздуха является его влагосодержание, представляющее собой отношение массу паров воды, приходящихся на 1 кг сухого воздуха, в г/кг.с.в.:

$$d_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{св}}} \cdot 1000 \quad (1.5)$$

Путем математических преобразований получают :

$$d_{\text{п}} = \frac{g_{\text{п}}}{g_{\text{св}}} 1000 = \frac{r_{\text{п}} \cdot \mu_{\text{п}}}{r_{\text{св}} \cdot \mu_{\text{св}}} 1000 = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{св}}} \frac{18,016}{28,964} 1000 = 622 \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{см}} - p_{\text{св}}} = 622 \frac{\varphi \cdot p_{\text{н}}}{p_{\text{см}} - \varphi \cdot p_{\text{н}}}, \quad (1.6)$$

где  $g_{\text{п}}$ ,  $g_{\text{св}}$  – массовые доли сухого воздуха и водяного пара.

При значительном содержании влаги или высоких температурах удобнее работать с составом смеси, выраженном долевой концентрацией, весовыми, объемными или мольными долями пара [47].

Таблица 1.5. Зависимость между различными параметрами состава смеси

Заданный параметр	Расчетная формула			
	$d_{\text{п}}$	$g_{\text{п}}$	$r_{\text{п}} = z_{\text{п}}$	$x_{\text{п}}$
$d_{\text{п}}$	$d_{\text{п}}$	$\frac{d_{\text{п}}}{1+d_{\text{п}}} \quad (1.7)$	$\frac{d_{\text{п}}}{\frac{R_{\text{св}}}{R_{\text{п}}} + d_{\text{п}}} \quad (1.8)$	$\frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{св}}} \cdot d_{\text{п}} \quad (1.9)$
$g_{\text{п}}$	$\frac{g_{\text{п}}}{1-g_{\text{п}}} \quad (1.10)$	$g_{\text{п}}$	$\frac{1}{1 + \frac{1-g_{\text{п}}}{g_{\text{п}}} \cdot \frac{R_{\text{св}}}{R_{\text{п}}}} \quad (1.11)$	$\frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{св}}} \cdot \frac{g_{\text{п}}}{1-g_{\text{п}}} \quad (1.12)$
$r_{\text{п}} = z_{\text{п}}$	$\frac{R_{\text{св}} \cdot r_{\text{п}}}{R_{\text{п}} (1-r_{\text{п}})} \quad (1.13)$	$\frac{1}{1 + \frac{1-r_{\text{п}}}{r_{\text{п}}} \cdot \frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{св}}}} \quad (1.14)$	$r_{\text{п}} = z_{\text{п}}$	$\frac{r_{\text{п}}}{1-r_{\text{п}}} \quad (1.15)$
$x_{\text{п}}$	$\frac{R_{\text{св}}}{R_{\text{п}}} \cdot x_{\text{п}} \quad (1.16)$	$\frac{x_{\text{п}}}{\frac{R_{\text{п}}}{R_{\text{св}}} + x_{\text{п}}} \quad (1.17)$	$\frac{x_{\text{п}}}{1+x_{\text{п}}} \quad (1.18)$	$x_{\text{п}}$

**Примечание.** В таблице обозначены  $d_{\text{п}}$  – влагосодержание кг/кг с.в.;  $g_{\text{п}}$  – весовая доля пара;  $r_{\text{п}}$  – объемная доля пара;  $x_{\text{п}}$  – мольная доля пара;  $z_{\text{п}}$  – мольное паросодержание моль/моль с.г.

Из формул 1.8 и 1.11 следует, что величины  $1 - g_{\text{п}}$  и  $1 + d_{\text{п}}$  являются взаимно обратными:

$$(1 - g_{\text{п}}) \cdot (1 + d_{\text{п}}) = 1 \quad (1.19)$$

К числу параметров, характеризующих влажный воздух как теплоноситель, относится энтальпия. Энтальпия влажного воздуха  $h$  рассчитывается на 1 кг сухого воздуха (кДж/кг с.в.) и определяется как сумма энтальпий компонентов, находящихся в 1 кг сухого воздуха:

$$h_{\text{см}} = h_{\text{св}} + \frac{d_{\text{п}}}{1000} \cdot h_{\text{п}} + \frac{d_{\text{ж}}}{1000} \cdot h_{\text{ж}} + \frac{d_{\text{т}}}{1000} \cdot h_{\text{т}}, \quad (1.20)$$

где  $d_{\text{ж}}$ ,  $d_{\text{т}}$  – количество жидкости и твердой фазы воды (лед, снег) в граммах на килограмм сухого воздуха (влажностенности), кг/кг с.в.;  $h_{\text{св}}$ ,  $h_{\text{п}}$ ,  $h_{\text{ж}}$ ,  $h_{\text{т}}$  – удельные энтальпии сухого воздуха, пара, жидкости и твердой фазы воды, кДж/кг.

В определенных условиях в воздухе может содержаться большее количество водяного пара, чем то, которое соответствует состоянию насыщения. Это возможно при резком охлаждении воздуха (при адиабатическом расширении) или в очень чистом воздухе, не содержащем твердых взвешенных частиц, на которых могли бы образоваться капельки. Такое состояние называется перенасыщением. При взаимодействии воздушного потока и воды в контактных аппаратах принято считать, что перенасыщения не происходит [53].

Если в паровоздушной 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 [54,55]. В связи актуальным становится оценка данной погрешности в определении параметров состояния и теплофизических свойств паровоздушной смеси для параметров процессов, протекающих в гигроскопических опреснительных установок.

Использование диаграмм состояния влажного воздуха при графоаналитическом методе расчета процессов обработки позволяет осуществлять выбор оптимальных проектных решений, снизить их трудоемкость, обеспечить достаточную точность в соответствии с инженерными требованиями.

В настоящее время для определения отдельных параметров влажного воздуха широко применяется  $h-d$  диаграмма Рамзина Л.К. [56]. Однако существенным недостатком этой диаграммы является то, что она построена для одного конкретного давления, что ограничивает возможность ее применения для построения процессов, сопровождающихся его изменением [58].

Михайловским Г.А. предложена  $h-s$  диаграмма для влажного насыщенного воздуха [53]. С помощью этой диаграммы можно проводить графоаналитические расчеты для процессов, связанных с изменением давления. Однако она обладает двумя недостатками:

1) расчет процессов ненасыщенного и перенасыщенного воздуха, а так же процессов в области тумана возможен лишь с дополнительными расчетами, причем графическая интерпретация процессов и циклов условна и не дает наглядного представления о физике изменения состояния воздуха;

2) диаграмма построена для маленького диапазона температур и давлений ниже атмосферного.

$h-d$  диаграмма разработанная Прохоровым В.И. охватывает широкое поле влагосодержаний, температур и давлений [57]. На ней нанесены кривые  $\phi/p$ , представляющие собой отношение влажности к общему давлению смеси, данное обстоятельство позволяет использовать эту диаграмму для построения процессов, протекающих при избыточном давлении.

### ***1.4.3. Свойства морской воды***

При разработке опреснительных установок следует уделять внимание особенностям физико-химических свойств исходной воды [59].

Свойства морской воды существенно отличаются от свойств деминерализованных вод, данное обстоятельство вызвано наличием в морской воде растворенных в ней веществ [60,61].

Морская вода характеризуется сложными физико-химическими свойствами, что объясняется многообразием ее состава. Вещества, содержащиеся в составе морской воды, классифицируются на растворенные в ней соли, газы,

электролиты, неэлектролиты и органические соединения, а также находящиеся в форме самостоятельной фазы твердые частицы и газовые пузыри. Следует учитывать, что содержание веществ в воде не постоянно и зависит от района, температурных факторов, глубины, из которой отбирается вода.

Весь химический состав морской воды можно подразделить на 5 групп [58]:

- 1) главные ионы (11 ионов - хлор, натрий, сульфат, магний, кальций, калий, бикарбонат, бром, барит, стронций, фтор), которые составляют 99.98% массы всех растворенных веществ;
- 2) растворенные газы ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ , Ar и другие инертные газы);
- 3) биогенные элементы (C, H, N, P, Si, Fe, Mn) и их соединения, из которых состоят морские организмы;
- 4) группа микроэлементов с концентрацией меньше  $1 \times 10^{-6}$ ;
- 5) органические вещества

Физические свойства воды, кинетика протекающих в ней химических процессов определяются свойствами воды, как растворителя и составом растворенных в ней веществ [58].

Средняя концентрация растворенных в водах твердых веществ в водах Мирового океана составляет около 3,5%. Больше всего в морской воде содержится хлора – 1,94%, т. е. более 55% всех растворенных в воде твердых веществ (таблица 1.6).

Таблица 1.6. Состав природных вод (% по массе)

Катионы		Анионы	
$Na^+$	1,08	$Cl^-$	1,94
$Mg^{2+}$	0,13	$SO_4^{2-}$	0,27
$Ca^{2+}$	0,04	$S^{2-}$	0,09
$K^+$	0,04	$HCO_3^-$	0,01

В основном растворенные в воде элементы обычно находятся не в чистом виде, а в виде соединений, например:

- 1) хлориды ( $NaCl$ ,  $MgCl_2$ ,  $KCl$ );

2) сульфаты ( $MgSO_4$ ,  $CaSO_4$ ,  $K_2SO_4$ );

3) карбонаты ( $CaCO_3$ ).

Для различных частей Мирового океана установлено, что соотношение между растворенными в воде веществами является стабильным. Исходя из того, что наибольшая концентрация в морской воде ионов натрия и хлора, то при выполнении расчетов морскую воду можно рассматривать как раствор хлорида натрия.

Основной характеристикой морской воды является ее соленость, под которой понимается общий вес в граммах всех твердых веществ, растворенных в 1000 граммах морской воды, при условии, что фтор, бром, иод замещены эквивалентным количеством хлора, все карбонаты превращены в окислы и все органические вещества сожжены [58].

Соленость и содержание хлора связаны соотношением:

$$S=1,80655 \cdot Cl, \quad (1.21)$$

где  $Cl$  – содержание хлора, %.

Средняя солёность вод Мирового океана близка к 35,0‰.

В связи с тем, что морская вода является соленой, материалы для изготовления элементов гигроскопических опреснительных установок следует выбирать, учитывая специфику их эксплуатации и предусматривая то обстоятельство, что физико-химические свойства материалов могут изменяться под воздействием рабочих и агрессивных сред высоких или низких температур и протекающих процессов.

#### ***1.4.4. Уравнение состояния морской воды. Теплофизические свойства морской воды***

Зависимость удельного объема или плотности морской воды от определяющих факторов выражается уравнением состояния [62].

Определяющими факторами уравнения состояния морской воды является температура  $T$ , соленость  $S$  и давление  $P$ . В дифференциальной форме уравнение состояния относительно удельного объема имеет вид:

$$dv = \left( \frac{dv}{dT} \right)_{SP} dT + \left( \frac{dv}{dS} \right)_{TP} dS + \left( \frac{dv}{dP} \right)_{TS} dP. \quad (1.22)$$

Связь между плотностью воды и определяющими ее параметрами нелинейна, и простой теоретической формулы для нее еще не получено. Поэтому предложены приближенные уравнения состояния, по которым вычисляется плотность [62].

На сегодняшний день известно достаточно большое количество уравнений состояния морской воды (П.С. Линейкина, О.И. Мамаева, Тумлирца, Тайта-Гибсона, Кнудсена, сотрудников морского гидрофизического института АН УССР и др.), все эти уравнения являются приближенными, содержат постоянное слагаемое, и по сути, представляют собой разложение полного уравнения состояния в окрестностях упомянутого постоянного члена суммы [62].

В настоящее время используется Международное уравнение состояния морской воды, принятое в 1980 г. Плотность морской воды при атмосферном давлении определяется по формуле:

$$\rho_{ST} = \rho_w + (b_0 + b_1 \cdot T + b_2 \cdot T^2 + b_3 \cdot T^3 + b_4 \cdot T^4)S + (c_0 + c_1 \cdot T + c_2 \cdot T^2)S^{3/2} + d_0S^2, \quad (1.23)$$

где  $\rho_w$  – плотность пресной воды, кг/м<sup>3</sup>;  $b_0=8,24493 \cdot 10^{-1}$ ;  $b_1=4,0899 \cdot 10^{-3}$ ;  $b_2=7,6438 \cdot 10^{-5}$ ;  $b_3=8,2467 \cdot 10^{-7}$ ;  $b_4=5,3875 \cdot 10^{-9}$ ;  $c_0=-5,72466 \cdot 10^{-3}$ ;  $c_1=1,0227 \cdot 10^{-4}$ ;  $c_2=-1,6546 \cdot 10^{-6}$ ;  $d_0=4,8314 \cdot 10^{-4}$ .

В связи с тем, что морская вода является раствором различных солей, то свойства этих вод отличается от свойств пресной воды (рисунок 1.8). Удельная теплоемкость морской воды уменьшается с увеличением, как солености, так и давления. В первом случае увеличивается доля солей, обладающих меньшей теплоемкостью, за счет чего уменьшается и суммарная теплоемкость. Средняя удельная теплоемкость морской воды, полученная при постоянном давлении, среднем значении солености равна 3987 Дж/(кг·К).

При выполнении инженерных расчетов можно обратиться к приближенным формулам для определения теплофизических свойств морской воды. Данные формулы справедливы в диапазоне температур от 273 до 373 К.

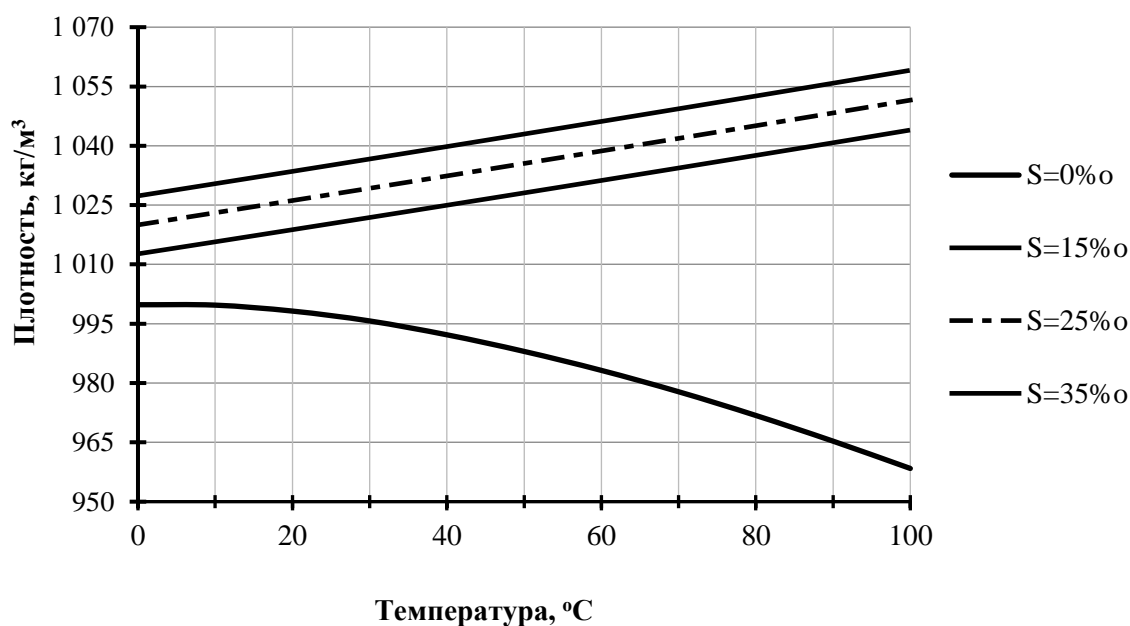


Рисунок 1.8. Зависимость плотности морской воды в от температуры и солености

Изобарную теплоемкость можно определить по формуле:

$$C_p = (4194 - 1,115(T - 273) + 0,015(T - 273)^2) (0,987 - 0,0013(S - 10)), (1.24)$$

Влияние химического состава на теплоемкость столь же мало, как и на плотность (рисунок 1.9).

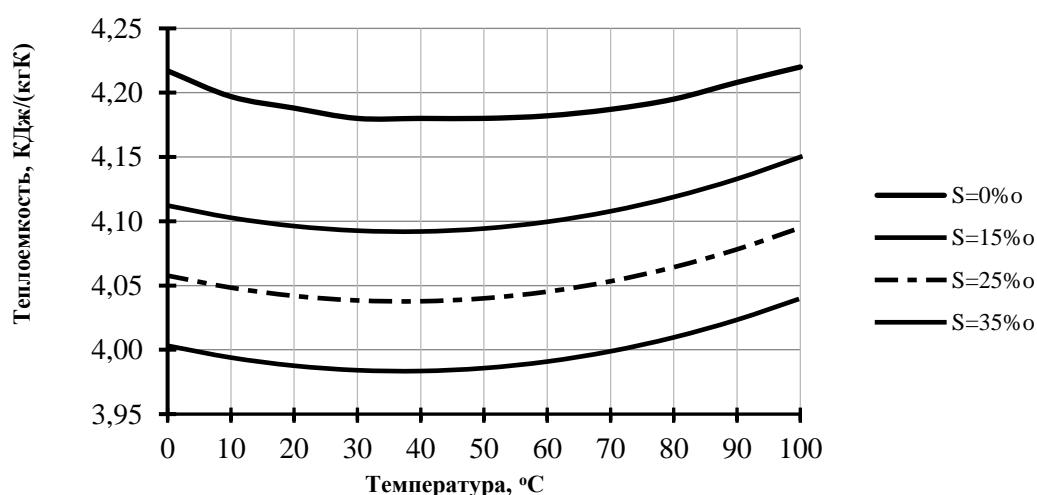


Рисунок 1.9. Зависимость теплоемкости морской воды в от температуры и солености

Коэффициент теплопроводности морской воды при повышении температуры увеличивается, а с увеличением солености уменьшается.



$$\lambda=0,553 \cdot (1+0,003(T - 273)), \quad (1.25)$$

Наиболее в простой форме уравнение для определения плотности имеет вид:

$$\rho = \frac{1009+0,733(S - 10)}{1 - 3 \cdot 10^{-4}(T - 283)}, \quad (1.26)$$

Вязкость морской воды увеличивается с повышением солёности и резко уменьшается с повышением температуры.

$$\nu = \left( 0,602+0,0009(S - 10) \left( \frac{50}{T-273} \right)^{0,56} \right) \cdot 10^{-6}. \quad (1.27)$$

Температуропроводность морской воды:

$$a=1,32 \cdot 10^{-7} (1+0,003 \cdot (T - 273)) \quad (1.28)$$

### **Выводы по первой главе**

1. Основным способом преодоления дефицита пресных водных ресурсов является опреснение морских и солоноватых вод. Большинство действующих опреснительных систем основано на технологии обратного осмоса и дистилляции.

2. В силу своих преимуществ гигроскопический метод опреснения является перспективным и конкурентноспособным по отношению к дистилляционному и обратноосмотическому методам опреснения.

3. Вопросы повышения эффективности опреснительных установок гигроскопического типа, в том числе путем включения в цикл их работы трансформаторов тепла являются малоизученными.

4. При математическом моделировании и расчете циклов опреснительных установок гигроскопического типа особое внимание следует уделять особенностям свойств рабочих веществ. Морскую воду при расчете циклов работы опреснительных установок можно рассматривать как раствор натрия хлорида. Кроме этого, следует провести оценку применимости законов идеальных газов применительно к паровоздушной смеси для водяных паров,

входящих в состав паровоздушной смеси, при расчете циклов работы гигроскопических опреснительных установок.

### **Постановка цели и задач исследования**

Проведенный анализ опубликованных данных позволяет сформулировать цель и задачи работы. Целью работы является повышение эффективности опреснительных установок гигроскопического типа путем разработки и научного обоснования режимных и схемных мероприятий. Для достижения поставленной цели должны быть решены 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 влагой;

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.

## **ГЛАВА 2. НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПРЕСНИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА**

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

### **2.1. Тепломассообмен в опреснительных установках гигроскопического типа**

Опреснение воды гигроскопическим методом включает в себя 2 основных процесса: насыщение воздушного потока и его осушку.

Насыщение воздушного потока происходит в процессе сопряженного тепломассообмена с опресняемой водой.

Движущей силой переноса явной теплоты является наличие разности температур воздушного потока и опресняемой воды, а переноса влаги – разность парциальных давлений водяных паров на поверхности каждой из фаз. Данные процессы являются сопряженными и оказывают взаимное влияние друг на друга.

Процесс насыщения воздуха протекает в контактных аппаратах, где взаимодействуют ненасыщенный воздух и опресняемая вода, в частности, эффективность этих процессов зависит от площади соприкосновения жидкости и воздуха.

Основные способы создания поверхности соприкосновения жидкости с газом и, соответственно, принципиальные устройства аппаратов можно разделить на 4 класса [63]:

а) распределение жидкости в виде тонкой пленки на поверхности насадочных тел, заполняющих рабочий объем аппарата (насадочные башни или колонны). Для расчетов величину площади соприкосновения принимают равной всей поверхности насадки, покрытой пленками жидкости. Фактическая поверхность при больших скоростях газового потока и значительных плотностях орошения существенная. Однако при малых скоростях смачивается не вся поверхность насадки;

б) диспергирование, то есть разбрызгивание распыление жидкости пневматическим или механическим способом в объеме или потоке газа, проходящего через полый аппарат. Величина площади равна поверхности всех капель. Такие установки работают интенсивнее насадочных, но они менее устойчивы в работе и применяются реже, чем насадочные из-за трудности создания постоянного тонкого распыления жидкости;

в) диспергирование газа в объеме жидкости путем барботажа, то есть пропускание пузырьков через слой жидкости в колоннах с ситчатыми (решетчатыми) или колпачковыми полками (тарелками). Величина площади равна поверхности всех пузырьков. В рассматриваемом случае наряду со значительным развитием суммарной поверхности контакта фаз обеспечивается и интенсивная турбулизация жидкости;

г) создание взвешенного (кипящего) слоя подвижной пены при пропускании газа снизу вверх через решетку пенного аппарата и находящуюся на ней жидкость с такой скоростью, при которой силы трения газа о жидкость уравновешивают массу последней. В пенных аппаратах достигается большая из всех четырех типов поверхность соприкосновения газа с жидкостью. Вследствие сильного перемешивания фаз и непрерывного обновления поверхности жидкости устраняются диффузионные сопротивления и возрастает коэффициент массопередачи. В реактивном пространстве пенных аппаратов во

взвешенном состоянии находятся значительные массы жидкости, поэтому они имеют повышенное гидравлическое сопротивление.

В существующих конструкциях гигроскопических опреснительных установок воздушный поток взаимодействует с пленкой жидкости или распыляемыми каплями воды. Подобная организация тепломассообменных процессов происходит при меньшей поверхности контакта фаз, что приводит к увеличению рабочей поверхности контактного аппарата.

Диспергирование газов с образованием пузырьков в сплошной жидкой фазе проводят с целью увеличения поверхности контакта фаз. В результате диспергирования интенсифицируются тепломассообменные процессы в гигроскопических опреснителях. Данные процессы сопровождаются спонтанной межфазной конвекцией. Важнейшими технологическими показателями процессов диспергирования газов являются размер, частота образования (концентрация) и закономерности движения пузырьков.

Спонтанная межфазная конвекция, возникающая в результате гидродинамической неустойчивости границы раздела фаз при межфазном переносе вещества, изменяет поверхностное натяжение и может существенно интенсифицировать массопередачу.

## **2.2. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения опреснительных установок**

Поскольку гигроскопический метод относится к первой группе методов опреснения (процесс получения пресной воды связан с изменением агрегатного состояния), то для его осуществления необходимо подводить тепловую энергию, а для перемещения воздушных масс – электрическую. Одним из вариантов энергообеспечения данных процессов является использование возобновляемых источников энергии. Для процессов опреснения различного принципа действия (электродиализ (ЭД), обратный осмос (ОО), дистилляции с механическим сжатием пара (МПД), многоступенчатая дистилляция (МСД), гигроскопическое опреснение (Г), высокоэффективная дистилляция (ВЭД), дистилляция,

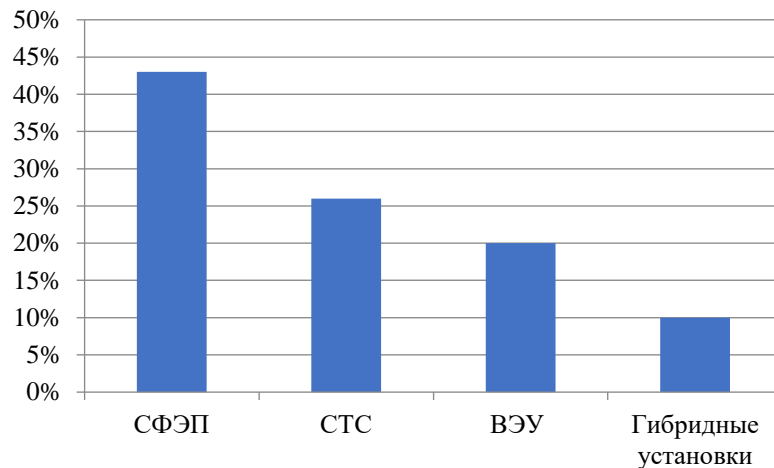
основанная на тепловом сжатии пара (ТПД), мембранная дистилляция (МД)) широко используются энергия ветра и солнца (рисунок 2.1) [64-72].

Использование этих источников определяется соответствующим потенциалом солнечной или ветровой энергии на местности. На диаграмме (рисунок 2.2) изображено распределение различных технологий, функционирующих на базе возобновляемых источников энергии, участвующих в процессе опреснения.



**Рисунок 2.1. Возможные технологические комбинации основных ВИЭ и методов опреснения воды**

Статистические данные, представленные на диаграмме, свидетельствуют о том, что солнечная энергия используется наиболее часто, ее применяют как для получения тепловой энергии (СТС – системы солнечного тепло-снабжения), так и для получения электричества (СФЭП – солнечные фото-электрические преобразователи) [73-76]. Ветровые энергетические установки получили меньшее распространение. Поскольку дефицит воды испытывают в основном южные страны, то наиболее целесообразным является использование солнечной энергии в качестве источника тепло- и электроснабжения.



**Рисунок 2.2. Использование возобновляемых источников энергии при опреснении**

Обоснование оптимальных конфигураций автономных энергоустановок, состава и конструкции комплектующего оборудования должно осуществляться с учетом реальных климатических условий эксплуатации.

### **2.3. Включение трансформаторов тепла в цикл работы гигроскопических опреснительных установок**

#### **2.3.1. Гигроскопические опреснительные установки**

##### ***на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем***

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. Один из вариантов включения трансформатора тепла в схему работы установки приведен на рисунке 2.3 [115].

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.

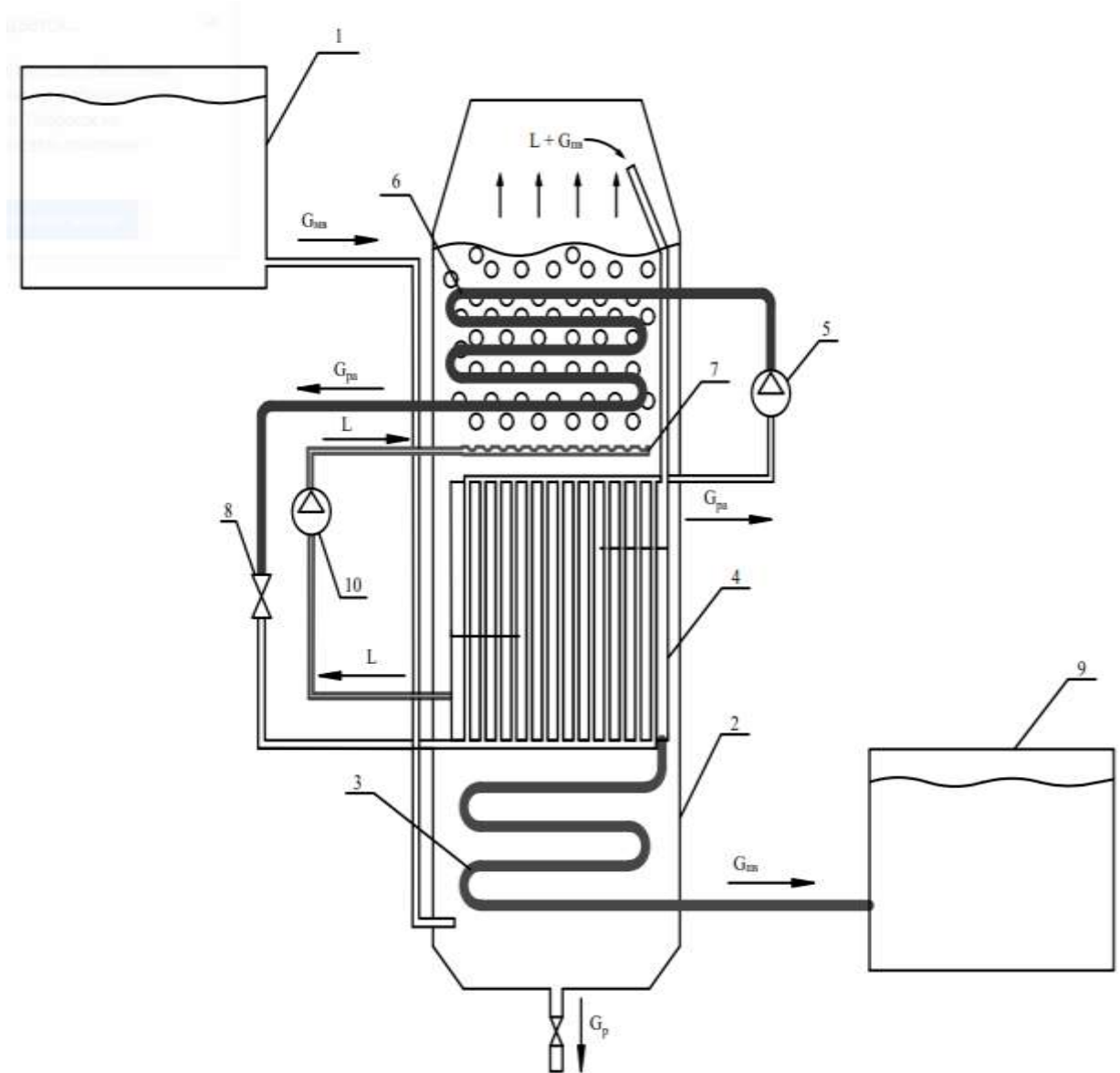


Рисунок 2.3. Принципиальная схема гигроскопической опреснительной установки на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем: 1 – емкость исходной воды; 2 – реактор опреснительной установки; 3 – змеевик; 4 – испаритель; 5 – компрессор; 6 – конденсатор; 7 – газораспределительная решетка; 8 – дроссельное устройство; 9 – емкость пресной; 10 – нагнетательное устройство;  $G_{\text{пр}}$  – поток пресной воды;  $L$  – поток осушенного воздуха;  $G_{\text{пр}}$  – поток пресной воды;  $G_{\text{р}}$  – поток рассола;  $G_{\text{ра}}$  – поток рабочего агента



В результате тепломассообмена между нагретой соленой водой и воздушным потоком, воздух насыщается. Полученная паровоздушная смесь 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 в результате теплообмена с исходной соленой водой, и из реактора установки отводится в емкость пресной воды 9, осушенный воздух нагнетательным устройством 10 вновь подается в газораспределительную решетку 7. Вода с повышенным содержанием солей под действием гравитации поступает в нижнюю часть реактора 2 и выводится из него в виде рассола.

Процесс деминерализация воды гигроскопическим методом требует нагрева входящего потока (опресняемой воды), и охлаждения выходящих (пресной воды), соответственно, целесообразно осуществлять эти процессы совместно. Таким образом можно обеспечить, рациональное использование отходящих потоков, формирующихся на различных стадиях процесса, для осуществления последующих. В рассматриваемой установке регенерация энергии осуществляется за счет теплообмена между пресной водой, поступающей из испарителя трансформатора тепла, и исходной водой, поступающей в испарительную камеру опреснительной установки.

В результате тепломассообменных процессов, протекающих при контакте воздушного потока и опресняемой воды, происходит насыщение воздуха влагой. Параметры контактирующих сред определяют направление потока массы, представленного влагой, и теплового потока, данные процессы протекают от более высокого потенциала к более низкому.

Процессы взаимодействия воздушного потока и воды в  $h-d$  диаграмме влажного воздуха изображаются лучами, лежащими в пределах криволинейного треугольника  $1B_5$  (рисунок 2.4), у которого одной стороной является кривая насыщения  $\varphi = 100 \%$ , а двумя другими – касательные к этой кривой, проведенные из точки начального состояния поступающего воздуха [58].

При контакте воздушного потока и воды, температура которой ниже температуры точки росы, воздуха, поступающего в контактный аппарат, происходит его осушка.

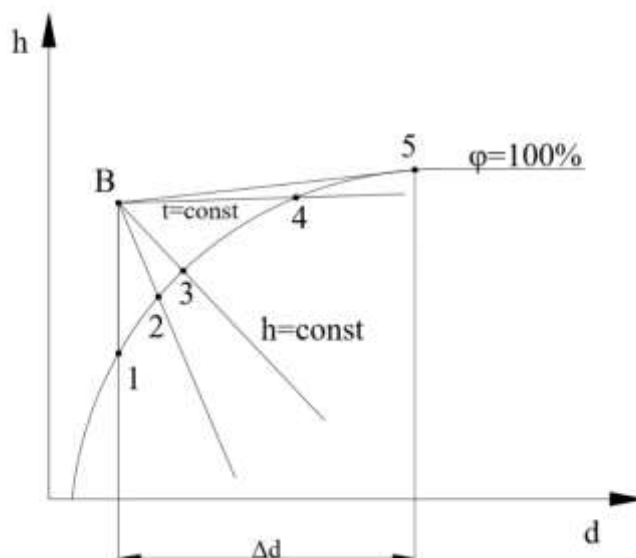


Рисунок 2.4. Процессы насыщения воздуха в  $h-d$  диаграмме

Граничный (переходный) тонкий слой между водой и воздухом состоит из молекул воды и воздуха. В результате их перемешивания в этом тонком слое образуется насыщенный парами воды воздух, а его температура равна температуре воды. Состояние воздуха в этом слое можно определить по температуре воды, считая его относительную влажность  $\varphi$  равной 100 %. Поэтому процесс тепло- и влагообмена воздухом и водой можно рассматривать в  $h-d$  диаграмме как процесс смешения воздуха данного состояния с насыщенным воздухом при температуре воды [58].

Для того, чтобы в результате взаимодействия воздушного потока и воды происходило его увлажнение, необходимо, чтобы температура воды была больше температуры точки росы. Процесс B-2 соответствует насыщению воздуха при температуре воды выше температуры точки росы, но меньше температуры по смоченному термометру  $t_m$ , при этом он сопровождается охлаждением. Все эти процессы сопровождаются увеличением влажности. Возможны следующие варианты насыщения воздуха[58]:

- адиабатное насыщение воздушного потока;

Адиабатному увлажнению соответствует процесс В-3, который протекает при постоянной энтальпии и температуре воды, равной температуре воздуха по смоченному термометру. Скрытая теплота уносится с влагой в виде пара и передается воздуху в том же количестве, так что энтальпия на процессе без подвода и отвода тепла извне остается неизменной.

– изотермическое насыщение воздушного потока;

В данном случае температура воды, вступающей в контакт с воздухом, равна температуре воздуха, процесс сопровождается увеличением энтальпии, более значительным возрастанием влагосодержания. Процесс требует подвода теплоты.

– политропическое насыщение воздушного потока с затратами теплоты.

Наиболее интенсивный рост влагосодержания наблюдается в процессах, в которых температура воды существенно превышает температуру воздуха.

Одним из самых распространенных методов осушки является конденсационный. С экономической точки зрения конденсационное осушение для гигроскопических опреснительных установок является более эффективным по сравнению с большинством предлагаемых альтернативных вариантов, так как отводимая теплота может быть использована для нагрева поступающей в установку морской воды.

Процесс осушения воздуха, может происходить в результате контактного взаимодействия воздуха и воды, и в результате его охлаждения ниже температуры точки росы в рекуперативных теплообменниках. В первом случае выпадение влаги обусловлено непосредственным контактом водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, и охлаждающей воды, при этом осуществляются процессы сопряженного тепломассообмена. А во втором выпадение влаги обусловлено охлаждением, осуществляющимся в результате теплообмена через непроницаемую стенку.

Установка работает в соответствии с предложенным оригинальным циклом, представленном на рисунке 2.5

Цикл включает в себя процесс насыщения воздушного потока (1-2), процесс осушки ПВС (2-3), протекающей в рекуперативном теплообменном аппарате, а также процесс повышения давления паровоздушной смеси в нагнетателе (1-3).

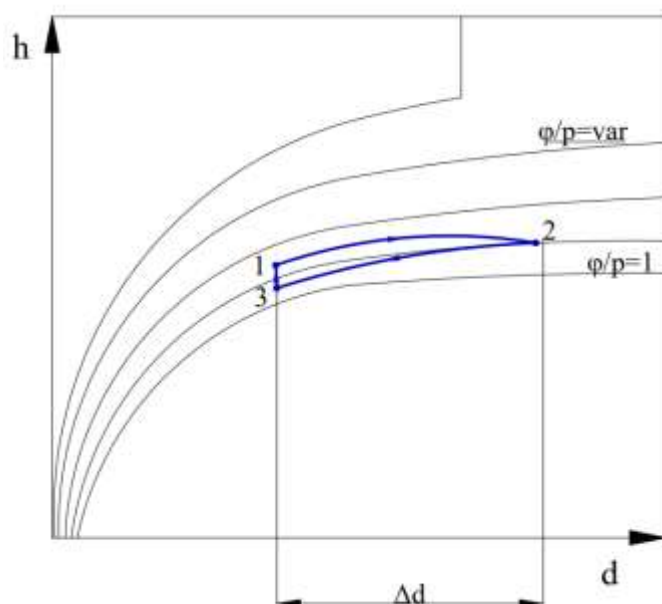


Рисунок 2.5. Цикл работы гигроскопической опреснительной установки:

1-2 – насыщение воздушного потока влагой; 2-3 – осушка ПВС; 3-1 – повышение давления в нагнетательном устройстве

### 2.3.1.1. Тепловой и материальный баланс гигроскопических опреснительных установок на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем

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 при этом уравнениями материального баланса. Основными способами выражения составов фаз, актуальными при рассмотрении процессов массообмена, являются концентрации и доли компонента.

Соответственно материальный баланс установки по морской воде имеет вид:

$$G_{\text{МВ}} = G_{\text{ПВ}} + G_{\text{р}}, \quad (2.1)$$

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:

$$G_{\text{МВ}} = \frac{S}{S''} \cdot G_{\text{МВ}} + \left(1 - \frac{S}{S''}\right) \cdot G_{\text{МВ}}, \quad (2.2)$$

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

Количество полученного дистиллята соответствует количеству испаренной в результате барботирования жидкости, и его можно определить по формуле:

$$G_{\text{ПВ}} = W = \beta_d \cdot F \cdot \frac{d_{\text{н}} - d_{\text{в}}}{1000}, \quad (2.3)$$

где  $\beta_d$  – коэффициент влагоотдачи, отнесенный к разности влагосодержаний, кг/(м<sup>2</sup> · с(г/кг));  $d_{\text{н}}$  – влагосодержание воздуха в пограничном слое жидкости при температуре ее поверхности, г/кг с.в.;  $d_{\text{в}}$  – влагосодержание воздуха перед барботажным устройством, г/кг с.в.;  $F$  – площадь влагообмена, м<sup>2</sup>.

Материальный баланс по соли:

$$\frac{G_{\text{МВ}} \cdot S}{1000} = \frac{G_{\text{ПВ}} \cdot S'}{1000} + \frac{G_{\text{р}} \cdot S''}{1000}, \quad (2.4)$$

где  $S'$  – заданная соленость пресной воды, ‰.

В соответствии с данной схемой количество тепловой энергии, отводимое в конденсаторе трансформатора тепла расходуется на процесс нагрева воды до требуемой температуры, и последующее ее испарение, компенсацию тепловых потерь. Уравнение теплового баланса рассматриваемой установки имеет вид:

$$L \cdot (h'_{\text{ПВС}} - h''_{\text{ПВС}}) + N = G_{\text{МВ}} \cdot c_{\text{рМВ}} \cdot (t'_{\text{МВ}} - t''_{\text{МВ}}) + L \cdot (h''_{\text{ПВС}} - h'_{\text{ПВС}}) + G_{\text{МВ}} \cdot c_{\text{рП}} \frac{S}{S''} \cdot t_{\text{р}} + G_{\text{ПВ}} \cdot t_{\text{ПВ}} \cdot c_{\text{рПВ}}, \quad (2.5)$$

где  $L$  – массовый расход сухого воздуха, кг/с;  $h'_{\text{ПВС}}$  – энтальпия ПВС на входе в испаритель трансформатора тепла (на выходе из барботажного устройства), кДж/кг с.в.;  $h''_{\text{ПВС}}$  – энтальпия ПВС на выходе из испарителя (на входе в барботажное устройство) кДж/кг с.в.;  $N$  – мощность компрессора трансформатора тепла, кВт;  $c_{\text{рМВ}}$ ,  $c_{\text{рПВ}}$ ,  $c_{\text{рП}}$  – 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;  $t_{\text{ПВ}}$  – температура пресной воды, °С.

С учетом того, что мощность, потребляемая компрессором связана с коэффициентом трансформации и нагрузкой на испаритель трансформатора тепла следующим образом:

$$N = \frac{Q_0}{k-1} = \frac{L \cdot (h'_{\text{ПВС}} - h''_{\text{ПВС}})}{k-1}, \quad (2.6)$$

где  $Q_0$  – нагрузка на испаритель трансформатора тепла, кВт;  $k$  – коэффициент трансформации.

А расход сухого воздуха, циркулирующего в установке, связан с количеством получаемой пресной воды через вылагодержания:

$$L = \frac{G_{\text{ПВ}}}{d_{\text{Н}} - d_{\text{В}}} = \frac{G_{\text{МВ}} \cdot \left(1 - \frac{S}{S''}\right)}{d_{\text{Н}} - d_{\text{В}}}, \quad (2.7)$$

Получим:

$$\frac{G_{\text{MB}} \cdot \left(1 - \frac{S}{S''}\right) \cdot (h'_{\text{ПВС}} - h''_{\text{ПВС}})}{d_{\text{H}} - d_{\text{B}}} \cdot (k-1) = G_{\text{MB}} \cdot c_{\text{рмв}} \cdot (t'_{\text{MB}} - t''_{\text{MB}}) + G_{\text{MB}} \cdot c_{\text{pp}} \frac{S}{S''} \cdot t_{\text{p}} +$$

$$+ G_{\text{MB}} \cdot \left(1 - \frac{S}{S''}\right) \cdot c_{\text{рпв}} \cdot t_{\text{пв}}$$

Разделив левую и правую части уравнения на  $G_{\text{MB}}$  получим уравнение теплового баланса в расчете кДж/кг:

$$\frac{\left(1 - \frac{S}{S''}\right) \cdot (h'_{\text{ПВС}} - h''_{\text{ПВС}})}{d_{\text{H}} - d_{\text{B}}} \cdot (k-1) = c_{\text{рмв}} \cdot (t'_{\text{MB}} - t''_{\text{MB}}) + c_{\text{pp}} \frac{S}{S''} \cdot t_{\text{p}} + \left(1 - \frac{S}{S''}\right) \cdot c_{\text{рпв}} \cdot t_{\text{пв}} \quad (2.8)$$

В том случае, когда влажный воздух представляет собой смесь сухого насыщенного пара ( $\varphi=100\%$ ) и сухого воздуха при температуре насыщения, соответствующей общему давлению смеси, пространство будет заполнено сухим насыщенным паром. Если при принятом давлении смеси повышать температуру выше температуры, соответствующей этому давлению, то максимально возможное давление водяного пара будет оставаться одинаковым и равным  $p_{\text{см}}$ , в то время как давление насыщения, соответствующее температуре воздуха будет расти. В этом случае рассматриваемое пространство будет заполнено только перегретым паром, при этом  $\varphi=100\%$ .

В случае работы гигроскопических опреснительных установок при температуре насыщения, соответствующей заданному давлению и солёности, воздушный поток интенсифицирует процесс кипения опресняемой воды, пузырьки воздуха выполняют функцию центров парообразования.

### 2.3.1.2. Особенности расчета циклов опреснительных установок гигроскопического типа

При выполнении расчетов 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 и определяется по выражению:

$$P_{\text{п}} = P_{\text{п}}^0 \cdot x, \quad (2.9)$$

где  $P_{\text{п}}^0$  – давление насыщенного пара над пресной водой, кПа;  $x$  – молярная доля пресной воды в растворе.

Данное обстоятельство позволяет учесть тот факт, что воздушный поток взаимодействует не с чистой водой, а с водным раствором. При этом в силу того, что в морской воде из всех солей преобладает хлорид натрия, то под соленостью понимается концентрация NaCl в морской воде. 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 иона  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ . В этом случае молярная доля воды рассчитывается следующим образом:

$$x = \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}/\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{H}_2\text{O}}/\mu_{\text{H}_2\text{O}} + (m_{\text{NaCl}}/\mu_{\text{NaCl}})_{\text{Cl}} + (m_{\text{NaCl}}/\mu_{\text{NaCl}})_{\text{Na}} + \sum (m_i/\mu_i)_i} = \frac{(1000 - S)/\mu_{\text{H}_2\text{O}}}{(1000 - S)/\mu_{\text{H}_2\text{O}} + (S/\mu_{\text{NaCl}})_{\text{Cl}} + (S/\mu_{\text{NaCl}})_{\text{Na}} + \sum (m_i/\mu_i)_i}, \quad (2.10)$$

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

На рисунке 2.6 приведена зависимость равновесной концентрации водяного пара над поверхностью морской воды (рассола) в зависимости от ее солености. За предельную соленость в данном случае принимается насыщенный раствор морской соли, с концентрация хлорида натрия 260‰.

В соответствии с данным графиком отклонение равновесной концентрации водяных паров в ПВС над морской водой существенно увеличивается



с повышением температуры. Соответственно в ходе расчетов насыщения воздушного потока следует учитывать соленость морской воды. Если не учитывать поправку (2.10), то при условии предельного упаривания морской воды с доведением концентрации солей в рассоле до 260 г/л погрешность при выполнении расчетов циклов опреснительных установок гигроскопического типа может достигать 15%. Увеличение солености исходной воды непосредственно приводит к увеличению затрат энергии на ее опреснение.

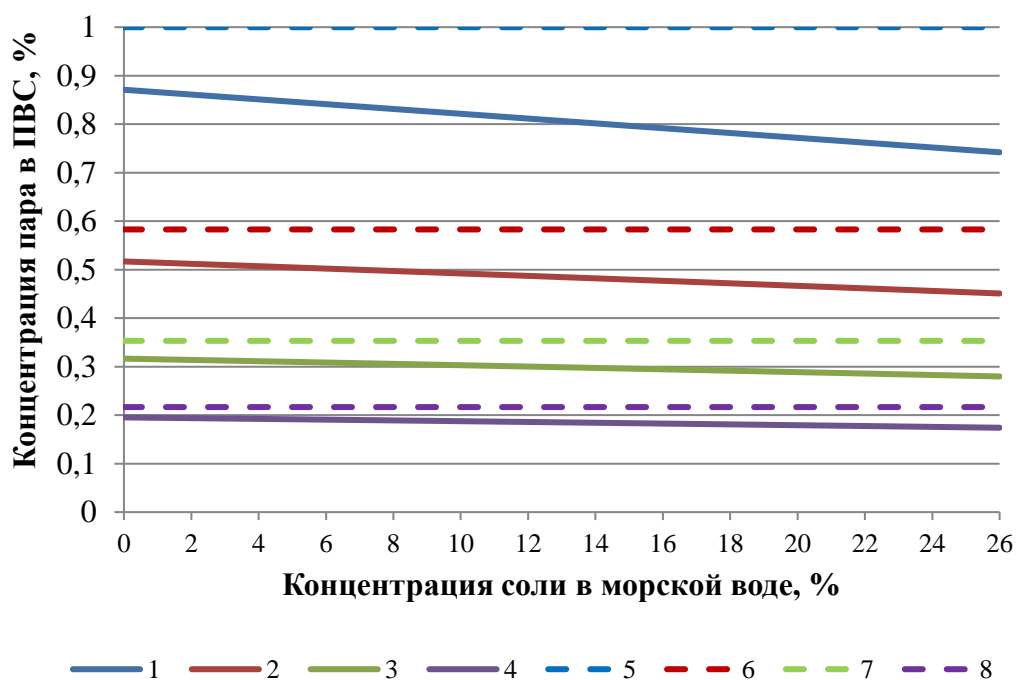


Рисунок 2.6. Влияние концентрации солей в исходной опресняемой воде и рассоле на концентрацию пара в ПВС:

1 – Концентрация пара в ПВС при температуре морской воды в зоне барботажа 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 – 80 °С;

### 2.3.1.3. Оценка эффективности работы опреснительных установок гигроскопического типа на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем

Процесс опреснения в гигроскопических установках может осуществляться при относительно невысоких температурах испарения. Воздушный поток способен насыщаться влагой при различных температурах, с ее увеличением предельное количество влаги, которое может содержаться в нем,

увеличивается. Соответственно, снижение температуры испарения приводит к тому, что для получения одного и того же количества пресной воды в опреснительных установках при различных температурных уровнях необходимо перемещать различное количество воздуха, что непосредственно влияет на суммарные затраты энергии на процесс опреснения. Руководствуясь данными обстоятельствами было установлено, что целесообразным является режим работы установок с температурой испарения не менее 70 °С. В свою очередь работа установок при относительно невысоких температурах испарения позволяет снизить интенсивность процесса накипеобразования.

В качестве энергоносителя трансформатора тепла для условий работы гигроскопических опреснительных установок следует рассматривать вещества с относительно высокими рабочими температурами, минимальными удельными затратами энергии на сжатие при исследуемых параметрах работы установки. В соответствии с данными, приведенными в [77] этим требованиям соответствуют рабочие агенты: R717, R22, R11, R12, R21 и вода. Наиболее безопасным является использование воды в качестве рабочего агента.

На рисунке 2.7 представлены зависимости коэффициентов трансформации и потребляемой энергии в зависимости от температуры испарения и конденсации для производства 1 м<sup>3</sup> пресной воды с начальной соленостью 35‰.

Расчет цикла работы трансформатора тепла выполнен в соответствии с методикой, приведенной в [78].

В связи с тем, что с увеличением высоты теплоподъема (разница между температурами конденсации и кипения рабочего агента в цикле работы парокompрессионного трансформатора тепла) коэффициент трансформации трансформаторов тепла снижается [79], выбор температурных уровней работы испарителя и конденсатора должен осуществляться с учетом данного обстоятельства.

Исходя из представленных данных следует, что при использовании воды в качестве рабочего тела трансформатора тепла при одинаковой высоте теплоподъема количество теплоты, потребляемой для производства м<sup>3</sup> пресной

воды, как и коэффициент трансформации для различных температурных уровней различаются незначительно. Ключевым отличием являются в работе установки затраты на перемещение паровоздушной смеси, так как для получения  $\text{м}^3$  пресной воды при различных температурах насыщения и осушки, расход перемещаемого воздушного потока для данных условий варьируется от 0,1 до 4 кг/с.

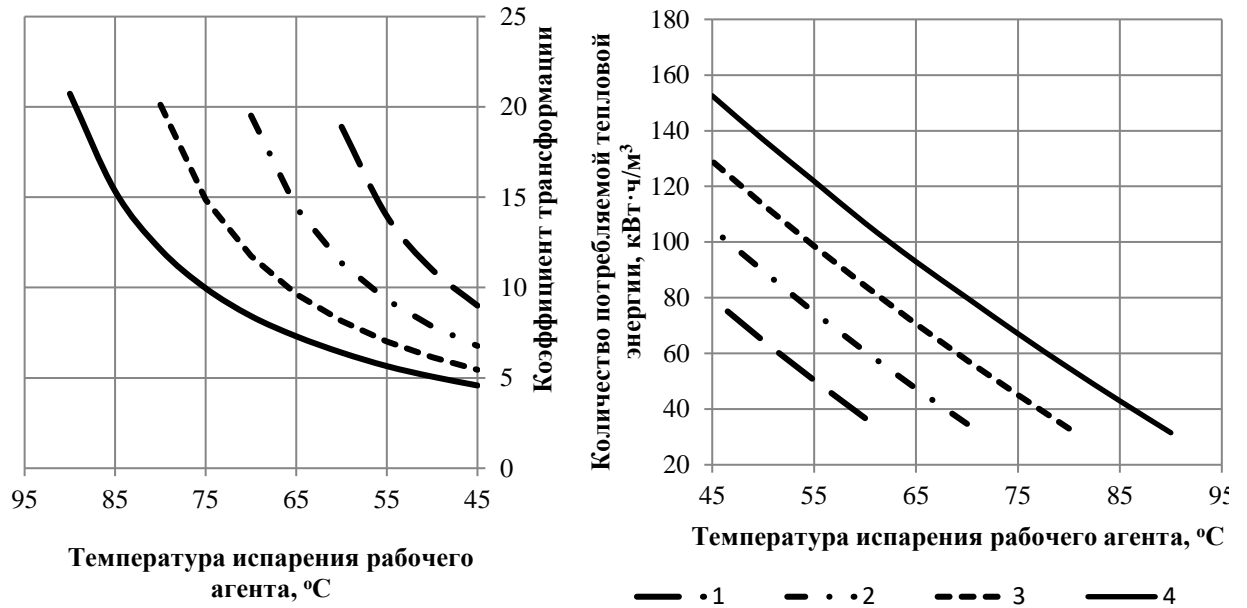


Рисунок 2.7. Зависимость коэффициента трансформации и потребляемой мощности для производства  $\text{м}^3$  пресной воды от параметров работы испарителя и конденсатора трансформатора тепла:

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

Кроме того, что при более низких температурах конденсации и испарении расход паровоздушной смеси значительно больше, чем при температурах, близких к температуре насыщения, доля воздуха, входящего в состав насыщенной паровоздушной смеси, поступающей для осушки, существенно увеличивается с уменьшением температуры, что в последствии приводит к снижению коэффициента теплоотдачи, вызванного Стефановым потоком.

Зависимость содержания сухого воздуха в насыщенной паровоздушной смеси от температуры приведена на рисунке 2.8. Процесс осушки ПВС достаточно часто встречается в различных технических процесса (в системах

вентиляции, кондиционирования, пневматических установках), особенности данного процесса приведены в работах [80-85].

В соответствии со всем вышеизложенным предпочтительнее является работа гигроскопических опреснительных установок при более высоких температурных уровнях.

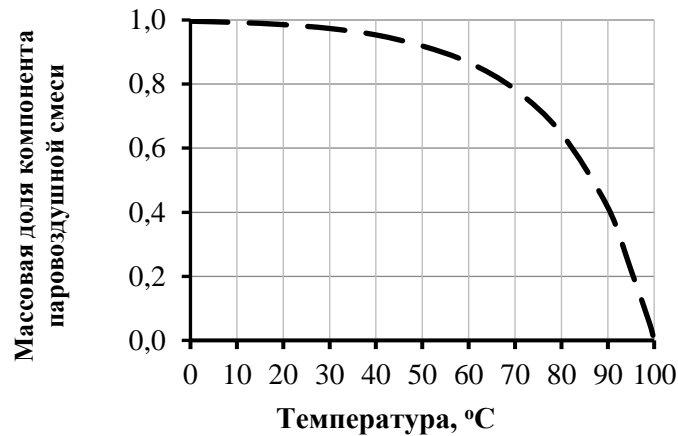


Рисунок 2.8. Зависимость содержания сухого воздуха в насыщенной паровоздушной смеси от температуры

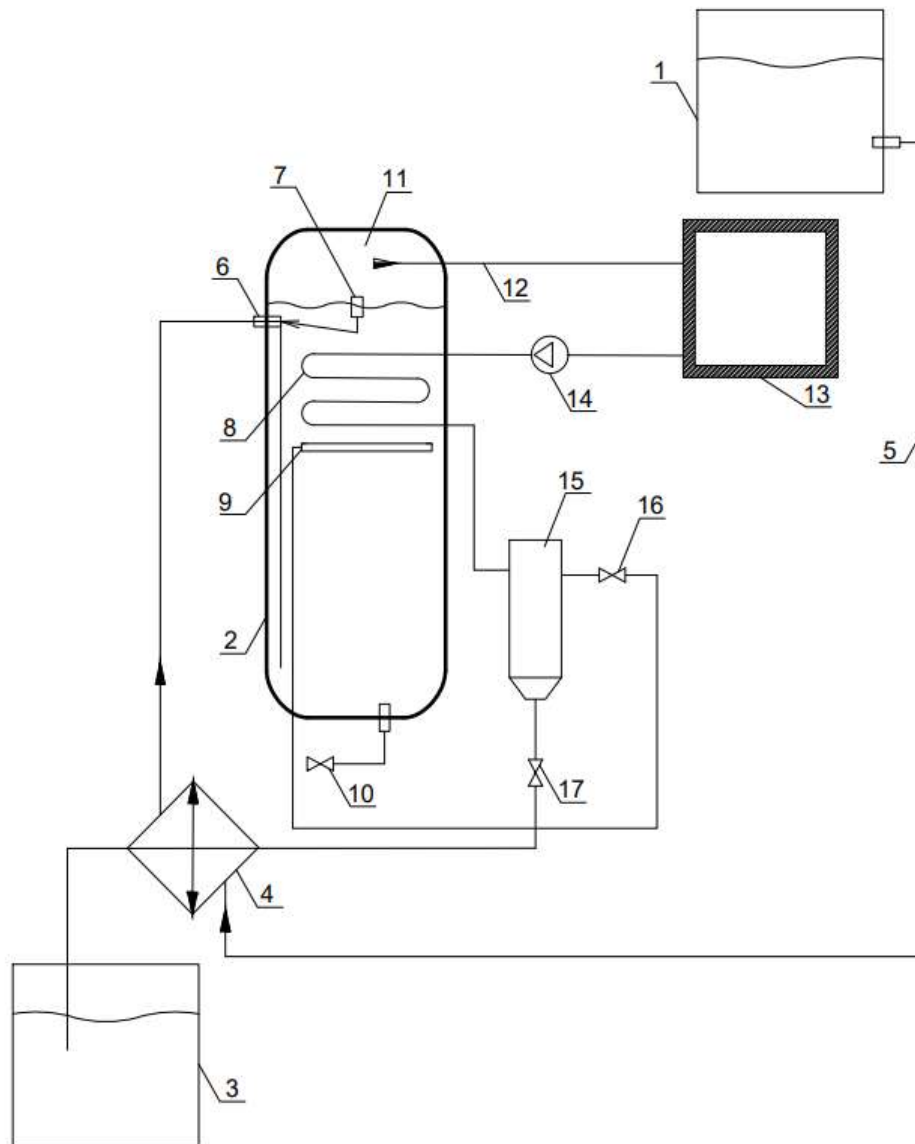
Включение трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем в цикл работы опреснительных установок гигроскопического типа позволяет обеспечить раздельное протекание процессов насыщения воздушного потока влагой и его осушки, испаритель трансформатора тепла выполнять выносным. Данные обстоятельства позволяют использовать это техническое решение, в том числе с глубокой осушкой паровоздушной смеси и реализации разомкнутых циклов в случае наличия в опресняемой воде вредных примесей, уносимых с воздухом в ходе опреснения.

### 2.3.2. Гигроскопическая опреснительная установка с компрессией ПВС

Другим вариантом включения трансформатора тепла в цикл работы установки является использование ПВС в качестве рабочего агента [114]. Принципиальная схема данного решения приведена на рисунке 2.9.

Представленная установка работает следующим образом. Испарительная камера 2 заполняется исходной жидкостью 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.



**Рисунок 2.9. 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; 9 – барботажное устройство; 10 – сливное устройство; 11 – зона паровоздушной смеси; 12 – труба паровоздушной смеси; 13 – солнечный коллектор; 14 – компрессор; 15 – сепаратор; 16 – регулирующий клапан; 17 – сливное устройство.

Паровоздушная смесь из зоны паровоздушной смеси 11 по трубе для паровоздушной смеси 12 поступает в солнечный коллектор 13, где нагревается. 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 зоне нагрева (в зоне размещения нагревательного элемента 8 и над ним) до температуры, близкой температуре кипения. В сепараторе 15 происходит разделение паровоздушной смеси на ненасыщенный воздух и опресненную воду. Ненасыщенный воздух из сепаратора 15 через регулирующий 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 в теплообменник 4, где нагревает опресняемую воду, поступающую из емкости опресняемой воды 1, а затем отправляется в емкость-сборник пресной воды 3. Вода с повышенным содержанием из зоны нагрева за счет большей плотности опускается ко дну испарительной камеры 2. Удаление рассола осуществляется через кран слива рассола 10. При снижении уровня воды в испарительной камере 2 по сигналу датчика уровня воды 7 открывает клапан 6 и исходная опресняемая вода из емкости опресняемой воды 1, подогретая в теплообменнике 4, по переливной трубе 5 поступает в нижнюю часть испарительной камеры 2. Поскольку исходная опресняемая вода имеет меньшую плотность, чем рассол, то она естественным образом будет поступать в зону нагрева.

Построение процесса повышения влажности воздуха наиболее удобно осуществлять в  $h-d$  диаграмме В.И. Прохорова. В процессе нагнетания влажного воздуха параметры воздуха будут изменяться, так же меняется и его температура. В соответствии с уравнением состояния произойдет следующее изменение его влажности:

$$\varphi_2 = \varphi_1 \frac{p_{н1}}{p_{н2}} \cdot \frac{p_2}{p_1}, \quad (2.11)$$

где  $\varphi_1$  – начальная влажность воздуха, %;  $p_{н1}, p_{н2}$  – давление насыщения влажного воздуха в начале и конце процесса соответственно, Па;  $p_1, p_2$  – начальное и конечное давление влажного воздуха, Па.

Установка работает в соответствии с предложенным оригинальным циклом, представленном на рисунке 2.10 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.

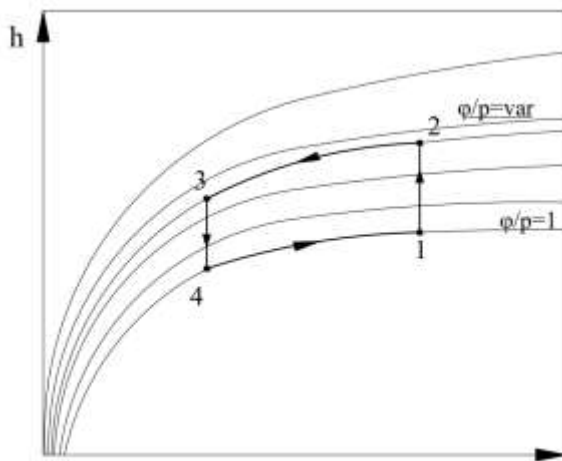


Рисунок 2.10. Цикл работы гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС: 1-2 – процесс предварительного подогрева и сжатия ПВС; 2-3 – осушка ПВС; 3-4 – процесс понижения давления в регулирующем клапане; 4-1 – насыщение ПВС

Тепловой баланс опреснительной установки гигроскопического типа с компрессией ПВС имеет вид:

$$\begin{aligned} & (L + G_{пв}) \cdot (h''_{ск} - h'_{ск}) + (L + G_{пв}) \cdot (h''_к - h'_к) = \\ & = G_{мв} \cdot c_{рмв} \cdot (t'_{мв} - t''_{мв}) + G_{мв} \cdot c_{рр} \frac{S}{S''} \cdot t_p + G_{пв} \cdot t_{пв} \cdot c_{рпв}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $h'_{ск}, h''_{ск}$  – энтальпия ПВС смеси до и после солнечного коллектора, кДж/кг;

$h'_к, h''_к$  – энтальпия ПВС до и после компрессора, кДж/кг.

В результате расчетов цикла работы гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС установлено, что количество энергии, потребляемой для опреснения  $m^3$  пресной воды в зависимости от поддерживаемых параметров при исходной солености 35‰ находится в диапазоне от 5 до 30

кВт·ч (рисунок 2.11), данный расчет выполнен для условий, когда ПВС предварительно не подогревается в солнечном коллекторе. При наличии предварительного подогрева за счет использования солнечной энергии эффективность процесса опреснения возрастет.

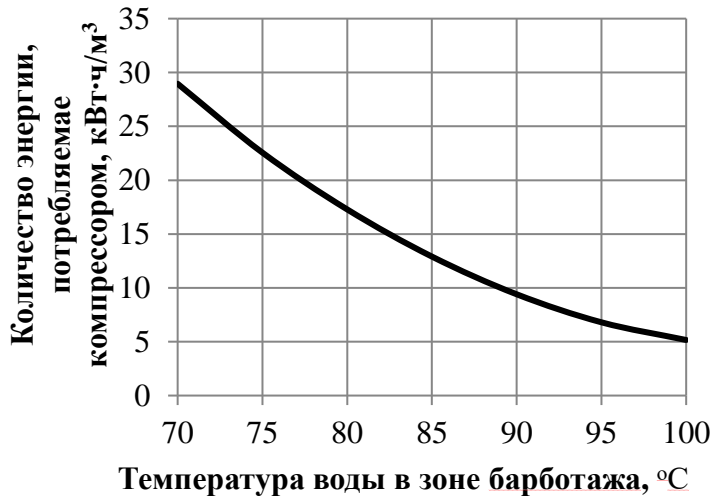


Рисунок 2.11. Зависимость количества электрической энергии, потребляемой для производства 1 м<sup>3</sup> пресной воды от температуры воды в зоне барботажа при работе гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС

### Выводы по второй главе

1. Рассмотрены методы повышения эффективности опреснительных установок, принцип получения пресной воды в которых основан на изменении агрегатного состояния.

2. Разработаны технические решения по повышению эффективности опреснительных установок гигроскопического типа путем включения трансформаторов тепла в цикл работы опреснительных установок гигроскопического типа. Предложены оригинальные циклы работы опреснительных гигроскопического типа на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем и компрессией ПВС.

3. В результате теплового расчета определены затраты энергии для получения 1 м<sup>3</sup> пресной воды при различных режимных параметрах для предложенных технических решений. Установлено, что для гигроскопической опреснительной установки на основе трансформатора тепла с промежуточным теплоносителем, при одинаковой высоте теплоподъема затраты энергии на работу компрессора при различных температурных уровнях отличаются



незначительно. Более энергетически эффективным является техническое решение с компрессией ПВС.

4. Установлено влияние солености опресняемой воды и получаемого рассола на равновесную концентрацию пара, содержащегося в ПВС. Предложена поправка, позволяющая при расчете процесса насыщения воздушного потока, протекающего при его взаимодействии с опресняемой водой, учитывать соленость исходной воды и рассола.

Материалы второй главы опубликованы в работах [114, 115, 124, 125].

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ГИГРОСКОПИЧЕСКОЙ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Основными задачами проведения экспериментальных исследований работы опреснительной установки гигроскопического типа является получение эмпирических данных о параметрах процессов, протекающих в элементах установки, которые необходимы для оценки влияния режимных параметров на производительность установки и верификации математической модели.

### 3.1. Постановка цели и задач экспериментального исследования

Объектом исследования является гигроскопическая опреснительная установка атмосферного типа с контактным испарителем.

Цель экспериментального исследования заключается в определении степени влияния режимных параметров на производительность установки, количество влаги, испаряющейся при барботаже воздушного потока в слой нагретой опресняемой воды.

В рамках экспериментального исследования решались следующие задачи:

1. Разработка и создание экспериментальной установки.
2. Планирование экспериментального исследования.
3. Математическая обработка результатов эксперимента.
4. Определение производительности установки и количества испаряющейся влаги.
5. Анализ полученных результатов.

### 3.2. Описание экспериментальной установки

Для исследования процессов, протекающих в элементах гигроскопических опреснительных установок была создана экспериментальная установка, принципиальная схема которой приведена на рисунке 3.1.

Экспериментальная установка 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.

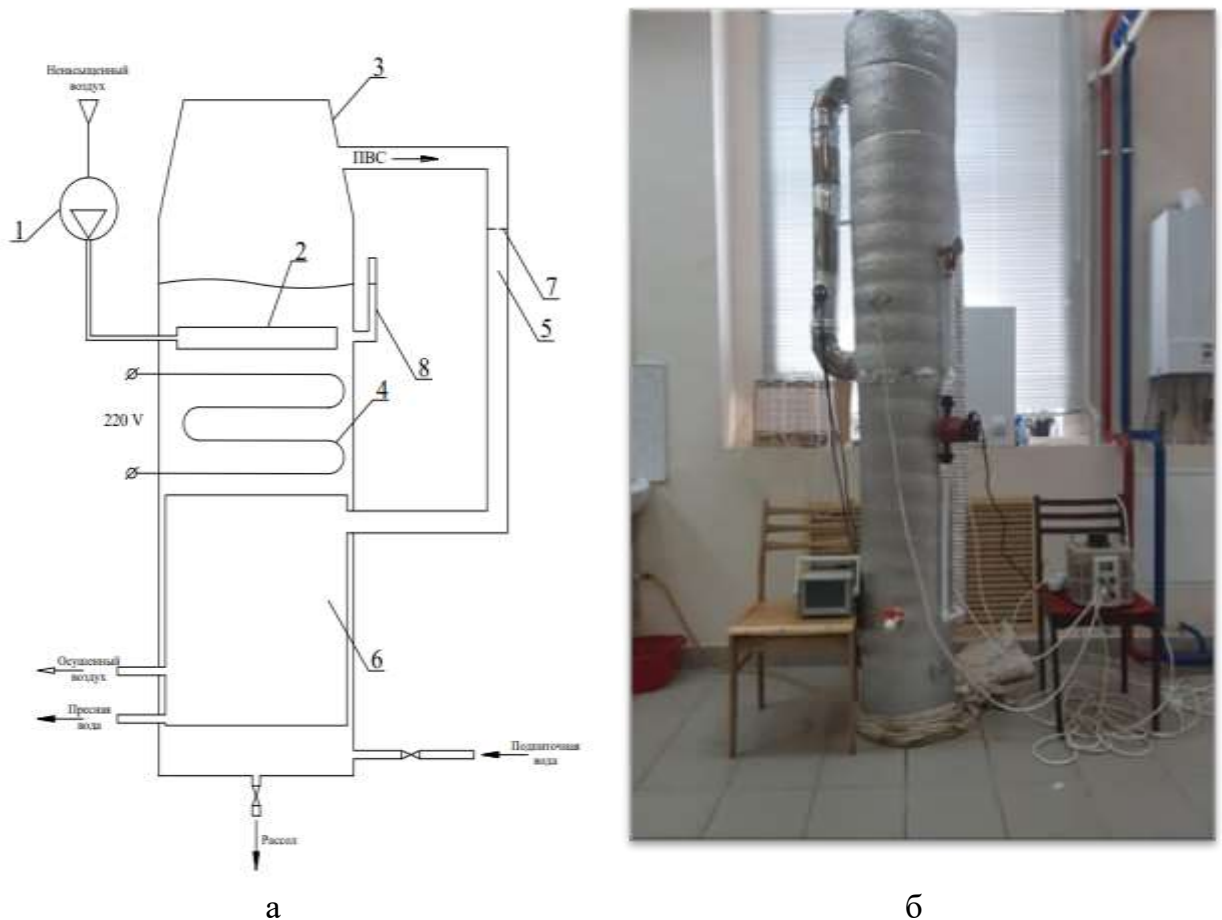


Рисунок 3.1. Принципиальная схема экспериментальной установки (а) и ее внешний вид (б):

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

Под нагревательным элементом 4 располагается конденсатор-сепаратор 6, представляющий собой рекуперативный теплообменник, который разделяет паровоздушную смесь на пресную воду и осушенный воздух. Для перемещения паровоздушной смеси по тракту установлено нагнетательное устройство 1, а для измерения контроля уровня опресняемой воды предусмотрен измеритель уровня 8, который выполнен в виде гибкого шланга, сообщающегося с испарительной камерой 3.

Данная установка работает следующим образом. 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 паровоздушная смесь (ПВС) по трубопроводу ПВС, преодолевая диафрагму 7, поступает в конденсатор-сепаратор 6, где осушается, в результате чего разделяется на осушенный воздух и пресную воду. Процесс нагрева исходной воды осуществляется в два этапа: в конденсаторе-сепараторе 6, в результате отвода теплоты от ПВС и в результате теплообмена с поверхностью нагревательного элемента. Вода с повышенным солесодержанием из зоны барботажа за счет большей плотности опускается ко дну корпуса установки, формируя зону рассола, откуда она сливается. Поскольку исходная морская вода имеет меньшую плотность чем рассол, то она естественным образом будет поступать в зону нагрева, дополнительно нагреваясь за счет восприятия тепловой энергии от конденсатора-сепаратора.

В результате контакта нагретого воздушного потока со слоем горячей воды его влагосодержание возрастает, изменяется температура, энтальпия, влажность. Барботирование воздуха в слой нагретой воды интенсифицирует процессы тепло- и массообмена между газовой и жидкой средами. Данное явление обусловлено развитием поверхности взаимодействия, возникшей по причине высокой дисперсности пузырей, подаваемых в жидкость. Цикл работы экспериментальной опреснительной установки в  $h-d$  диаграмме показан на рисунке 3.2.

К числу основных параметров и характеристик гигроскопических опреснительных установок относят температуру воды в зоне барботажа и определяющие ее параметры теплоносителя, взаимодействующего с ней, производительность установки, давление. Корректный выбор параметров опреснительной установки, особенно при большой ее производительности позволяет в значительной степени сократить ее стоимость.

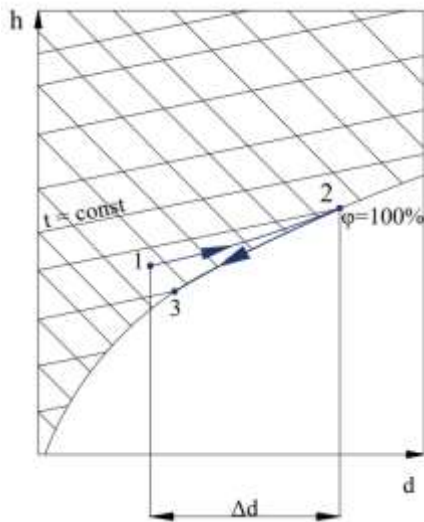


Рисунок 3.2. Теоретический цикл работы экспериментальной установки: 1-2 процесс насыщения воздушного потока влагой; 2-3 процесс осушки ПВС

### 3.3. Планирование экспериментального исследования

В рамках диссертационной работы был проведен полнофакторный эксперимент (ПФЭ), параметром оптимизации которого является производительность установки. Использование математической теории при проведении экспериментальных исследований позволяет на стадии планирования оптимизировать объем проводимых опытов и повысить их точность [86].

Выбранный параметр оптимизации является количественным, универсальным, полным, выражается одним числом, обладает однозначностью в статическом смысле, а также действительно оценивает эффективность функционирования системы, то есть соответствует всем требованиям, предъявляемым к параметрам оптимизации [86].

В качестве варьируемых факторов принимались температуры воды и воздуха в зоне барботажа. Рассматриваемые факторы отвечают двум основным требованиям, предъявляемым к совокупности факторов: между ними отсутствует корреляция, что означает возможность установления какого-либо фактора на любой уровень, вне зависимости от уровней других факторов и они являются совместимыми [87]. При этом каждый фактор изначально рассматривается лишь на двух фиксированных уровнях (верхнем и нижнем). Верхним уровнем для температуры воды было значение 100 °С, нижним – 70 °С, а для воздуха верхний уровень составил 100 °С, нижний – 20 °С.

При проведении экспериментального исследования на постоянном уровне поддерживались давление, высота барботажного слоя и расход воздуха. При этом общая минерализация в конденсате на выходе из установки составляла не более требуемых значений, то есть не более 1 г/л. Под общей минерализацией понимается суммарная концентрация анионов, катионов и недиссоциированных, растворенных в воде органических веществ, выраженная в граммах на литр. Общая минерализация воды совпадает с сухим остатком [88]. Сухой остаток в конденсате определяется путем выпаривания определенного объема воды, предварительно профильтрованного через бумажный фильтр с последующим высушиванием остатка до постоянного веса при температуре 105-120 °С. Относительная влажность воздуха, поступающего в установку, при проведении эксперимента составляет 40%, а диаметр всасывающего его патрубка – 35 мм.

Число всех экспериментов (опытов) в этом случае определяется по формуле  $n = 2^k$ , где  $k$  – количество изучаемых факторов, соответственно, количество экспериментов равно 4.

План проведения экспериментов записывается в виде матрицы планирования, в которой в определенном порядке перечисляются различные комбинации факторов на двух уровнях.

Для обработки результатов проведенных экспериментов и дальнейшего определения коэффициентов уравнения регрессии факторы приводятся к одному масштабу. Это достигается путем кодирования переменных [89].

Линейное уравнение регрессии относительно новых переменных принимает вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 \quad (3.1)$$

где  $x_1$  – температура нагретой воды в зоне барботажа, °С;  $x_2$  – температура барботируемого воздуха, °С;  $b_0, b_1, b_2, b_{12}$  – коэффициенты уравнения регрессии.

Было проведено несколько серий опытов для каждого эксперимента. Это необходимо для проверки уравнения на адекватность. Каждый эксперимент повторялся 5 раз.

Коэффициенты уравнения регрессии находят с помощью метода наименьших квадратов.

Величина коэффициентов уравнения регрессии:  $b_0=609,25$ ;  $b_1=-28,75$ ;  $b_2=452,25$ ;  $b_{12}=-18,75$ .

Далее полученные коэффициенты были проверены на значимость. Значимость коэффициентов была определена по критерию Стьюдента [90]. В результате вычислений установлено, что коэффициент  $b_{12}$  является незначимым. И уравнение регрессии принимает вид:

$$y=609,25-28,75 \cdot x_1+452,25 \cdot x_2$$

Среднее квадратическое отклонение коэффициентов  $S_{\text{коэф}}$  зависит от дисперсии воспроизводимости результатов по всем проведенным опытам  $S_y^2$  и вычисляется по формуле:

$$S_{\text{коэф}} = \sqrt{\frac{S_y^2}{n \cdot m}}, \quad (3.2)$$

где  $n$  - число экспериментов (число строк в матрице ПФЭ);  $m$  – число опытов (наблюдений) в каждом эксперименте.

$$S_y^2 = \frac{1}{n \cdot (m-1)} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m (y_{ji} - \bar{y}_i), \quad (3.3)$$

где  $y_{ji}$  – результат отдельного  $i$ -го наблюдения в  $j$ -ом эксперименте;

Проверка на адекватность полученного уравнения регрессии со значимыми коэффициентами осуществляется с помощью критерия Фишера. Для этого необходимо определяют остаточную дисперсию:

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m}{n-r} \sum_{j=1}^n (\tilde{y}_j - \bar{y}_i)^2, \quad (3.4)$$

где  $\hat{y}_j$  – значение изучаемого параметра, вычисленное по уравнению регрессии со значимыми коэффициентами для  $j$ -ого эксперимента.

Далее рассчитывается критерий Фишера:

$$F_{\text{расч.}} = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_y^2} \quad (3.5)$$

Табличное значение критерия  $F_{\text{табл.}}$  находят из таблиц критических точек распределения Фишера при определенном уровне значимости по соответствующим степеням свободы. В рассматриваемом случае расчетное значение превосходит табличное значение, следовательно, модель неадекватна.

Для получения корректного уравнения регрессии был составлен план второго порядка. Планы второго порядка позволяют сформировать функцию отклика в виде полного квадратичного полинома, который содержит большее число членов, чем неполный квадратичный полином, сформированный по планам первого порядка, и поэтому требуют большего числа выполняемых опытов. Полный квадратичный полином при  $n = 2$  содержит 6 членов. В связи с этим сформированный план ПФЭ достраивается до плана второго порядка (композиционный план) и формируется новая функция отклика в виде полного квадратичного полинома, без потери информации о ранее сделанных опытах.

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 \quad (3.6)$$

В центральный симметричный ортогональный композиционный план (ОЦКП) входят: ядро - план ПФЭ с  $N = 2^n$  точками плана,  $n_0$  (одна для этого плана) центральная точка плана и по две “звездные” точки для каждого фактора. Число экспериментов увеличивается до 9, а факторы варьируются на 3 уровнях, проводятся дополнительные замеры при температуре 85 °С – это значение является центром плана и при кодировании принимает значение равное 0 (таблица 3.1.).



Таблица 3.1. Матрица планирования для обработки результатов

№ п/п	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>1</sub> · x <sub>2</sub>	x <sub>11</sub>	x <sub>22</sub>	$\bar{y}$
1	–	–	+	1/3	1/3	167
2	+	–	–	1/3	1/3	1109
3	–	+	–	1/3	1/3	147
4	+	+	+	1/3	1/3	1014
5	–	0	0	1/3	-2/3	153
6	+	0	0	1/3	-2/3	1080
7	0	+	0	-2/3	1/3	425,5
8	0	–	0	-2/3	1/3	389,5
9	0	+	0	-2/3	-2/3	400

Очевидно, что план является ортогональным. В отличие от планов ПФЭ для ОЦКП сумма квадратов факторов разных столбцов не является одинаковой.

Коэффициенты регрессии в этом случае рассчитываются следующим образом:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^9 \bar{x}_i \cdot y}{\sum_{i=1}^9 \bar{x}_i} \quad (3.7)$$

В результате вычислений получены коэффициенты уравнения регрессии 2-го порядка:

$$b_0=542,78; b_1=456; b_2=-25,17; b_{12}=-18,75; b_{11}=206,67; b_{22}=-2,33.$$

Коэффициент  $b_{22}$  является незначительным, поэтому в уравнении регрессии его не учитывается

Тогда уравнение регрессии принимает вид:

$$y=542,78+456 \cdot x_1-25,17 \cdot x_2-18,75 \cdot x_1 \cdot x_2 + 206,67 \cdot (x_1^2-2/3) \quad (3.8)$$

Анализ результатов предполагает интерпретацию полученной модели. Интерпретацию модели можно производить только тогда, когда она записана в кодированных переменных. Только в этом случае на коэффициенты не влияет масштаб факторов, и по величине коэффициентов можно судить о степени влияния того или иного фактора. Чем больше абсолютная величина коэффициента, тем больше фактор влияет на отклик (изучаемый параметр). Следовательно, можно расположить факторы по величине их влияния. Исходя из полученного уравнения следует, что ключевое влияние на производительность установки оказывает температура опресняемой воды в зоне барботажа.

При переходе к натуральным переменным коэффициенты уравнения изменяются, и в этом случае пропадает возможность интерпретации влияния факторов по величинам и знакам коэффициентов. Однако, если уравнение адекватно, то с его помощью можно определять значения исследуемой величины, не проводя эксперимента и придавая факторам значения, которые должны лежать между нижним и верхним уровнем.

Уравнение примет вид:

$$y=4321,58-123,67 \cdot z_1+2,252 \cdot z_2-0,035 \cdot z_1 \cdot z_2 + 0,919 \cdot z_1^2 \quad (3.9)$$

Полученная зависимость справедлива для диапазона температур воды в зоне барботажа от 70 до 100 °С, а для температуры воздуха от 20 до 100 °С.

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 приложениями заключениями санитарно-гигиенической и микробиологической экспертизы СЭС, исследованием на микроэлементы соответствует всем нормам, предъявляемым к питьевой воде. Результаты санитарно-гигиенического исследования приведены в таблице 3.1.

По результатам проведенного исследования были получены графические зависимости производительности установки от температуры воды и воздуха в зоне барботажа, представленные на рисунке 3.3, 3.4.

Таблица 3.2. Результаты санитарно-гигиенического исследований полученной пресной воды

№ п/п	Показатель	Результаты измерений	Гигиенический норматив	Единицы измерений
1	Цветность	10,0±2,0	20	град.
2	Водородный Показатель	6,15±0,20	6-9	ед. рН
3	Окисляемость перманганатная	3,08±0,31	5,0	мг/дм <sup>3</sup>
4	Общая минерализация (сухой остаток)	670±60	1000	мг/дм <sup>3</sup>
5	Жесткость общая	2,1±0,3	7,0	мг-экв/дм <sup>3</sup>
6	Сульфаты	45,1±5,0	500	мг/дм <sup>3</sup>
7	Хлориды	317,6±28,6	350	мг/дм <sup>3</sup>
8	Железо общее	0,21±0,05	0,3	мг/дм <sup>3</sup>
9	Марганец	0,020±0,005	0,1	мг/дм <sup>3</sup>
10	Медь	0,03±0,01	1,0	мг/дм <sup>3</sup>

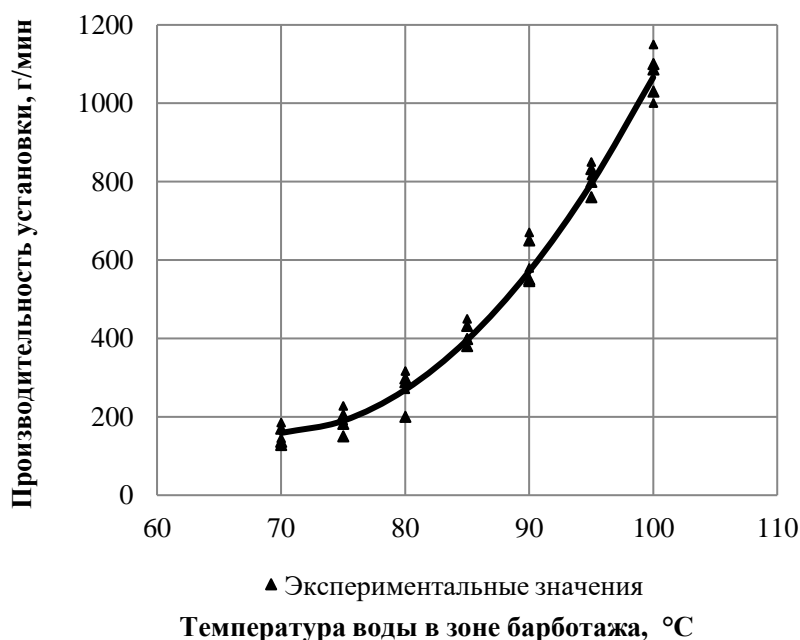


Рисунок 3.3. Графическая зависимость производительности гигроскопической опреснительной установки от температуры воды в зоне барботажа

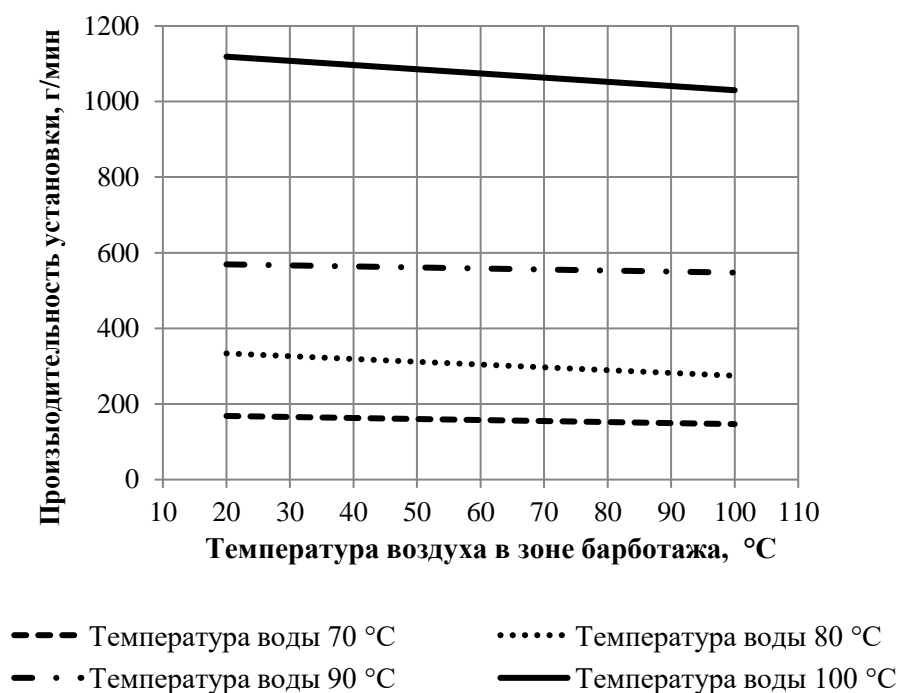


Рисунок 3.4. Графическая зависимость производительности гигроскопической опреснительной установки от температуры воды в зоне барботажа

Из анализа полученных результатов следует, что ключевое влияние на производительность установки оказывает начальная температура воды в зоне барботажа, в отличие от температуры воздуха. При увеличении температуры воды в зоне барботажа производительность возрастает скачкообразно, зависимость производительности опреснительной установки от температуры воздуха носит линейный характер.

### 3.4. Экспериментальное исследование процесса насыщения воздушного потока влагой

В связи с тем, что процесс насыщения воздушного потока влагой является одним из процессов, определяющих производительность установки, то 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.

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

температура ПВС по сухому  $t_{\text{ПВС}}^{\text{с}}$  и мокрому термометрам  $t_{\text{ПВС}}^{\text{м}}$ , количество влаги  $W$ , унесенное воздухом.

Схема расположения датчиков измерительных приборов экспериментальной установки приведена на рисунке 3.5.

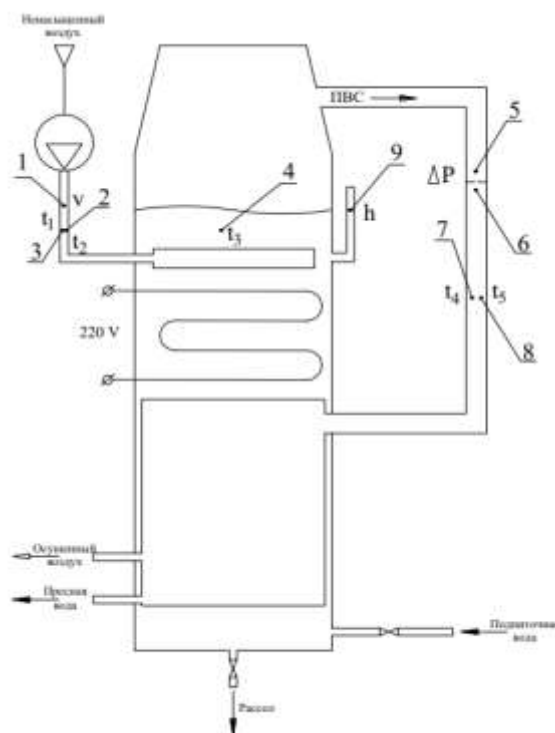


Рисунок 3.5. Расположение температурных датчиков и измерительных приборов: 1 – узел измерения скорости; 2,3,4,7,8 – датчики измерения температур; 5,6 – узел измерения перепада давления; 9 – указатель уровня

Измерение температур ненасыщенного воздуха и паровоздушной смеси осуществлялось термопреобразователями сопротивления, расход паровоздушной смеси измерялся косвенно, для этого фиксировался перепад давлений на местном сопротивлении посредством использования трубки Пито и дифференциального манометра Testo-512. В экспериментальной установке воздух распределяется через газораспределительную решетку с отверстиями диаметром 0,5 мм.

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%. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3. 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
$t_{ПВС}^C$	66,42	77,98	87,88	97,20
$t_{ПВС}^M$	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

Общая характеристика используемых при проведении экспериментов измерительных приборов приведена в таблице 3.4. В ходе экспериментального исследования соленость исходной воды составляла 35 г/л. Каждый эксперимент повторялся не менее 5 раз.

Таблица 3.4. Метрологические характеристики измерительных приборов

Тип и наименование средства измерения, единица измерения	Метрологические характеристики			
	Номинальный диапазон измерения	Номинальная цена деления шкалы	Характеристика погрешности	
			Нормируемая погрешность	Пределы допускаемой погрешности
Измеритель комбинированный Testo 410-1, м/с	0,4...20,0	0,1	Абсолютная, м/с	$\pm(0,2+0,02V)$ в диапазоне (0,4...2,0) м/с; $\pm(0,2+0,03V)$ в диапазоне (2,0...5,0) м/с; $\pm(0,2+0,05V)$ в диапазоне (5,1...20) м/с
Термометр биметаллический БТ, °С	0 до +120	2	Приведенная, %	$\pm 2,5$
Термопреобразователи сопротивления F 0.3 (В), °С	-70 до +500	0,1	Абсолютная, °С	$\pm(0,3+0,005 \cdot t)$

Тип и наименование средства измерения, единица измерения	Метрологические характеристики			
	Номинальный диапазон измерения	Номинальная цена деления шкалы	Характеристика погрешности	
			Нормируемая погрешность	Пределы допускаемой погрешности
Дифференциальный манометр Testo-512, гПа	0 до 20	0,01	Приведенная, %	0,5

При насыщении воздушного потока на границах пограничных слоев отчетливо формируются две разности температур: разность между температурами воздуха по мокрому термометру и сухому и разность между температурой воздуха по смоченному термометру и температурой жидкости. Первая разность температур не определяет процесс тепломассообмена, так как входящая в нее температура газа по сухому термометру не определяет температуру воздуха. Вторая разность определяет тепломассообмен, так как входящие в нее температуры однозначно определяют энтальпию каждой среды: воздуха и жидкости.

Поддержание уровня воды в испарительной камере осуществлялось автоматически. Изменение температуры, поддерживаемой в зоне барботажа, происходило за счет регулирования мощности нагревательных элементов лабораторным автотрансформатором регулируемым. В результате экспериментального исследования установлено, что при приближении температуры воды в зоне барботажа к температуре насыщения при данной солености количество испаряющейся влаги существенно возрастает.

### Выводы по третьей главе

1. Получены экспериментальные данные о производительности опреснительной установки гигроскопического типа при различных режимных параметрах. Установлено ключевое влияние температуры опресняемой воды в зоне барботажа на производительность установки. Зависимость производительности установки от температуры воды носит нелинейный характер. По

методу планирования эксперимента получена регрессионная зависимость для определения производительности установки.

2. Экспериментальное исследование гигроскопического метода опреснения показало, что полученный в результате работы установки конденсат в соответствии с заключениями санитарно-гигиенической и микробиологической экспертизы СЭС, исследованием на микроэлементы соответствует всем нормам, предъявляемым к питьевой воде.

3. Проведено экспериментальное исследование процесса насыщения воздушного потока, протекающего в результате его взаимодействия с нагретой опресняемой водой. Экспериментальные данные использованы для верификации математической модели тепломассообменных процессов, протекающих при барботаже воздушного потока в слой нагретой опресняемой воды.

Материалы третьей главы опубликованы в работах [112,113,118-121,125,128].



## ГЛАВА 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ НАСЫЩЕНИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА ВЛАГОЙ

### 4.1. Обзор программного комплекса ANSYS применительно к решаемой задаче

Проблема математического описания тепломассообменных процессов в одно- и двухфазных многокомпонентных средах является одной из важных фундаментальных проблем. Существующие в настоящее время теоретические подходы к решению этих задач в основном являются полуэмпирическими [91].

На сегодняшний день разработано множество программных пакетов, предназначенных для моделирования многофазных течений и процессов сопряженного тепломассообмена. Наиболее широкое применение получили программные пакеты Chemcad, Ansys CFX, Ansys Fluent, SolidWorks Flow Simulation, Star-CCM, Star-CD, Flow Vision, Gas Dynamics Tool, Phoenics, Hysys, Autodesk Simulation CFD, Comsol CFD, Numeca, StarCCM+ , Comsol Multiphysics [92-100].

Исходя из возможностей программного комплекса ANSYS принято осуществлять моделирование процесса насыщения воздушного потока с помощью этой программы.

Математическое моделирование в программном комплексе ANSYS включает в себя следующие этапы: построение геометрии расчетной области; выбор и задание математической модели; задание условий однозначности; построение расчетной сетки; выполнение самого расчета; анализ полученных результатов.

Для моделирования многофазности в программном пакете предусмотрены несколько модулей, однако применительно к решаемой задаче наилучшим образом подходит модуль Volume of Fluid. Процесс испарения моделируется путем использования модуля Evaporation-condensation. В ходе моделирования задаются 3 фазы: вода (как жидкость), водяной пар и воздух,

представляющий собой смесь газов. Для выбора модели течения предварительно необходимо определить режим течения, в разделе 4.2. приведены рекомендации для определения режима течения пузырьков при барботаже в слой жидкости.

#### 4.2. Диспергирование газа в слой жидкости

При барботаже газ распределяется в жидкость через отверстия или насадки различных устройств (барботеров). В этом случае наряду со значительным развитием суммарной поверхности контакта фаз обеспечивается и интенсивная турбулизация жидкости. В экспериментальной установке барботажный аппарат представляет собой газораспределительную решетку.

В рассматриваемом случае система тел является гетерогенной. При работе барботера газ отрывается от отверстий, в виде пузырьков. В барботажном слое роль сплошной среды выполняет жидкая фаза, а газовая представлена в виде дисперсной. Основные значимые процессы в барботажном слое: движение и обменные процессы в ядре потока жидкой фазы, обменные процессы в пограничном слое у газовых пузырьков, обменные процессы внутри пузырьков дисперсной газовой фазы, определяемые в основном диффузией [101].

Для движущихся в покоящейся сплошной среде пузырей процесс диспергирования рассматривается с позиций гидродинамической неустойчивости, согласно которой возникающие случайные возмущения поверхности раздела фаз нарастают вплоть до дробления пузыря до устойчивого размера.

Особенностью движения пузырей в слое жидкости является наличие двух эффектов: подвижности поверхности раздела фаз и способности пузырей изменять свою форму. При промежуточных и больших критериях Рейнольдса эти эффекты проявляются в большей степени [102,103].

Режим движения пузырей при их всплытии определяется по значению числа Рейнольдса  $Re_{п}$ , которое рассчитывают по формуле:

$$Re_{п} = \frac{w_{п} d_{р_{ж}}}{\mu_{ж}}, \quad (4.1)$$

где  $\mu_{\text{ж}}$  – кинематическая вязкость, Па·с;  $w_{\text{п}}$  – скорость всплытия пузыря, м/с;  
 $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $d$  – диаметр пузырька, м.

Скорость свободного всплытия пузыря рассчитывается по формуле:

$$w_{\text{п}} = 2 \sqrt{\frac{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}{3\xi\rho_{\text{ж}}}}, \quad (4.2)$$

где  $\xi$  – коэффициент сопротивления;  $\rho_{\text{г}}$  – плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения м<sup>2</sup>/с.

Формулу (4.2) получают, решая уравнение динамического равновесия для движения пузыря во время всплытия подобно выводу зависимости для определения скорости осаждения частицы.

Возникающее сопротивление зависит от режима движения:

– при ламинарном режиме используется формула ( $Re < 1$ )

$$\xi = \frac{16}{Re}, \quad (4.3)$$

Для области  $0,1 < Re < 10$  известна формула:

$$\xi = \frac{16}{Re} + \frac{1}{(1+Re/32)}, \quad (4.4)$$

Коэффициент сопротивления газового пузыря при  $10 < Re < 200$  по формуле Мура имеет вид:

$$\xi = \frac{48}{Re} \left( 1 - \frac{2,2}{\sqrt{Re}} \right), \quad (4.5)$$

При числах  $Re$  более 200 начинается значительная деформация пузырей, и коэффициент сопротивления резко возрастает

Возмущения потока другими пузырями вызывает колебания их формы вплоть до разрушения на более мелкие пузыри. В то же время мелкие пузыри при столкновениях способны объединяться в крупные.

Режим истечения газа из отверстия (сопла) при барботаже может быть охарактеризован с использованием методов теории подобия параметром  $\Phi$ :

$$\Phi = 1 + \left( 1 + \frac{We^2}{Fr} \right)^{0,5}, \quad (4.6)$$

где  $We$  и  $Fr$  – критерии Вебера и Фруда соответственно.

Значения критериев  $We$  и  $Fr$  вычисляются по формулам:

$$We = \frac{w_n^2 d_o \rho_{ж}}{\sigma}, \quad (4.7)$$

$$Fr = \frac{w_n^2}{g d_o}, \quad (4.8)$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение, Н/м;  $d_o$  – диаметр отверстия, м.

Критерий Вебера характеризует соотношение инерционных сил и сил поверхностного натяжения, критерий Фруда – инерционных сил и сил тяжести. Считают, что свободное истечение пузырьков газа наблюдается при  $\Phi < 27$ , а при  $\Phi \geq 27$  – цепочное. Размер пузырьков газа при  $\Phi < 27$  рассчитывается по формуле:

$$d = 0,9 \left( \frac{3\sigma d_o}{\rho_{ж} g} \right)^{1/3} \Phi^{1/2}, \quad (4.9)$$

при  $\Phi \geq 27$

$$d = 0,5 \left( \frac{3\sigma d_o}{\rho_{ж} g} \right)^{1/3} \Phi^{1/3}, \quad (4.10)$$

Скорость всплывания, а также гидродинамическое поле пузырька в значительной степени зависят от его формы. Предполагается, что форма пузырька очень мало отличается от сферической, поэтому имеет смысл заранее определить границы этого допущения. Условие сферичности может быть получено путем сравнения капиллярных сил, стремящихся придать пузырьку сферическую форму, и сил гидродинамического давления, стремящихся его сплюснуть.

Если скорость газа в аппарате превышает скорость свободного всплывания пузырьков, то средняя скорость движения газа в двухфазном слое будет зависеть от газосодержания  $\varphi$  и составит:

$$w = \frac{w_r}{\varphi}, \quad (4.11)$$

где  $w_r$  – скорость газа в свободном сечении аппарата (без жидкости), м/с;  $\varphi$  – газосодержание.

Газосодержание барботажного слоя изменяется как по высоте аппарата, так и по его сечению. При небольших высотах исходного слоя жидкости наблюдается непрерывное возрастание величины газосодержания по высоте слоя. В этом случае газосодержание зависит от скорости газа в свободном сечении колонны, свойств жидкости и конструкции газораспределителя, а следовательно, от скорости газа в его отверстиях.

Условие сферичности может быть получено путем сравнения капиллярных сил, стремящихся придать пузырьку сферическую форму, и сил гидродинамического давления, стремящихся его сплюснуть.

При малых деформациях форма пузырька близка к сплюсненному в направлении движения эллипсоиду вращения. Степень деформации характеризуется величиной  $\chi$ , равной отношению большой и малой полуосей эллипсоида

Wellek и Agrawal получили эмпирическую формулу:

$$\chi = 1 + 0,091 We^{0,95}, \quad (4.12)$$

В.Г. Левич получил для области  $Re = 50 \div 800$ , которой соответствуют диаметры пузырьков от 0,4 до 2 мм, теоретическое решение уравнения скорости всплывания:

$$w_{\text{н}} = \frac{1}{9} \frac{gd^2}{4\nu}, \quad (4.13)$$

Для расчета скорости движения пузырьков можно использовать следующие полуэмпирические формулы: при ламинарном режиме ( $Re < 2$ ):

$$w_{\Pi} = \frac{2g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})d_3^2}{9\mu}, \quad (4.14)$$

где  $d_3$  – эквивалентный диаметр, м.

при движении пузырей, имеющих форму сфероидов, в интервале  $2 < \text{Re} < A^{0,42}$

$$w_{\Pi} = 1,81(d_3/2)^{1,28} / \nu^{0,52}, \quad (4.15)$$

где  $A = \frac{2\sigma}{g(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})d_3}$  – безразмерный комплекс.

В интервале  $4A^{0,42} < \text{Re} < 3A^{0,5}$

$$w_{\Pi} = 1,35 \sqrt{\frac{2\sigma}{(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})d_3}}, \quad (4.16)$$

При движении грибообразных пузырей ( $\text{Re} > 3A^{0,5}$ )

$$w_{\Pi} = 1,534 \sqrt{\frac{g\sigma(\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{г}})}{\rho_{\text{ж}}^2}}, \quad (4.17)$$

При  $\text{Re} > 150$  известна приближенная формула:

$$w_{\Pi} \approx \sqrt{gd/2} \quad \xi \approx 2,63, \quad (4.18)$$

Для области  $\text{Re} > 800$  (диаметр пузырьков  $2 \div 15$  мм) рекомендуется принимать скорость всплывания пузырьков равной 26–30 см/с.

Пузырьки диаметром более 15 мм ( $\text{Re} > 4500$ ) всплывают с несколько большими скоростями 35–40 см/с, но оказываются малоустойчивыми и дробятся на более мелкие.

Гидродинамическая картина барботажа зависит от испарения в газовую фазу жидкости при их взаимодействии, так как при этом увеличивается объем, а, следовательно, и скорость газовой среды [51].

### **4.3. Математическая модель процесса насыщения воздушного потока влагой при его барботаже в слой нагретой опресняемой воды**

Целью данного этапа работы является создание посредством использования программного пакета ANSYS модели процесса насыщения воздушного потока влагой, протекающего в опреснительных установках гигроскопического типа, позволяющая выполнять расчет количества влаги, уносимого воздухом в результате процессов тепломассообмена.

Теоретической основой математического описания процессов переноса в двухфазных средах являются фундаментальные законы сохранения и равновесия.

Структура двухфазных потоков весьма разнообразна и определяется размерами и распределением элементов дисперсной фазы в сплошной. Описание закономерностей движения двухфазных систем осложняется неоднородностью их состава и различием скоростей движения. Математическое описание процессов тепломассообмена в многофазных средах сопряжена с упрощением гидродинамической обстановки.

Для каждой из фаз, составляющих рассматриваемую многофазную среду (для каждой из взаимодействующих взаимопроникающих сплошных сред), можно определить параметры, характеризующие движение этой фазы – плотность фаз, скорости фаз и т.п. Согласно этому понятию дисперсная среда в несущей жидкости представляется как совокупность непрерывных сред, заполняющих одновременно один и тот же объем и имеющих в каждой точке пространства свою собственную скорость.

В пределах для каждой из фаз правомерны дифференциальные уравнения, отображающие законы сохранения массы, и энергии. На межфазовых поверхностях должны выполняться граничные условия, отражающие условия взаимодействия фаз [104].

Для проведения численных экспериментов в программном комплексе ANSYS разработана упрощенная геометрическая модель рабочей зоны гигроскопической опреснительной установки. Исследуемая расчетная область приведена на рисунке 4.1.

Принятые допущения:

- 1) воздух и опресняемая вода не вступают между собой в химическую реакцию;
- 2) параметры воздуха меняются только в вертикальном направлении;
- 3) все пузыри имеют одинаковые размеры в горизонтальном сечении;
- 4) воздух представляет собой смесь азота, кислорода, углекислого газа и водяных паров.

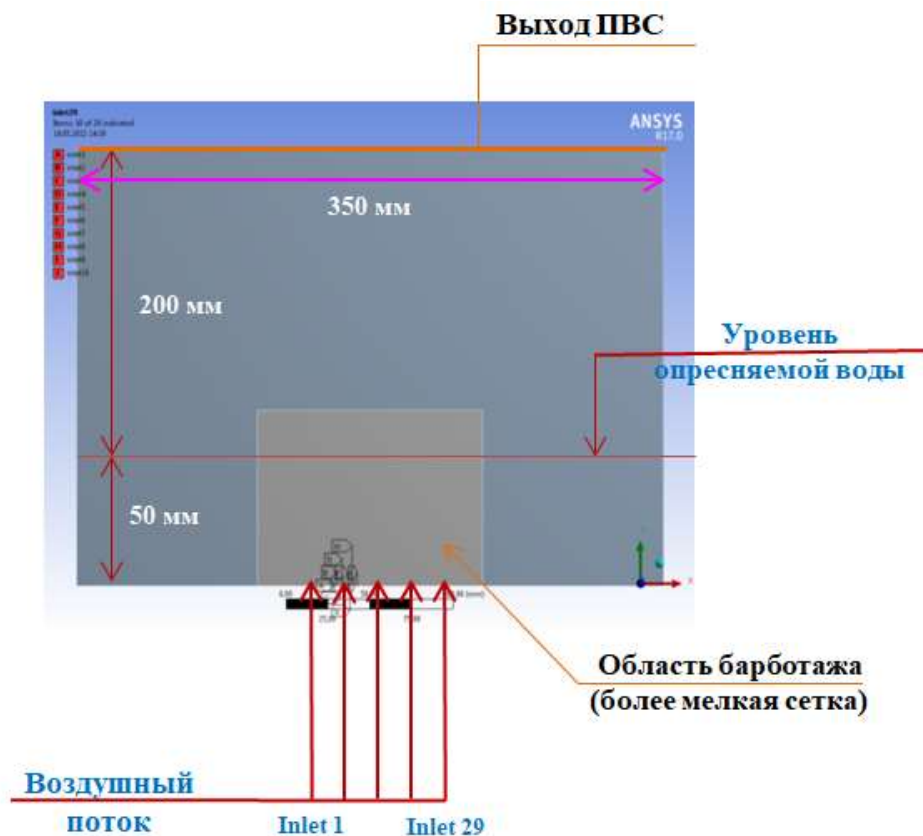


Рисунок 4.1. Расчетная область

Моделируемая система включает в себя испарительную камеру, заполненную опресняемой водой, а также газораспределительную решетку с отверстиями диаметром 0,5 мм, расположенные с шагом 1 мм, в сечении расположено 29 отверстий.

Процесс переноса теплоты и массы описывается системой дифференциальных уравнений неразрывности (4.19), движения (4.20, 4.21) и энергии (4.22), диффузии (4.23), при составлении которых были приняты допущения, с учетом которых задача свелась к двумерной постановке.



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

$$\frac{\partial \rho u_x}{\partial x} + \frac{\partial \rho u_y}{\partial y} = 0; \quad (4.19)$$

$$\rho \cdot \left( u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right); \quad (4.20)$$

$$\rho \cdot \left( u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right); \quad (4.21)$$

$$u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho c_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{D}{c_p} (c_{\text{рп}} - c_{\text{рв}}) \left( \frac{\partial T}{\partial x} \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial T}{\partial y} \frac{\partial C}{\partial y} \right); \quad (4.22)$$

$$u_x \frac{\partial C}{\partial x} + u_y \frac{\partial C}{\partial y} = D \left( \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right), \quad (4.23)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  – температура, К;  $u$  – скорость движения, м/с;  $P$  – давление, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $c_{\text{рв}}$ ,  $c_{\text{рп}}$  – массовая изобарная теплоемкость воздуха и водяного пара, кДж/(кг·К);  $C$  – массовая концентрация водяного пара, кг/кг;  $D$  – коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

При моделировании процесса насыщения морская вода рассматривается как раствор хлорида натрия, ее свойства задаются аппроксимирующими функциями, приведенными в 1 главе.

В качестве условий однозначности выступают: скорость всплытия пузырьков, начальная температура воздуха и воды, состав паровоздушной смеси на входе в газораспределительную решетку. По результатам расчетов установлено, что течение пузырьков является турбулентным.

Одним из этапов процесса моделирования является построение расчетной сетки, в силу того, что величина отверстий является относительно маленькой, то

построение сетки было выполнено для двух зон, зона барботажа была разбита на более мелкие элементы. Разбиения расчетной области и характеристика сетки приведена на рисунке 4.2.

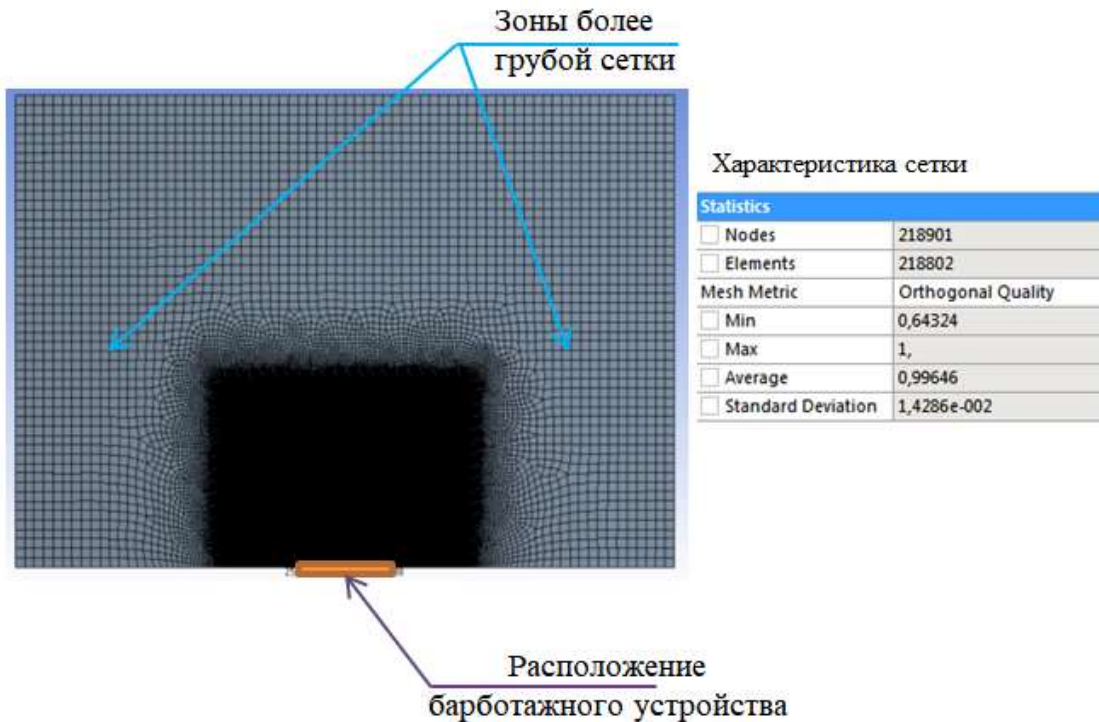


Рисунок 4.2. Расчетная сетка

Полученное в результате движения воздушных пузырьков распределение фаз приведено на рисунке 4.3.

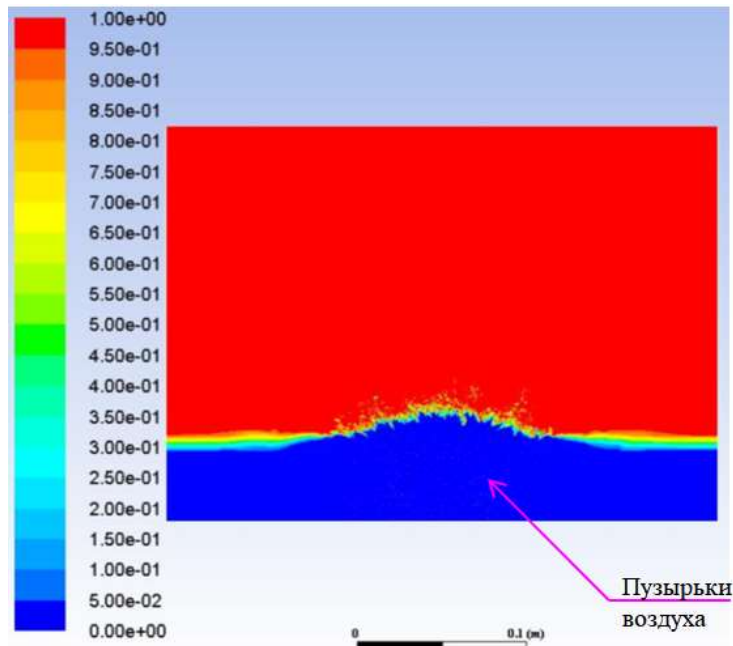


Рисунок 4.3. Распределение фаз при барботаже воздушного потока в слой опресняемой воды

Для моделирования процесса испарения водяных паров для задания пользовательских функций на языке программирования Си был разработан UDF-файл (User Defined Function), фрагмент кода приведен на рисунке 4.4.

```

if (vf_p == 1) {p_w = p_mix + p_op;} //If secondary phase only
else { //If primary phase of mixture of phases
//Find the partial pressure of water vapour
//partial pressure = cell pressure * water mole fraction
//mass of primary phase in cell
real m_sec = rho_s * vol * vf_s;
//mass of water vapour and air in cell
real m_wv = C_YI(c,st,0) * m_sec;
real m_air = m_sec - m_wv;
//No of moles in water vapour and air
real N_wv = m_wv / MOLAR_MASS_WATER;
real N_air = m_air / MOLAR_MASS_AIR;
real N_total = N_wv + N_air;
//water vapour partial pressure

```

Рисунок 4.4. Фрагмент разработанного программного кода

В ходе расчета определялись поля концентраций, температур, скоростей, количество унесенной влаги. Процесс верификации разработанной математической модели осуществлялся по величине изменения расхода воздушного потока на входе в барботажное устройство и на выходе из испарительной камеры, представляющего собой количество унесенного воздухом водяного пара. На основе полученной модели возможно прогнозирование производительности установки в зависимости от режимных параметров.

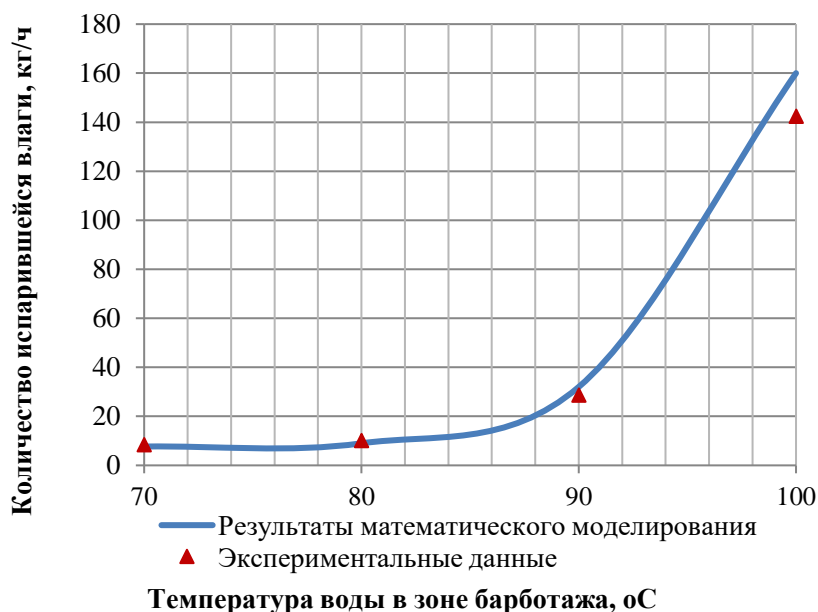


Рисунок 4.5. Результаты экспериментальных исследований и математического моделирования

Для исследуемого диапазона параметров относительная погрешность в определении количества влаги, уносимого воздушным потоком при контакте с опресняемой водой находится в диапазоне от 8,6 до 12,4% (рисунок 4.5). Величина отклонения является допустимой.

#### **4.4. Особенности расчета параметров состояния паровоздушной смеси**

При математическом моделировании и выполнении теплотехнических расчетов, протекающих в элементах опреснительных установок гигроскопического типа, необходимо учитывать особенности свойств паровоздушной смеси.

Термодинамическая система, находящаяся в состоянии равновесия, характеризуется определенными значениями параметров состояния: давлением, температурой и удельным объемом. Уравнение состояния, устанавливающее связь между этими параметрами, именуется термическим уравнением состояния.

На текущий момент известно более 150 уравнений состояния, полученных отечественными и зарубежными учеными – уравнения Гирна, Дюпре, Ван-дер-Ваальса, Бачинского, Линде, Планка, Молье, Яцына, Вукаловича и Новикова, Васильева, Вроблевского, Шиллера, Клаузиуса, Бертелло, Дитеричи, Воли, Ван-Лаара, Каллендара, Битти и Бриджмена, Каммерлинг-Оннеса, Майера-Боголюбова и др. [105].

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.

В силу того, что в ходе насыщения воздушного потока концентрация водяных паров в ПВС стремится к единице, то при математическом моделировании и выполнении теплотехнических расчетов следует учитывать изменение теплофизических величин за счет изменения состава фаз.

Современная теория уравнения состояния реальных газов базируется на принципиальных положениях теории Ван-дер-Ваальса. Наиболее полно вопросы, связанные с уравнением состояния реальных газов были проработаны в

исследованиях Майера и его сотрудников, существенный вклад в изучение данной темы так же внес наш соотечественник Н.Боголюбов, в 1937-1943 гг.

Уравнение, полученное Ван-дер-Ваальсом является результатом попыток получить характеристическое уравнение на основании умозаключений, вытекающих из представлений о строении вещества. Вычисление постоянных коэффициентов опытным путем придает ему эмпирический характер, однако вывод самого уравнения сделан на основе представлений о строении вещества [106].

Уравнение Ван-дер-Ваальса имеет вид:

$$\left( P + \frac{a}{v^2} \right) \cdot (v - b) = RT, \quad (4.24)$$

где  $a$ ,  $b$  – поправки уравнения Ван-дер-Ваальса.

$$a = \frac{27 \cdot R_{\Gamma}^2 \cdot T_{\text{кр}}^2}{64 \cdot p_{\text{кр}}} \quad (4.25)$$

где  $T_{\text{кр}}$  – критическая температура, К;  $p_{\text{кр}}$  – критическое давление, Па;

$$b = \frac{R_{\Gamma} \cdot T_{\text{кр}}}{8 \cdot p_{\text{кр}}}, \quad (4.26)$$

Данное уравнение отличается от уравнения Менделеева-Клапейрона наличием поправок на объем самих молекул  $b$ , и поправкой  $a/v^2$  – на внутреннее давление, определяемое взаимным притяжением молекул газа.

В вандерваальсовском газе в каждый данный момент сталкивается только одна пара молекул. Уравнение Ван-дер-Ваальса справедливо только для тех газов, плотность которых не велика. Иначе говоря, оно справедливо для таких состояний газа, при которых общий объем, занимаемый газом, во много раз превышает собственный объем молекул газа. Степень разреженности газа должна быть такой, чтобы тройные и более сложные столкновения молекул отсутствовали. Кроме этого, область применения уравнения ограничена, его целесообразно использовать при сравнительно высоких температурах. То есть

уравнение Ван-дер-Ваальса применительно только к тем состояниям реального газа, которые незначительно отличаются от идеального состояния.

Уравнение Ван-дер-Ваальса не отвечает действительному переходу от газа к жидкости, то есть теряет свою силу в области фазовых превращений. Значения  $P$  и  $v$ , полученные из рассматриваемого уравнения для любых состояний реальных газов практически всегда являются большими по сравнению со значениями, полученными экспериментально. Данная закономерность наблюдается в основном в области насыщенных и ненасыщенных паров.

Полученная зависимость не дает количественных результатов, точность которых достаточна для практических целей, в связи с этим последующие работы исследователей в этой области заключались в попытках дать уравнение состояния чисто эмпирическим путем.

Чисто эмпирические уравнения хотя и дают часто достаточно точные результаты, но в большинстве случаев они получены для конкретного вещества, что лишает их общности, которой обладают уравнения, полученные на основе представлений о строении вещества.

Стремление получить такое уравнение привело к необходимости дальнейшего использования уравнения Ван-дер-Ваальса. Одним из ученых, продолживших данную работу, является профессор В.П. Вукалович, который смог учесть помимо влияния сил сцепления и объема самих молекул их ассоциацию, заключающуюся в объединении одиночных молекул в двойные, тройные и тому подобные сложные соединения. Если учитывать ассоциацию, то газ является не однородным, а смесью газов, состоящей из одиночных, двойных, тройных и т.д. молекул.

Уравнение Вукаловича, в котором принята во внимание ассоциация только с образованием двойных молекул имеет вид:

$$\left( p + \frac{a}{v^2} \right) \cdot (v - b) = RT \cdot \left( 1 - \frac{Cp}{T^{\frac{5+2m}{2}}} \right), \quad (4.27)$$

где  $C$  – константа;  $m$  – величина, определяющая свойства двойной молекулы.

Позднее, в 1939 году совместно с профессором Новиковым И.И. было получено новое уравнение, которое было взято за основу при создании первых таблиц воды и водяного пара, выпущенных в 1940 г. М. П. Вукаловичем [107]. Совместными усилиями ученых уравнение было существенно уточнено и пределы его применения значительно расширены и оно обрело вид:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - b) = RT \cdot \left(1 - \frac{C}{v \cdot T^{\frac{3+2m}{2}}}\right), \quad (4.28)$$

где  $C$ ,  $m$  – постоянные, определяемые на основании опытных данных.

Термодинамическая система, представляющая собой смесь пара и сухого воздуха является реальным газом в том случае, когда в нем содержится достаточно большое количество паров воды, близких к состоянию насыщения. Соответственно, применение законов идеальных газов дает существенную погрешность, величина которой возрастает с увеличением количества пара, находящегося в этой смеси, так как водяной пар является реальным газом.

Одним из наиболее часто используемых уравнений состояния реальных газов является уравнение Молье, в соответствии с которым удельный объем вещества может быть определен по формуле:

$$v = \frac{RT}{p} - \frac{b}{(T/100)^2} - \frac{cp^2}{(T/100)^{13,5}}, \quad (4.29)$$

где  $b$ ,  $c$  – константы уравнения Молье, для водяного пара, соответственно  $b=1,45 \text{ К}^2 \cdot \text{м}^3/\text{кг}$ ,  $c=5,8 \text{ м}^7 \cdot \text{К}^2/(\text{кг} \cdot \text{Н}^2)$ .

Для решения практических задач важным аспектом является выбор уравнения состояния, на основании которого будет проводиться определение параметров состояния вещества, оно должно достаточно точно описывать их связь.

В диссертационной работе рассматриваются три термических уравнения состояния при параметрах водяного пара ниже критической точки.

Уравнение Менделеева-Клапейрона описывает модель идеального газа, в которой пренебрегают силами межмолекулярного взаимодействия и размерами молекул. В связи с этим с повышением давления и увеличения

температуры водяного пара величина погрешности при определении параметров состояния возрастает (рисунок 4.6). Однако в диапазоне температур от 0 до 100 °С, данное уравнение вполне применимо, так как погрешность, полученная при расчете, в данном случае не превышает 1,5%, что позволяет пользоваться им при определении параметров ПВС при расчете атмосферных гигроскопических опреснительных установок. При дальнейшем повышении температуры и давления отклонение увеличивается, при этом возрастание носит параболический характер, и достигает при критических параметрах практически 75%.

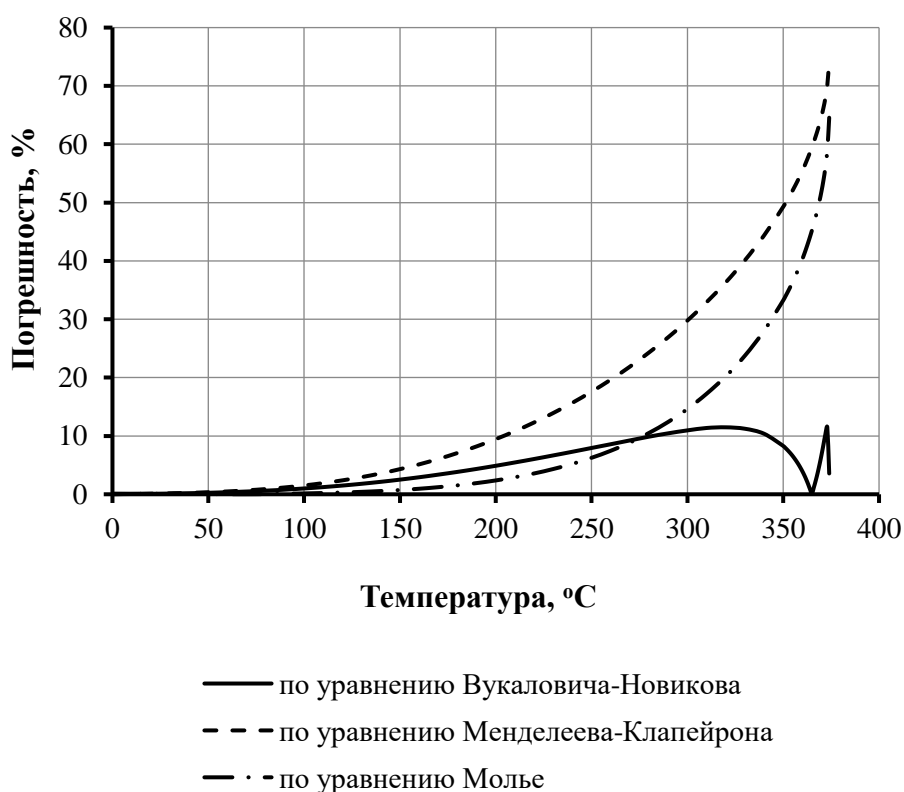


Рисунок 4.6. Зависимость величины средних относительных отклонений параметров состояния сухого насыщенного водяного пара от его температуры

Уравнение Моля достаточно хорошо учитывает свойства водяного пара, относится к классу уравнений, в которых поправка к объему дается как функция давления и температуры. Оно позволяет более точно определять параметры водяного пара в диапазоне температур от 0 до 270 °С, с дальнейшим



изменением температуры погрешность возрастает, а при приближении к критическим параметрам резко увеличивается и достигает 65%.

Наибольшую сходимость между параметрами состояния дает уравнение Вукаловича-Новикова, оно позволяет получать достаточно точные значения в диапазоне температур от 0 °С до  $T_{кр}$ , однако при температурах менее 270 °С по своей точности оно уступает уравнению Молье. На начальном участке погрешность в определении параметров увеличивается и это происходит вплоть до температуры порядка 320 °С, в дальнейшем по мере приближения к  $T_{кр}$  погрешность снижается, а затем резко возрастает и вновь падает.

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что влияние ассоциации, возникающей между молекулами газа возрастает с повышением температуры и давления водяного пара, влияние межмолекулярного взаимодействия также усиливается. Уравнения Молье и Вукаловича-Новикова в определенных пределах дают достаточно точные результаты, при более низких температурах целесообразно использовать первое, с возрастанием температуры необходимо обратиться ко второму уравнению.

Уравнение Вукаловича-Новикова применительно к водяному пару, содержащемуся во влажном воздухе имеет вид (4.30). Умножая обе части равенства на массу пара  $m_n$ , учитывая, что  $V = v_n \cdot m_n$ , где  $v_n$  – удельный объем пара,  $m^3/кг$ , а  $V$  – объем пара, занимаемый  $m_n$  килограмм пара, после раскрытия скобок и преобразования получим:

$$\frac{V \left( p_n - \frac{p_n b}{v_n} + \frac{a}{v_n^2} - \frac{ab}{v_n^3} \right)}{\left( 1 - \frac{c}{v_n T^2} \right)} = m_n R_n T. \quad (4.30)$$

Разделив правую и левую части уравнения (3.36) на соответствующие части уравнения Менделеева-Клапейрона для сухого воздуха, свойства которого близки к свойствам идеального газа, получаем:

$$d_{\text{д}} = \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{п}}} \cdot \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{св}}} \left( \frac{\left( 1 - \frac{b}{v_{\text{п}}} + \frac{a}{p_{\text{п}} v_{\text{п}}^2} - \frac{ab}{p_{\text{п}} v_{\text{п}}^3} \right)}{\left( 1 - \frac{c}{v_{\text{п}} T^{\frac{3+2m}{2}}} \right)} \right) \quad (4.31)$$

Соответственно, при расчете действительного влагосодержания воздуха необходимо вводить поправку В:

$$B = \frac{\left( 1 - \frac{b}{v_{\text{п}}} + \frac{a}{p_{\text{п}} v_{\text{п}}^2} - \frac{ab}{p_{\text{п}} v_{\text{п}}^3} \right)}{\left( 1 - \frac{c}{v_{\text{п}} T^{\frac{3+2m}{2}}} \right)} \quad (4.32)$$

$$d_{\text{д}} = \frac{R_{\text{в}}}{R_{\text{п}}} \cdot \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{св}}} \cdot B$$

Коэффициенты уравнения Вукаловича-Новикова составляют:  $m=1,968$ ,  $c=31000000$ . При данных коэффициентах уравнение состояния достаточно точно описывает параметры водяного пара в диапазоне температур от 0 до 150 °С. Поправки  $a$  и  $b$  для влажного воздуха, рассчитанные по формулам 4.2 и 4.3 соответственно составляют  $1702,59 \text{ Н} \cdot \text{м}^4/\text{кг}^2$ , а  $b=0,00169 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

Аналогичные преобразования проводятся с уравнением Молье. В результате была получена расчетная формула для определения влагосодержания (4.35):

$$d_{\text{д}} = \frac{R_{\text{св}}}{R_{\text{п}}} \cdot \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{св}}} \left( \frac{R_{\text{п}} T}{\left( 0,00461 \cdot T - 1,45 \cdot p_{\text{п}} \left( \frac{100}{T} \right)^{3,2} - 5,8 \cdot p_{\text{п}} \left( \frac{100}{T} \right)^{13,5} \right)} \right) \quad (4.33)$$

$$B_{\text{м}} = \frac{R_{\text{п}} T}{\left( 0,00461 \cdot T - 1,45 \cdot p_{\text{п}} \left( \frac{100}{T} \right)^{3,2} - 5,8 \cdot p_{\text{п}} \left( \frac{100}{T} \right)^{13,5} \right)} \quad (4.34)$$

По результатам вычислений предельных влагосодержаний по уравнениям реального и идеального газов, были получены относительные отклонения влагосодержаний, рассчитанных по уравнениям Менделеева-Клапейрона от рассчитанных по уравнениям Вукаловича-Новикова и Молье при этом расхождения в определении данных величин в условиях атмосферного давления, не превышает 1,1 %, и оно возрастает с увеличением парциального давления. Следовательно, модель идеального газа может быть использована при расчете циклов атмосферных гигроскопических опреснительных установок. В дальнейшем интенсивность увеличения погрешности при меняющихся давлении и температуре возрастает. В силу того, что при давлениях выше атмосферного погрешность в определении параметров состояния увеличивается более существенно, то при расчете циклов гигроскопических опреснительных установок с компрессией ПВС следует использовать модель реального газа. Для параметров работы опреснительных установок с компрессией пара меньшая погрешность при расчета достигается с использованием уравнения Молье.

В рамках выполнения диссертационной работы в среде MathCad автором была разработана программа ЭВМ «Расчет термодинамических и теплофизических свойств паровоздушной смеси» [116].

Разработанная программа позволяет по заданным температуре, общему давлению смеси и ее влажности определять действительные теплофизические и термодинамические свойства влажного воздуха, с учетом того, что входящий в его состав водяной пар является реальным газом.

На рисунке 4.7 представлено фрагмент диалогового окна программы, в котором уже заданы начальные параметры.

В общем случае программа позволяет определять: давление насыщения паровоздушной смеси, парциальное давления водяного пара и сухого воздуха, температуру точки росы, молярную массу влажного воздуха, его газовую постоянную, энтальпию, энтропию, плотность, коэффициент теплопроводности, критерий Прандтля, коэффициент температуропроводности, массовую, объемную, мольную изобарную и изохорную теплоемкости, кинематическую и

динамическую вязкости, влагосодержание, весовую, объемную и мольную доли пара.

Температура паровоздушной смеси	<input type="text" value="80"/>	°С
Давление паровоздушной смеси	<input type="text" value="100"/>	кПа
Влажность воздуха	<input type="text" value="100"/>	%
Парциальное давление пара	<input type="text" value="46.57"/>	кПа
Парциальное давление воздуха	<input type="text" value="53.43"/>	кПа
Молекулярная масса влажного воздуха	<input type="text" value="23.867"/>	кг/кмоль
Газовая постоянная влажного воздуха	<input type="text" value="348.341"/>	Дж/моль/К

Рисунок 4.7 . Фрагмент диалогового окна программы ЭВМ  
«Расчет термодинамических и теплофизических свойств  
паровоздушной смеси»

### Выводы по четвертой главе

1. Получена математическая модель процесса насыщения воздушного потока, протекающего при его диспергировании в слой нагретой опресняемой воды, позволяющая определять количество испарившейся влаги в зависимости от режимных параметров.

2. Выполнена верификация математической модели путем сопоставления результатов расчета и экспериментальных данных. Сделан вывод об удовлетворительном совпадении результатов математического моделирования и эксперимента.

3. Определены границы применимости модели идеального газа при расчетах циклов работы опреснительных установок гигроскопического типа. Установлена возможность использования модели идеального газа для атмосферных опреснительных установок. Для модели реального газа введена поправка, позволяющая учитывать реальные свойства водяного пара.

4. Разработана программа ЭВМ, предназначенная для расчета параметров состояния и теплофизических свойств влажного воздуха, с учетом того, что входящий в его состав водяной пар является реальным газом.

Материалы четвертой главы опубликованы в работах [111, 116, 117, 122-124, 126, 127].

## **ГЛАВА 5. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ОПРЕСНИТЕЛЬНОЙ СТАНЦИИ НА БАЗЕ УСТАНОВОК ГИГРОСКОПИЧЕСКОГО ТИПА**

Достижение оптимальных параметров работы опреснительных установок гигроскопического типа определяется стоимостью топлива, оборудования, тепловой и электрической энергии на источнике энергоснабжения (в случае энергоснабжения установки от традиционных источников энергии). В связи с этим при проработке вопроса о сооружении установки в рассматриваемом регионе следует проводить оценку этих величин, так как от этого зависят капитальные затраты и себестоимость получаемого дистиллята. Теплоснабжение установки может осуществляться от возобновляемых источников энергии, котельной, парогазовой, паротурбинной, газопаровой и газотурбинных установок и пр.

Перед выбором принципиальной тепловой схемы необходимо решать следующие вопросы:

- 1) оценить целевое назначение установки и определить ее производительность;
- 2) выбрать источник энергоснабжения;
- 3) обосновать параметры греющей среды;
- 4) выбрать конструкцию теплообменных агрегатов;

Разработка тепловой схемы осуществляется с учетом:

- 1) технико-экономического обоснования выбранных параметров работы установки;
- 2) числа нагнетательных устройств, осуществляющих перемещение газов и жидкостей;
- 3) выбора числа контуров циркуляции;

Методика расчета тепловой схемы строится на составлении материальных и энергетических балансов по ее отдельным элементам, конечной оценкой удельных тепловых показателей и коэффициентов относительной выработки.

При построении теоретической модели вводят несколько допущений, чтобы получить удельные показатели установки с помощью которых можно сопоставить различные компоновки агрегатно-технологических схем. К числу таких предположений относят:

- в полученном конечном продукте (дистилляте) отсутствуют солевые компоненты;
- удельная теплоемкость для всех компонентов постоянны (рассол, дистиллят, морская вода);
- потери теплоты в окружающую среду незначительны из-за достаточной степени изоляции элементов установки.

### **5.1. Экономические аспекты проблемы восполнения запасов пресной воды**

Выбор метода опреснения воды и стоимость производства пресной воды зависят от солености исходной воды и производительности опреснительного комплекса.

Себестоимость 1 м<sup>3</sup> пресной воды снижается с увеличением производительности опреснительных модулей, данное обстоятельство вызвано тем, что с увеличением объема производства пресной воды капитальные затраты на строительство вспомогательных сооружений, приобретение оборудования, издержки на заработную плату персонала возрастают незначительно. При этом удельное значение данных расходов в стоимости процесса получения пресной воды уменьшается с увеличением производительности.

Солесодержание исходной воды оказывает существенное влияние на стоимость производства пресной воды. Для всех типов опреснительных установок характерно то, что с возрастанием солесодержания стоимость опреснения возрастает. Однако для методов опреснения, принцип работы которых связан с изменением агрегатного состояния (дистилляционный, вымораживание и гигроскопический) возрастание солесодержание в меньшей степени вызывает увеличение стоимости опреснения воды, чем для химического, ионного, обратнoосмотического методов.

При опреснении воды ионным методом капитальные вложения и расход реагентов на регенерацию ионитовых фильтров растут несколько быстрее, чем возрастает солесодержание исходной воды. При опреснении воды электролизом с увеличением солесодержания исходной воды стоимость строительства опреснительной установки и расход электроэнергии возрастает несколько медленнее, чем возрастает солесодержание опресняемой воды. Однако возрастание стоимости опреснения воды с ростом солесодержания исходной воды столь высоко, что уже при солесодержании исходной воды 8-10 г/л стоимость опреснения воды электролизом становится близкой к стоимости ее опреснения дистилляцией [34].

Поэтому опреснение слабосоленых вод наиболее экономично производить посредством ионного обмена, соленых и слабосоленых вод – электролизом, соленых вод – гигроскопическим, дистилляционным методами и замораживанием.

Стоимость опреснения воды существенно зависит от местных условий – стоимости топлива, электроэнергии и реагентов.

В ряде случаев обеспечение пресной водой выгоднее ее опреснения. Опреснение морской воды на месте, как правило выгоднее подачи пресной воды издалека при относительно небольшой потребности в пресной воде. Однако при большом расстоянии до пресноводного источника (200-300 км) опреснение воды может быть более экономически оправданным и при значительном водопотреблении ( $100\ 000 \div 300\ 000$  м<sup>3</sup>/сутки) [34].

Каждый из методов опреснения в зависимости от параметров процесса, конструкции опреснителя, компоновки схемы, утилизации вторичных энерго-ресурсов имеет различные расходы энергии.

Совершенствование процессов гигроскопического опреснения и снижение затрат на получение пресной воды связаны прежде всего со снижением расходов энергии. В процессе опреснения энергия расходуется на нагрев морской воды и перемещение воздушного потока, соответственно, тепловая экономичность зависит как от технологических, так и от конструктивных



факторов. Ее определяют интенсивность теплообмена, гидродинамика потоков. В последние годы в целях сравнения различных тепловых схем опреснителей и конструкций введен коэффициент энергетической эффективности, который выражает количество полученной пресной воды на каждые 1000 кДж затраченной первичной энергии.

**5.1.1. Техничко-экономический расчет опреснительной станции, функционирующей на базе опреснительных установок гигроскопического типа**

К числу основных параметров и характеристик гигроскопической опреснительной установки относят температуру воды в зоне барботажа и определяющие ее параметры теплоносителя, взаимодействующего с ней, производительность установки, давление в установке. Правильный выбор параметров опреснительной установки, особенно при большой ее производительности позволяет в значительной степени сократить стоимость ее строительства.

Задача поиска оптимальных параметров связана с необходимостью установления теоретических соотношений, позволяющих применительно к данной принципиальной схеме рассчитать их значение. Допустимые значения параметров определяются также конструктивными и эксплуатационными требованиями, направленными на устранение накипеобразования и повышения эффективности процессов тепломассообмена.

Согласно существующим методическим положениям технико-экономических расчетов в качестве критерия оптимальности может служить минимум удельных приведенных затрат на производство дистиллята [34]:

$$Z = И + К, \quad (5.1)$$

где И – годовые издержки производства, руб/год; К – капиталовложения, руб/год;

Применительно к одноцелевой опреснительной установке удельные затраты или себестоимость дистиллята:

$$Z_{д} = \frac{Z'}{G'}, \quad (5.2)$$

где  $Z'$  – приведенные затраты на установку одноцелевого назначения, руб/год;  
 $G'$  – годовая производительность по дистилляту, м<sup>3</sup>/год.

Аналитическое выражение этого критерия, определяющего оптимальность параметров, зависит от происходящих в установке процессов, для любой тепловой схемы в общем случае:

$$Z_d = Z_k + Z_t + Z_э + Z_п + Z_{пр}, \quad (5.3)$$

где  $Z_k$  – удельная составляющая капитальных затрат, руб/м<sup>3</sup>;  $Z_t$  – удельные затраты на тепловую энергию, руб/м<sup>3</sup>;  $Z_э$ ,  $Z_п$ ,  $Z_{пр}$  – затраты на электроэнергию, содержание персонала и прочие затраты.

Отдельные составляющие расчетных затрат в значительной степени зависят от стоимости теплоты, капиталовложений, отнесенных к единице поверхности нагрева, стоимости электроэнергии. Поэтому уменьшение доли каждой из них в общей сумме позволит получить минимальную себестоимость производимой воды. Это можно достичь при правильном выборе основных параметров установки, которые оказывают влияние на эти показатели. Затраты на электроэнергию связаны с перемещением воды по контуру установки, и поэтому их доля зависит от величины гидравлического сопротивления элементов установки.

Основой перспективного опреснительного завода является опреснительный модуль на основе паровоздушной гигроскопических опреснительных установок и вспомогательного оборудования. Модульный принцип формирования производства пресной воды позволяет повысить надежность и устойчивость работы, обеспечивает возможность увеличения производительности за счет установки новых опреснительных модулей.

Исходными данными для оценки эффективности проекта опреснительной станции, расположенной в Алжире, являются технико-экономические параметры, представленные в таблице 5.1.

Станция предназначена для опреснения воды Средиземного моря, соленость которой, соответственно, равна 39 ‰ [108]. Расчет выполняется для гигроскопической опреснительной установки с компрессией ПВС.

Опреснительная станция работает следующим образом. Морская вода поступает на блок первичной механической очистки, где на 2-х фильтровальных установках барабанного типа очищается от загрязнения (рисунок 5.1). Очищенная вода поступает в усреднительную емкость морской воды. Мусор с фильтровальных установок направляется в шламонакопительный колодец. По наполнении колодца осадок вывозится ассенизаторской машиной.

Таблица 5. 1. **Исходные данные для оценки экономической эффективности опреснительной станции**

№ п/п	НАИМЕНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ	Значение
	Производительность станции:	
1	Производительность по пресной воде	2500 м <sup>3</sup> /сут
2	Производительность по морской соли	85 т/сут
3	Бутилированная вода	120 тыс. бут/сутки
4	Себестоимость газа	0,01 €/м <sup>3</sup>

Очищенная вода из усреднительной емкости насосами подается на 5 опреснительных модулей производительностью 500 м<sup>3</sup>/сутки каждый. Образующийся в процессе опреснения концентрированный рассол направляется на открытую площадку в бассейны, где под действием солнца происходит испарение воды. В результате на дне бассейна образуется слой морской соли. Далее соль собирается, фасуется и отправляется потребителю. Размер площадки с соляными бассейнами - 110x110 м.

Вода с опреснительных модулей поступает в усреднительную емкость пресной воды, из которой она подается насосами на напорные фильтры для доочистки, далее вода проходит станцию ультрафиолетового обеззараживания и поступает на блок регулирования степени минерализации. Далее пресная вода поступает в сеть городского водопровода и на линию розлива бутилированной воды.

Габаритные размеры здания опреснительной станции (с учетом линии розлива): 20x55x8 м. Размер необходимого участка с учетом площадки под соляные бассейны – 110x145 м.

#### Состав помещений:

- Блок первичной механической очистки – 14x8x5 м;
- Блок опреснения – 20x22x8 м;
- Блок доочистки опресненной воды с фильтрами и УФ – обработкой, корректировка солевого состава питьевой воды – 12x13x5 м;
- Помещение для линии розлива воды по бутылкам – 12x20x5 м;
- Котельная (2 паровых котла и 2 электрогенератора) – 11x8x5 м;
- Помещение оператора, раздевалки, с/у, подсобные помещения – 6x8x5 м;

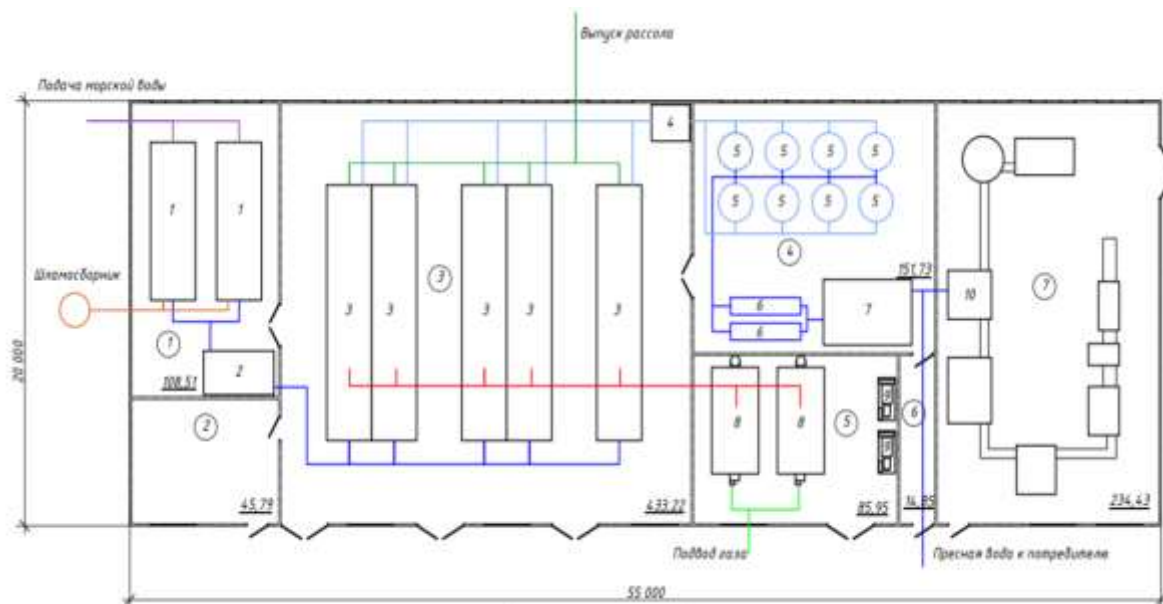


Рисунок 5.1. Станция опреснения морской воды производительностью **2500 м<sup>3</sup>/сутки**: 1 – фильтровальные установки барабанного типа; 2 – усреднительная емкость пресной воды; 3 – модуль опреснения; 4- усреднительная емкость пресной воды; 5 – напорные фильтры; 6 – станция ультрафиолетового обеззараживания; 7 – станция регулирования степени минерализации; 8 – паровой котел; 9 – электрогенератор; 10 – линия розлива

Конструкция здания опреснительной станции включает в себя:

- фундаменты: монолитная плита по грунту;
- металлокаркасное здание;
- скатная кровля из профлиста;

- стены из профлиста;
- ПВХ окна;
- металлические двери.

Общая стоимость реализации проекта:

– стоимость станции опреснения – 8,5 млн. Евро (комплект оборудования, включая здание без устройства фундаментов, с учетом доставки, монтажа и пусконаладочных работ).

– ориентировочные расходы на устройство фундаментов - 0,04 млн. Евро.

– расходы на устройство испарительной площадки - 0,2 млн. Евро (т.к. затраты зависят от рельефа участка и типа грунта, основания принимаем максимально возможный объем затрат).

Общий объем капитальных затрат – 8,74 млн. Евро (без учета стоимости земли и подводки коммуникаций).

К годовым издержкам опреснительной станции относятся:

- издержки на заработную плату;
- издержки на сервисное обслуживание;
- издержки на топливо;
- издержки на оплату электроэнергии;
- издержки на грузоподъемную технику.

При определении расходов на оплату труда, включаемых в необходимую валовую выручку, регулирующие органы определяют размер фонда оплаты труда в соответствии с отраслевыми тарифными соглашениями, заключенными соответствующими организациями, и фактическим объемом фонда оплаты труда в последнем расчетном периоде регулирования.

Годовой фонд оплаты труда включает фонд оплаты по действующим на предприятии тарифным ставкам и окладам (тарифный фонд), различные виды доплат к тарифному фонду (за работу в ночные часы, за работу в праздничные дни, за сверхурочную работу и др.), премии (в том числе в виде натуроплаты), средства на оплату основных и дополнительных отпусков, дней выполнения

государственных и общественных обязанностей (дополнительная зарплата), вознаграждения за выслугу лет и ряд других выплат [109].

Необходимый обслуживающий персонал.

Инженерно-технические работники (ИТР):

- модуль опреснения – 2 человека в смену.
- линия розлива – 2 человека в смену.

Всего инженерно-технических работников (ИТР) – 16 человек.

Солесбор, погрузка соли и бутилированной воды:

Разнорабочие – 8 человек в смену.

Всего – 32 человека.

Издержки на заработную плату, €/год

$$I_{\text{зн}} = Z_{\text{cp}} \cdot R \cdot 12 \cdot K_{\text{соц}}, \quad (5.4)$$

где  $Z_{\text{cp}}$  – средняя заработная плата, €/мес., принимаем для ИТР  $Z_{\text{cp1}} = 500 \text{ €/мес.}$

для разнорабочих  $Z_{\text{cp2}} = 300 \text{ €/мес.}$ ;  $R$  – штатное количество работников, чел.;

$K_{\text{соц}}$  – коэффициент, учитывающий отчисления в страховые социальные фонды.

Расчет амортизационных отчислений ведется в соответствии с Постановлением Правительства РФ от 1 января 2002 г. N 1 «О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» [110].

Затраты на амортизацию, €/год:

$$I_a = \frac{K}{\tau_{\text{ши}}}, \quad (5.5)$$

где  $K$  – капитальные затраты на строительство опреснительной станции, млн. €.;  $\tau_{\text{ши}}$  – срок полезного использования опреснительной станции, лет.

В расчетах принимается срок полезного использования опреснительной станции 10 лет.

При определении расходов на проведение ремонтных работ учитываются:

- 1) нормативы расходов (с учетом их индексации) на ремонт основных средств;
- 2) цены на сырье, материалы, запчасти для проведения ремонтных работ;

3) программы проведения ремонтных работ, обеспечивающих надежное и безопасное функционирование производственно-технических объектов и предотвращение аварийных ситуаций, утвержденные в установленном порядке.

Затраты на ремонты определяются как доля от фонда амортизации.

$$I_p = I_a \cdot K_{\text{рем}}, \quad (5.6)$$

где  $K_{\text{рем}}$  – проценты от фонда амортизации

Стоимость электроэнергии на производственные нужды опреснительной станции:

$$I_{\text{э/э}} = W_{\text{год}} \cdot C_{\text{э/э}} \quad (5.7)$$

где  $W_{\text{год}}$  – годовой расход электроэнергии, кВт·ч/год;  $C_{\text{э/э}}$  – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, принимаем  $C_{\text{э/э}} = 0,03 \text{ €/}(кВт·ч)$ .

Потребность в электроэнергии опреснительной станции составляет 800 тыс. кВт·ч./год.

Годовой расход натурального топлива опреснительной станции при производительности 2500 м<sup>3</sup>/сут составляет 1752 тыс. м<sup>3</sup>/год.

Годовые затраты на топливо, сжигаемое на опреснительной станции, тыс. €/год:

$$I_t = B_t \cdot C_t, \quad (5.8)$$

где  $B_t$  – годовой расход натурального топлива, м<sup>3</sup>/год;  $C_t$  – цена 1 тыс. м<sup>3</sup> натурального топлива, принимаем  $C_t = 0,01 \text{ €/м}^3$ .

Расходы на грузоподъемную технику (1 погрузчик + 1 самосвал для складирования и вывоза соли) – 182,5 тыс. €/год (из расчета по 500 Евро/сут.).

Суммарные издержки, €/год:

$$I_{\text{сум}} = I_{\text{топл}} + I_{\text{э/э}} + I_{\text{т}} + I_{\text{ам}} + I_{\text{рем}} + I_{\text{з.п.}}, \quad (5.9)$$

Результаты расчета себестоимости сведены в таблице 5.2.

Расчет доходов от производства:

– Пресная вода – 912 500 м<sup>3</sup>/год на сумму 0,1852 млн. € (из расчета по 0,203 € с продажи м<sup>3</sup>).

- Морская соль – 31 025 тон/год на сумму 3,723 млн. € (из расчета по 0,12 €/кг).
- Бутилированная вода - 40 млн. бутылок в год (Сортамент бутылок от 0,25 до 2 л.) – 8 млн. €/год (из расчета, что средняя чистая прибыль на 1 бутылку – 0,2 € (с учетом всех затрат на производство)).

Итого годовой оборот составит: 11,9723 млн. €.

**Таблица 5.2. Структура издержек производства опреснительной станции**

<b>Статьи годовых издержек опреснительной станции</b>	<b>Издержки производства, тыс. €/год</b>	<b>Затраты производство пресной воды, €/м<sup>3</sup></b>	<b>Удельный вес затрат, %</b>
Стоимость топлива	17,52	0,0192	1,263
Стоимость электроэнергии	24,0	0,0263	1,730
Фонд оплаты труда рабочих с начислениями	274,56	0,3009	19,796
Фонд амортизации	874	0,9578	63,013
Затраты на текущие и капитальные ремонты	14,858	0,0163	1,072
Расходы на грузоподъемную технику	182,5	0,2000	13,158
<b>Итого</b>	<b>1387,438</b>	<b>1,5200</b>	<b>100</b>

Для оценки экономической эффективности проектов определяются следующие показатели эффективности капитальных вложений:

- чистый доход;
- чистый дисконтированный доход;
- индексы доходности затрат и инвестиций;
- срок окупаемости.

Годовой чистый доход от проекта, €/год

$$D = П \cdot (1 - N_{\pi}) + I_a, \quad (5.10)$$

где П – прибыль от продажи пресной воды и морской соли, €/год;  $N_{\pi}$  – налог на прибыль, для Алжира  $N_{\pi} = 8,3\%$ ;  $I_a$  – фонд амортизации, €/год. В рассматриваемом случае годовой доход составляет 11 852, 6 тыс. €/год.



Чистый доход (ЧД, Net Value, NV), то есть накопленный эффект (сальдо денежного потока) за расчетный период, €,

$$\text{ЧД} = \sum_t^{\text{T}_ж} \Phi_t, \quad (5.11)$$

где суммирование распространяется на все шаги расчетного периода (срок жизни проекта). ЧД составляет 118,520 млн. €.

Важнейшим показателем эффективности проекта является чистый дисконтированный доход (ЧДД, Net Present Value, NPV), который рассчитывается по формуле, €,

$$\text{ЧДД} = \sum_t^{\text{T}_ж} \Phi_t \cdot \alpha_t(E), \quad (5.12)$$

Так как проект предполагает одномоментное (в течение года) вложение денежных средств (капитальных вложений), то чистый дисконтированный доход проекта рассчитывается по формуле, €

$$\text{ЧДД} = \frac{Д \cdot (1 - (1+R)^{-\text{T}_ж})}{R} - К; \quad (5.13)$$

где  $R$  – ставка дисконта, % . Для данного проекта ЧДД составляет 50 845 тыс. €. Проект является эффективным, т.к.  $\text{ЧДД} > 0$

Внутренняя норма доходности проекта (ВНД, внутренняя норма рентабельности, Internal Rate of Return, IRR) проекта осуществляется методом итераций по формуле:

$$\text{ВНД} = R_{\min} + \frac{\text{ЧДД}_{R_{\min}}}{\text{ЧДД}_{R_{\min}} - \text{ЧДД}_{R_{\max}}} \cdot (R_{\max} - R_{\min}), \quad (5.14)$$

где  $R_{\min}$  – норма дисконта, при которой ЧДД принимает любое положительное значение, желательно близкое к нулю, доли, %;  $R_{\max}$  – норма дисконта, при которой ЧДД принимает любое отрицательное значение, желательно близкое к нулю, доли, %;  $\text{ЧДД}_{R_{\min}}$ ,  $\text{ЧДД}_{R_{\max}}$  – чистый дисконтированный доход при  $R_{\min}$  и  $R_{\max}$ , €. Для данного проекта ВНД составляет 137,16 %.

Для оценки эффективности значение ВНД необходимо сопоставлять с нормой дисконта  $R$ . Инвестиционные проекты, у которых  $\text{ВНД} > R$ , имеют положительный ЧДД и являются эффективными. Проекты, у которых  $\text{ВНД} < R$ , имеют отрицательный ЧДД и поэтому экономически не целесообразны. Т.к.  $\text{ВНД} > R$ , то проект является эффективным.

Для упрощения расчетов дисконтированного срока окупаемости используется (так как капитальные вложения в проект одномоментны и поступления денежных средств примерно одинаковы на протяжении всего срока жизни проекта) следующая формула, лет:

$$\tau_{\text{р диск}} = \frac{\text{Ln}\left(\frac{D}{D - K \cdot R}\right)}{\text{Ln}(1+R)}; \quad (5.15)$$

Проект является экономически эффективным, так как срок окупаемости проекта составляет 10,5 месяцев.

Так как проект предполагает одномоментное (в течение года) вложение денежных средств (капитальных вложений), то индекс доходности будет определяться следующим образом:

$$\text{ИД} = \frac{D \cdot \left(1 - (1+R)^{-T_{\text{ж}}}\right)}{K \cdot R}; \quad (5.16)$$

Индекс доходности проекта опреснительной станции составляет 6,54 €/ €. Расчет показал, что данный проект экономически эффективен.

### ***5.1.2. Оценка влияния производительности опреснительной станции на показатели экономической эффективности***

Для исследования влияния производительности опреснительной станции на показатели экономической эффективности был проведен расчет для опреснительной станции производительностью 5000 м<sup>3</sup>/ч.

С возрастанием производительности станции капитальные затраты увеличиваются до 11,44 млн. €, суммарные издержки до 1 859,54 тыс. €, а доход

– 15,64 млн. €. Показатели эффективности опреснительной станции производительностью 5000 м<sup>3</sup>/сут приведен в таблице 5.3.

**Таблица 5.3. Сравнение экономических показателей опреснительных станций производительностью 2500 и 5000 м<sup>3</sup>/сут.**

Экономические показатели	Производительность станции, м <sup>3</sup> /сутки	
	2500	5000
ЧДД, млн. €	50,8	66,3
ИД, млн. €/млн. €	6,54	6,73
Срок окупаемости, месяцев	10,5	10
Капитальные затраты, млн. €	8,74	11,44
Суммарные издержки, тыс. €	1387,4	1859,54
Себестоимость производства 1 м <sup>3</sup> пресной воды, €	1,52	1,02

Таким образом, наиболее рентабельным вариантом является возведение опреснительных станций большей производительности, так как в данном случае повышается экономическая эффективность проекта.

### **Выводы по пятой главе**

1. Выполнен технико-экономический расчет опреснительной станции, функционирующей на базе опреснительных установок гигроскопического типа, производительностью 2500 и 5000 м<sup>3</sup>/сут для условий Алжира, который показ, что данный проект является экономически эффективным.

2. Проведено исследование влияния производительности опреснительной станции на экономические показатели. Для опреснительной станции на базе гигроскопических установок увеличение производительности в 2 раза приводит к снижению себестоимости производства 1 м<sup>3</sup> пресной воды на 33%.

Материалы пятой главы опубликованы в работах [113,125].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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/м<sup>3</sup> пресной воды, а для установок с компрессией ПВС от 6 до 30 кВт·ч/м<sup>3</sup> 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 теплоты 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Шилова, Н.Д.** Инновационный фактор как средство преодоления дефицита пресной воды: пример Израиля: специальность 08.00.14 «Мировая экономика»: дис. на соискание уч. степени к. э. н. / Н.Д. Шилова. – Москва, 2011 – 160 с.
2. **Акимов, А. В.** Общество и технологии в XXI веке: прогнозы и управление развитием в странах Востока и Запада : монография / А. В. Акимов, А. И. Яковлев. — Москва : ИСВ, 2020. — 400 с.
3. **Русанов, А. М.** Современные проблемы экологии и природопользования : учебное пособие / А. М. Русанов, М. А. Булгакова. — Оренбург : ОГУ, 2017. — 133 с.
4. **Игнатов, С. Б.** Современная научная картина мира : учебник / С. Б. Игнатов, В. А. Игнатова. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2010. — 240 с.
5. **Вольвак, С. Ф.** Гидравлика / С. Ф. Вольвак. — Белгород : БелГАУ им.В.Я.Горина, 2018 — Часть 2 : Гидромеханизация сельскохозяйственных процессов — 2018. — 198 с.
6. **Омельчук, Ю. А.** Использование новых реагентов и технологий в промышленном водопользовании : монография / Ю. А. Омельчук, Г. В. Кучерик. — Севастополь : СевГУ, 2020. — 276 с.
7. **Наумова, Л. Г.** Глобальные экологические проблемы человечества : учебное пособие / Л. Г. Наумова, Р. М. Хазиахметов, Б. М. Миркин. — Уфа : БГПУ имени М. Акмуллы, 2015. — 141 с.
8. **Бондарев, И. А.** Дефицит и нерациональное использование водных ресурсов как планетарная проблема / И. А. Бондарев // Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности– Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2020. – С. 136-138.
9. **Филина, Ю. П.** Проблема пресной воды как структурный фактор мировой экономики / Ю. П. Филина, К. О. Зайцева // Экономика и бизнес: теория и практика. – 2018. – № 4. – С. 258-261.
10. **Medeazza, Gregor,** Water Desalination as a long-term sustainable solution to alleviate global freshwater scarcity? A North-South approach / Meerganz Medeazza Gregor // Desalination : International Journal of the Science and Technology of Water Desalting. - 2004. - 165. - С. 71-72.

11. **Бояркина, О. А.** Проблемы и перспективы урегулирования международных конфликтов в сфере водопользования в центральноазиатском регионе : специальность 23.00.04 "Политические проблемы международных отношений, глобального и регионального развития" : дис. на соискание уч. степени к. пол. н / О. А. Бояркина. – Москва, 2015. – 160 с.
12. **Никифоров, А.Ф.** Экологические основы охраны водных ресурсов : учебное пособие /А. Ф. Никифоров, А. С. Кутергин, В. С. Семенищев, С.В. Никифоров.– Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019.— 192 с.
13. **Афонин, В.В.** Водохозяйственные системы и водопользование: / В.В. Афонин – Саратов, Изд-во Саратов. ун-та, 2016. – 103 с.
14. **Вернадский, В.И.** История природных вод / В.И. Вернадский, С.Л. Шварцев, Ф.Т. Яншина. – М.: Наука, 2003. – 750 с.
15. **Энциклопедия** статистических терминов в 8 т. Т. 6. Статистика окружающей природной среды и природоиспользования / Федеральная служба государственной статистики – М. Энциклопедия, 2011. – 150 с
16. **Bruinsma J.** The resource outlook to 2050. FAO Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. Rome, 2009. 33 p.
17. **Review** of world water resources by country. Water Report 23. Food and Agricultural Organization of the UN. Rome, 2003. 127 p.
18. **Мосин, О. В.** Физико-химические основы опреснения морской воды / О. В. Мосин // Сознание и физическая реальность. – 2012. – Т. 17. – № 1. – С. 19-30.
19. **Григорьев, Л. М.** Мировая экономика в начале XXI века : учебное пособие / Л. М. Григорьев ; науч. рук. Л. М. Григорьев. – Москва : Директ-Медиа, 2013. – 928 с.
20. **Россия** и страны мира. 2018: Стат.сб./Росстат. - М.: 2018. – 375 с.
21. **Крапивина, А.И.** Микроанализ состояния водных ресурсов / А. И. Крапивина, И. В. Мальцева, Т. С. Тихонова, Б. Сайфидинов // Тенденции развития науки и образования. – 2019. – № 50-5. – С. 8-10.
22. **Хоменко, Т. Ю.** Анализ решений проблемы дефицита питьевой воды в городе Севастополе / Т. Ю. Хоменко, Г. А. Сигора // Современные технологии: проблемы и перспективы – Севастополь: ФГАОУВО "Севастопольский государственный университет", 2021. – с. 169-175.

23. **Егорова, Г. И.** Актуальные проблемы химии, химической технологии, экологии : учебное пособие / Г. И. Егорова. — Тюмень : ТюмГНГУ, 2011. – 200 с.
24. **Маркин, В. Н.** Эколого-экономическая оценка водных объектов : учебное пособие / В. Н. Маркин. – Москва : РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2016. –128 с.
25. **Кривицкий С.В.,** Опекунова Н.А. К вопросу формирования природно-техногенной системы водоотведения поверхностных стоков// Вестник МГСУ. 2010. №4(2). С. 170- 174.
26. **Семёнов, И.Е.** Проблема нехватки пресной воды и пути её решения// Сантехника, отопление, кондиционирование. 2015. №12(168). С. 36-41.
27. **Калиев, А.Ж.,** Дамрин А.Г. О некоторых направлениях оптимизации искусственных водоёмов Южного Урала// Вестник оренбургского государственного университета. 2013. №10(159). С. 311-314.
28. **Ларионов, В. Г.** Современное состояние мировых водных ресурсов и основные направления по увеличению их доступности / В. Г. Ларионов, Е. Н. Шереметьева // Известия Иркутской государственной экономической академии. – 2015. – Т. 25. – № 4. – С. 590-596.
29. **Орлов, Н. С.** Техничко-экономическое обоснование разработки систем опреснения на основе традиционных и возобновляемых энергоресурсов / Н. С. Орлов, С. И. Анисимов // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2018. – № 1(53). – С. 95-112.
30. **Горшкалев, А. А.** Анализ современных опреснительных установок и критерии их сравнения / А. А. Горшкалев, Е. В. Благин, А. А. Шиманов // Наука и инновации - современные концепции– Москва: Инфинити, 2020. – С. 105-111.
31. **Клименюк И.В.** Судовые опреснительные установки: учеб. пособие / И.В. Клименюк. – Владивосток: Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2011. – 210 с
32. **Слесаренко, В.Н.** Опреснительные установки / В.Н. Слесаренко. – Владивосток: ДВГМА, 1999. – 244 с.
33. **Слесаренко, В.Н.** Опреснение морской воды. / В.Н. Слесаренко. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 278с.
34. **Слесаренко В.Н.** Дистилляционные опреснительные установки/ В.Н. Слесаренко. – М.: Энергия, 1980. – 248 с.



35. **Колодин, М.В.** Опреснение воды замораживанием / М.В. Колодин – Ашхабад: Ылым, 1977. – 122 с.
36. **Дытнерский Ю.И.** Обратный осмос и ультрафильтрация./ Ю.И. Дытнерский – М.: Химия, 1978. – 352 с.
37. **Каримов, Т. Х.** Экономическая эффективность опреснения воды электролизом / Т. Х. Каримов, к. Н. Байгазы // Наука, техника и образование. – 2019. – № 4(57). – С. 34-37.
38. **Бирюк, В.В.** Анализ методов и принципов работы установок для опреснения морской воды в Крымском регионе / В. В. Бирюк, Е. В. Благин, А. А. Горшкалев [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. – 2016. – № 4(100). – С. 18-22. – EDN POARTJ.
39. **Андреев Е.И.** Расчет тепло- и массообмена в контактных аппаратах / Е.И. Андреев. – Л: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1985. – 192 с.
40. **Коваленко, В.Ф.** Судовые водоопреснительные установки/ В.Ф. Коваленко, Г.Я. Лукин. – Л.:Судостроение, 1970. – 304.
41. **Бирюк, В.В.** Анализ методов и принципов работы установок для опреснения морской воды в Крымском регионе / В. В. Бирюк, Е. В. Благин, А. А. Горшкалев [и др.] // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. – 2016. – № 4(100). – С. 18-22.
42. **Аверкин А.Г.** I-d диаграмма влажного воздуха и ее применение при проектировании технических устройств/А.Г. Аверкин. – СПб.: Лань, 2016. – 192 с.
43. **Апельцин, И.Э.** Опреснение воды/ И.Э. Апельцин, И.Э. Клячко. – М.: Стройиздат. – 1968. – 158 с.
44. **Лебедев, П.Д.** Теплоиспользующие установки промышленных предприятий/ П.Д. Лебедев, А.А. Щукин. Учеб. пособие. – Москва, 1970. – 408 с.
45. **Воронец, Д.В.** Влажный воздух: термодинамические свойства и применение/Д. Воронец, Д. Козич. Пер. с сербохорв. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 136 с.
46. **Бурцев, С.И.** Влажный воздух. Состав и свойства/С.И. Бурцев, Ю.Н. Цветков. Учеб. пособие. – СПб.:СПбГАХПТ, 1998. – 146.
47. **Баранников, Н.М.** Расчеты параметров влажного воздуха для пневматических и вентиляционных установок и кондиционеров/ Н.М. Баранников. М., «Недра», 1975 – 272 с.

48. **Кузнецов, Ю.В.** Сжатый воздух/ Ю.В. Кузнецов, М.Ю. Кузнецов. Екатеринбург: УрОРАН, 2007. – 511 с.
49. **Зубарев, В.Н.** Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях /В.Н. Зубарев, А.Д. Козлов, В.М. Кузнецов и др. – М.:Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
50. **Малков М.П.** Справочник по физико-техническим основам криогеники./М.П. Малков, И.Б. Данилов, А.Г. Зельдович.– М.: Энергия, 1973. – 392 с.
51. **Погосян Х.П.** Атмосфера Земли./ Х.П. Погосян, З.Л. Туркетти – М.: Просвещение, 1970 – 320 с.
52. **Щербань А.Н.** Свойства влажного воздуха при давлениях 500-1000 мм.рт.ст./ А.Н. Щербань, О.А. Кремнев, Н.М. Титова. – М.: Государственное научно-техническое издательство по горному делу. 1960. – 132 с.
53. **Михайловский, Г.А.** Термодинамические расчеты процессов парогазовых смесей./Г.А. Михайловский – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр.отд-ние, 1985. – 184 с.
54. **Королев, Б.И.** Основы вакуумной техники/ Б.И. Королев. – Л.: Энергоатомиздат. . Ленингр.отд-ние, 1958. – 380 с.
55. **Литвин, А.М.** Техническая термодинамика. / А.М. Литвин. – М.: Государственное энергетическое издательство. 1947. – 388 с.
56. **Янчуковская, Е. В.** Моделирование массообменных процессов в химической технологии. Примеры и задачи : учебное пособие / Е. В. Янчуковская. – Иркутск : ИРНТУ, 2019. – 138 с.
57. **Прохоров, В. И.** I-d-диаграммы влажного воздуха для переменных давлений / В. И. Прохоров. – Москва : Книга, 1973. – 30 с.
58. **Пыжов, В.К.** Энергетические системы обеспечения жизни и деятельности человека: учебное пособие / В.К. Пыжов. - ФГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008. – 496 с.
59. **Лукин, Г. Я.** Опреснительные установки промыслового флота/ Г.Я. Лукин, Н.Н. Колесник. – Москва: Пищевая промышленность, 1970. – 368 с.
60. **Безруков, Ю.Ф.** Океанология. Часть I. Физические явления и процессы в океане/Ю.Ф. Безруков. – Симферополь: Таврический национальный университет им. В.И.Вернадского, 2006. – 159 с.

61. **Архипкин, В.С.** Основы термодинамики морской воды/ В.С.Архипкин, С.А. Добролюбов. – М. : Диалог-МГУ, 1998. – 154 с.
62. **Доронин, Ю.П.** Физика океана/В.В. Богородский, А.В. Гусев, Ю.П. Доронин, Л.Н. Кузнецова, К.С. Шифрин. – М.: Стройиздат – 1978. – 197 с.
63. **Позин, М.Е.** Пенные газоочистители и абсорберы./ М.Е. Позин, И.П. Мухленов, Э.Я. Тарат – Л.: Гос-химиздат. – 1959 – 122 с.
64. **Газизов, Т. Х.** Станция по опреснению морской воды с использованием возобновляемых источников энергии / Т. Х. Газизов, И. Б. Мельникова // Экология урбанизированных территорий. – 2014. – № 3. – С. 37-42.
65. **Сарыев, К. А.** Комплексное проектирование энергосберегающей солнечной водоопреснительной установки / К. А. Сарыев, М. Г. Аллабердиева // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. – 2020. – № 3/4(82-83). – С. 81-86.
66. **Алван, Н.Т.** Экспериментально-теоретическое исследование опреснения воды с использованием солнечной энергии: специальность 05.14.08 «Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии»: дис. на соискание уч. степени к. т. н / Н.Т. Алван. – Екатеринбург, 2021 – 207 с.
67. **Рахматулин, И.Р.** Разработка комплексной энергоэффективной солнечной опреснительной установки с системой слежения за солнцем: специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»: дис. на соискание уч. степени к. т. н / И.Р. Рахматулин. – Челябинск, 2015 – 132 с.
68. **Кирпичникова, И. М.** Опреснение воды с использованием энергий ветра и Солнца / И. М. Кирпичникова // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2012. – № 16(275). – С. 22-25.
69. **Чебоксаров, В. В.** Комплекс опреснения воды на базе ветроэнергетических морских установок для ликвидации чрезвычайной ситуации в водоснабжении северного Крыма / В. В. Чебоксаров // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2017 – Севастополь: ФГАОУ ВО "Севастопольский государственный университет", 2017. – С. 1488-1491.
70. **Мионов, В.В.** Исследование опытных образцов устройств получения пресной воды для автономного водоснабжения с использованием солнечной энергии

/ В. В. Миронов, Е. А. Жернаков, Ю. А. Иванюшин, Д. В. Миронов // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. – 2021. – № 2(17). – С. 48-58.

71. **Panchal, H.N.** Теоретическое и экспериментальное обоснование эффективности солнечного опреснителя с трубчатым вакуумированным солнечным коллектором / H.N. Panchal, H. Thakkar // Теплоэнергетика. – 2016. – № 11. – С. 74-80.

72. **Кострица, В.Н.** Технология и установка опреснения воды с применением ветроэнергетического агрегата / В. Н. Кострица, А. С. Камруков, В. В. Багров, В. И. Крылов // Безопасность в техносфере. – 2016. – Т. 5. – № 6. – С. 48-52.

73. **Аборнев, Д. В.** Динамические характеристики катионитных фильтров в процессе умягчения высокоминерализованных вод : монография / Д. В. Аборнев. – Ставрополь : СКФУ, 2015. – 102 с.

74. **Денисов, В.В.** Основы природопользования и энергоресурсосбережения : учебное пособие / В. В. Денисов, И. А. Денисова, Т. И. Дровозова, А. П. Москаленко – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 408 с.

75. **Щур, А.В.** Энергосбережение : учебное пособие / А. В. Щур, Н. В. Бышов, Н. Н. Казаченок. – Рязань : РГАТУ, 2020. – 260 с.

76. **Лемешко, М. А.** Энергоэффективный метод опреснения морской воды / М. А. Лемешко, И. В. Умнов // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2021. – № 11(53). – С. 221-224.

77. **Янтовский, Е.И.** Промышленные тепловые насосы/ Е.И. Янтовский, Л.А. Левин.- М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.: ил.

78. **Соколов, Е.Я.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: учеб. пособие. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.

79. **Козлова, М. В.** Оценка эффективности работы пароконденсационных теплонасосных установок / М. В. Козлова, А. Г. Барышева // Энергия-2018 : Тринадцатая межд. научн.-техн. конференция студентов, аспирантов и молодых ученых– Иваново: ФГБОУВО "Ивановский гос. энергетич. ун-т им. В.И. Ленина".— 2018. – Т.1. – с.128 – 128.

80. **Дудник, Н. М.** Моделирование процесса пленочной конденсации пара из парогазовых смесей различного состава на наружной поверхности вертикальных труб теплообменного аппарата / Н. М. Дудник, А. Б. Горяев // Теплоэнергетика. – 2010. – № 6. – С. 63-68.

81. **Артемов, В.И.** Моделирование конденсации пара из парогазовой смеси на поверхности трубного пучка из гладких труб / В. И. Артемов, К. Б. Минко, Г. Г. Яньков, О. О. Мильман // Труды седьмой Российской национальной конференции по теплообмену : – Москва: Издательский дом МЭИ, 2018. – С. 16-18.

82. **Минко, К.Б.** Инженерная модель конденсации пара из движущейся парогазовой смеси на поверхности пучка из гладких горизонтальных труб / К. Б. Минко, Г. Г. Яньков, В. И. Артемов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2021. – № 9. – С. 51-63.

83. **Школа, В. В.** Разработка методики расчета тепло- и массообмена при конденсации пара из вынужденного потока парогазовой смеси на пластине : специальность 01.04.14 "Теплофизика и теоретическая теплотехника" : дис. на соискание уч. степени к.т. н. / Школа В. В. – Москва, 1984. – 133 с.

84. **Дудник, Н. М.** Исследование процесса конденсации водяного пара из парогазовых смесей различного состава в кожухотрубных теплообменных аппаратах : специальность 05.14.04 "Промышленная теплоэнергетика" : автореферат дис. на соискание уч. степени к.т.н. / Дудник Наталия Михайловна. – Москва, 2010. – 20 с.

85. **Баулов, Б.Ф.** Теплоотдача при конденсации чистого пара и пара из парогазовой смеси внутри труб теплообменника СПОТ ПГ АЭС-2006 / Б. Ф. Баулов, В. А. Ильин, А. А. Щеглов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2017. – № 1. – С. 31-38.

86. **Соколовская, И.Ю.** Полный факторный эксперимент / И.Ю. Соколовская // Методические указания для самостоятельной работы студентов. – Новосибирск: НГAVT, 2010. – 36 с.

87. **Спирин, Н.А.** Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Конспект лекций (отдельные главы из учебника для вузов)/Н.А. Спирин, В.В. Лавров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ. – 2004 – 257 с.

88. **Парфёнова, Г.К.** Антропогенные изменения гидрохимических показателей качества вод. – Томск.: Аграф-пресс. – 2010. – 204 с.

89. **Ермаков, С.М.** Математическая теория планирования эксперимента/ С.М. Ермаков, В.З. Бродский– М.: ФИЗМАТЛИТ. – 1983. – 392 с.

90. **Мухачев, В.А.** Планирование и обработка результатов эксперимента. – Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники: Томск. – 2007. – 118 с.

91. **Лаптев, А.Г.** Модели пограничного слоя и расчет тепломассообменных процессов : Монография. – Казань : Изд-во Казанского университета, 2007. – 500 с.
92. **Федорова, Н.Н.** Основы работы в ANSYS 17 / Н. Н. Федорова, С. А. Вальгер, М. Н. Данилов, Ю. В. Захарова. — Москва : ДМК Пресс, 2017. — 210 с.
93. **Алямовский, А.А.** Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. Москва: ДМК Пресс, 2010. – 464 с
94. **Быков, М.А.** Определение гидравлических характеристик ТВС-2М с использованием программных комплексов STAR-CD и ANSYS CFX / М.А. Быков, А.М. Москалев, А.В. Шишов, О.В. Белова и др. // МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2007г.
95. **Лебедев, В.И.** Моделирование физических процессов технических устройств в программе COMSOL Multiphysics: учебное пособие / В. Д. Лебедев, А. А. Яблоков ; Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУВПО "ИГЭУ им. В. И. Ленина".—Иваново: Б.и., 2013.—328 с.
96. **Коваленко, А.В.** Математическое моделирование физико-химических процессов в среде Comsol Multiphysics 5.2: Учебное пособие. /А.В. Коваленко, А.М. Узденова, М.Х. Уртеннов., В.В. Никоненко. – Спб.:Издательство «Лань», 2017. – 228 с.
97. **Кондранин, Т.В.** Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа: Учебное пособие/Т.В. Кондранин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова, А.В. Евдокимов, А.П. Зуев — М.: МФТИ, 2005. — 104 с.
98. **Красников, Г.Е.** Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: учеб. пособие / Г.Е. Красников, О.В. Нагорнов, Н.В. Старостин. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2012. – 184 с.
99. **Аксенов, А.А.** Пакет прикладных программ Flow Vision / А.А. Аксенов, А.В. Гудзовский // М.: МФТИ., сер. Аэрофизика и прикладная математика. – 1998. – С. 45–56.
100. **FlowVision.** Руководство пользователя, версия 3.08.03. – 2012 г.
101. **Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М.** Методы интенсификации и моделирования тепломассообменных процессов. Учебно-справочное пособие. – М.: «Теплотехник», 2011. – 335 с.
102. **Броунштейн Б.И.** Гидродинамика, массо- и теплообмен в колонных аппаратах / Б.И. Броунштейн, В.В. Щеголев. – Л.: Химия. – 1988. – 336 с.

103. **Лаптева Е.А.** Гидродинамика барботажных аппаратов / Лаптева Е.А., Лаптев А.Г. –Казань: Центр инновационных технологий, 2017. –190 с.
104. **Малышев А.А.** Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков хладагентов: Учеб.-метод. пособие./ А.А. Малышев, В.О. Мамченко, К.В. Киссер – СПб.: Университет ИТМО – 2016 –116 с.
105. **Вукалович, М.П.** Уравнение состояния реальных газов./ М.П. Вукалович, И.И. Новиков. – М.: Государственное энергетическое издательство. 1948. – 340 с.
106. **Литвин, А.М.** Техническая термодинамика. / А.М. Литвин. – М.: Государственное энергетическое издательство. 1947. – 388 с.
107. **Злобин, В.Г.** Техническая термодинамика. Часть 1. Основные законы термодинамики. Циклы тепловых двигателей: учебное пособие./ В.Г. Злобин, С.В. Горбай, Т.Ю. Короткова Т.Ю.– СПб., 2016. –146 с.
108. **Гальшева Ю.А.** Экологические факторы морской среды/ Ю.А. Гальшева – В.: Издатель-ство Дальневосточного университета. – 2009. – 99 с.
109. **Тарасова, А. С.** Экономика и управление энергетическим предприятием: методическое пособие для самостоятельной работы / А. С. Тарасова, М. В. Мошкарina. – Иваново – 2012. –60 с.
110. Постановление Правительства РФ от 1 января 2002 г. N 1 «О классификации основных средств, включаемых в амортизационные группы» [Электронный источник] / URL:<http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=342338&fld=134&dst=1000000001,0&rnd=0.7816346336523261#0036354385299137704> (Дата обращения 12.10.2021).

### **ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

#### **Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК**

- 111. 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**

112. 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.

113. 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:**

114. 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**.

115. 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**

116. 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**

117. **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.

118. **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.



119. 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.

120. 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.

121. 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.

122. 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.

123. 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.

124. **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.

125. 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.

126. **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.

127. **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.

128. 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.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

### **Протоколы лабораторных исследований пресной ВОДЫ**

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека  
 Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения  
 «Центр гигиены и эпидемиологии в Ивановской области»  
 Аккредитованный испытательный лабораторный центр  
 Юридический адрес: г. Иваново, ул. Воронина, д. 12, телефон, факс 8(4932) 234705, 8(4932) 230606  
 ОКПО 75902430 ОГРН 1053701048378 ИНН/КПП 3702068421/370201001

Аттестат аккредитации  
 №РОСС.RU.0001.510134  
 зарегистрирован в реестре  
 аккредитованных лиц 16.10.2015

УТВЕРЖДАЮ

Главный врач ФБУЗ  
 Центр гигиены и эпидемиологии  
 в Ивановской области  
 Руководитель И. Б. Букушина  
 М.П.

**ПРОТОКОЛ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
 № 2682 от « 16 » апреля 2018 г.

Наименование пробы (образца): вода из неизвестного источника

Пробы (образцы) направлены: чл Шикановым К.В.

Дата и время отбора пробы (образца): 03.04.2018 11:45

Дата и время доставки пробы (образца): 06.04.2018 11:15

Цель отбора: на соответствие требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения».

Юридическое лицо, индивидуальный предприниматель или физическое лицо, у которого отбирались пробы (образцы): чл Шиканов К.В., г. Иваново, ул. Рядовая, д. 5.

Объект, где производился отбор пробы (образца): -

Код пробы (образца):

К 06.04.18.581.1X

Изготовитель: -

Дата изготовления: 03.04.2018

Номер партии: -

Объем партии: -

Тара, упаковка: пластиковая бутылка

НД на методы отбора: ГОСТ 31861-2012; ГОСТ 31942-2012; ГОСТ Р 56237-2014 (ИСО 5667-5:2006)

Условия транспортировки: автотранспорт

Дополнительные сведения: результаты исследований, отраженные в данном протоколе распространяются только на пробы (образцы), прошедшие испытания (исследования).

Специалист ответственный за оформление протокола: И.Б. Сидорова

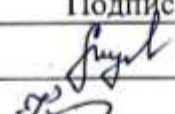
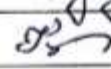
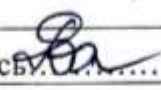
общее количество страниц 3; страница 1

Настоящий протокол не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения лаборатории

Формуляр идентификации Ф 03-05-41-01-2013

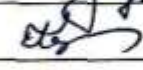

Код образца (пробы):

К 06.04.18.581.1.x

САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:					
№	Определяемые показатели	Результаты измерений	Гигиенический норматив	Единицы измерений	НД на методы измерений
1	2	3	4	5	6
1	Цветность	10,0±2,0	20	град.	ГОСТ 31868-2012
2	Мутность	4,9±1,0	1,5	мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:4.213-05
3	Водородный показатель	6,15±0,20	6-9	ед.рН	ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97
4	Окисляемость перманганатная	3,08±0,31	5,0	мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:4.154-99
5	Общая минерализация (сухой остаток)	670±60	1000	мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2.114-97
6	Жесткость общая	2,1±0,3	7,0	мг-экв/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 31954-2012
7	Сульфаты	45,1±5,0	500	мг/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 31940-2012
8	Хлориды	317,6±28,6	350	мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:3.96-97
9	Аммиак и ионы аммония	0,43±0,09	2,0	мг/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 33045-2014
10	Нитриты	0,052±0,026	3,0	мг/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 33045-2014
11	Нитраты	4,8±0,6	45,0	мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:4.4-95
12	Железо общее	0,21±0,05	0,3	мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:4.50-96
13	Марганец	0,020±0,005	0,1	мг/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 4974-2014
14	Медь	0,03±0,01	1,0	мг/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 4388-72
Исследования проводили:					
Должность		Ф.И.О.		Подпись	
Врач по сан-гиг. исследованиям		Мутовкина М.В.			
Лаборант		Корзенева Т.Д.			
Ф.И.О. заведующей лабораторией Баринкова Е.С.....				Подпись 	
				Общее количество страниц: 3 Страница: 2	
Формуляр идентификации Ф 03-05-41-01-2013					

Код образца (пробы):

К 06.04.18.581.1.x

САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:					
№	Определяемые показатели	Результаты измерений	Гигиенический норматив	Единицы измерений	НД на методы измерений
1	2	3	4	5	6
15	Молибден	0,05±0,02	0,25	мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2.47-96
16	Фторид-ионы	0,42±0,13	1,5	мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:3:4.179-2002
17	Щелочность общая	0,8±0,1	---	мг- экв/дм <sup>3</sup>	ЦВ 1.01.11-98 «А»
18	Кальций	12,0±1,3	---	мг/дм <sup>3</sup>	ПНД Ф 14.1:2:3.95-97
19	Магний	18,2±2,0	---	мг/дм <sup>3</sup>	ГОСТ 31865-2012
Наименование оборудования			Инвентарный номер	Год ввода в эксплуатацию	
Весы электронные ВСЛ-200/0,1А			01380963	2013	
Преобразователь ионометрический И-500			01350355	12.2012	
Спектрофотометр ПЭ-5400 В			01380930	05.2013	
Спектрофотометр ПЭ-5400 УФ			01381046	07.2015	
Исследования проводили:					
Должность		Ф.И.О.		Подпись	
Врач по сан-гиг. исследованиям		Мутовкина М.В.			
Лаборант		Корзенева Т.Д.			
Ф.И.О. заведующей лабораторией Баринкова Е.С.....				Подпись..... 	
			Общее количество страниц:	3	Страница <sup>3</sup>
Формуляр идентификации Ф 03-05-41-01-2013					





Код образца (пробы)

К - 09.04.18. 587. 1X

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:					
Регист- рацион- ный №	Определяемые показатели	Результат исследования	Гигиеничес- кий норматив	Единицы измерения (для граф 3,4)	НД на методы исследований
392	Общее микробное число	2	Не более 50	КОЕ/мл	МУК 4.2. 1018-01
	Общие колиформные бактерии в 100мл	Не обнаружены	Отсутствие	-	
	Термотолерантные колиформные бактерии в 100мл	Не обнаружены	Отсутствие	-	
Исследование: начало - 09.04.18г    окончание - 11.04.18г					
Исследования проводили:					
Должность		Ф.И.О.		Подпись	
Врач-бактериолог		Кропотина ТА			
Ф.И.О. заведующей лабораторией		Зайцева ЕМ		Подпись 	
Общее количество страниц <u>2</u> ; страница <u>2</u>					
Формуляр идентификации Ф 03-05-41-01-2013					

Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека  
**Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения**  
**«Центр гигиены и эпидемиологии в Ивановской области»**  
**Аккредитованный испытательный лабораторный центр**  
 Юридический адрес: г. Иваново, ул. Воронина, д. 12, телефон, факс 8(4932) 234705, 8(4932) 230606  
 ОКПО 75902430 ОГРН 1053701048378 ИНН/КПП 3702068421/370201001

УТВЕРЖАЮ  
 Главный врач ФБУЗ  
 Центр гигиены и эпидемиологии  
 в Ивановской области  
 Руководитель ИЛЦ  
 и ЭПИДЕМИОЛОГИИ  
 в ИВАНОВСКОЙ ОБЛАСТИ  
 Е. Б. Букушина  
 М.П.

**ПРОТОКОЛ ЛАБОРАТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**  
**№ 15552 от «16» апреля 2018 г.**

Наименование пробы (образца): вода из неизвестного источника

Пробы (образцы) направлены: чл Шикановым К.В.

Дата и время отбора пробы (образца): 03.04.2018 11:45

Дата и время доставки пробы (образца): 06.04.2018 11:15

Цель отбора: на соответствие требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения».

Юридическое лицо, индивидуальный предприниматель или физическое лицо, у которого отбирались пробы (образцы): чл Шиканов К.В., г. Иваново, ул. Рядовая, д. 5.

Объект, где производился отбор пробы (образца): -

Код пробы (образца):

К 06.04.18.581.1X

Изготовитель: -

Дата изготовления: 03.04.2018

Номер партии: -

Объем партии: -

Тара, упаковка: пластиковая бутылка

НД на методы отбора: ГОСТ 31861-2012; ГОСТ Р 56237-2014 (ИСО 5667-5:2006)

Условия транспортировки: автотранспорт

Дополнительные сведения: результаты исследований, отраженные в данном протоколе распространяются только на пробы (образцы), прошедшие испытания (исследования).

Специалист ответственный за оформление протокола: И.Б. Сидорова

общее количество страниц 2; страница 1

Настоящий протокол не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения лаборатории

Формуляр идентификации Ф 03-05-41-01-2013

Код образца (пробы):

К 06.04.18.581.1.x

САНИТАРНО-ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:					
№	Определяемые показатели	Результаты измерений	Гигиенический норматив	Единицы измерений	НД на методы измерений
1	2	3	4	5	6
1	Запах при 20 <sup>0</sup> С	0	2	баллы	ГОСТ Р 57164-2016
2	Запах при 60 <sup>0</sup> С	0	2	баллы	ГОСТ Р 57164-2016
Исследования проводили:					
Должность			Ф.И.О.		Подпись
Врач по сан-гиг. исследованиям			Мутовкина М.В.		
Лаборант			Корзенева Т.Д.		
Ф.И.О. заведующей лабораторией Баринкова Е.С.....					Подпись: 
				Общее количество страниц: 2	Страница: 2
Формуляр идентификации Ф 03-05-41-01-2013					

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

**Документы, подтверждающие  
практическую реализацию результатов работы**



Утверждаю»  
 Генеральный директор ООО «АКВА-ЛАЙФ»  
 Е.В. Приймак  
 2022 г.

### Акт об использовании результатов диссертационной работы

Настоящий акт составлен о том, что на ООО «АКВА ЛАЙФ» приняты к использованию следующие результаты диссертационной работы Козловой Марии Владимировны на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика»:

- 1) общая характеристика технического решения по повышению эффективности опреснительных установок гигроскопического типа путем включения в цикл их работы трансформатора тепла;
- 2) расчетные зависимости, позволяющие определять энергетические затраты опреснительной установки в зависимости от режимных параметров;
- 3) результаты исследований условий применения предлагаемого технического решения.

За счет реализации технического решения предполагается сократить материальные затраты на предварительную подготовку воды и затраты энергии на процесс опреснения за счет применения описанного в диссертационной работе технического решения.

Главный инженер ООО «АКВА ЛАЙФ»

А.С. Поволокин

УТВЕРЖДАЮ



Проректор по учебной работе

Гусенков А.В.

2022 г.

## Акт

внедрения в учебный процесс ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет» результатов диссертационной работы  
Козловой Марии Владимировны

В учебном процессе при чтении лекций, проведении практических и лабораторных занятий по дисциплинам «Энергосбережение в технологических процессах и установках предприятий и ЖКХ», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии и при выполнении научно-исследовательских работ студентами, обучающимися по направлению подготовки – «Теплоэнергетика и теплотехника» (13.03.01 и 13.04.01) используются следующие результаты научных исследований Козловой Марии Владимировны, включенные в состав ее диссертационной работы: способ повышения эффективности опреснительных установок гигроскопического типа путем включения в цикл их работы трансформаторов тепла; математическая модель процесса насыщения воздушного потока влагой при его взаимодействии с нагретой опресняемой водой; особенности расчета циклов работы опреснительных установок гигроскопического типа.

Декан теплоэнергетического факультета ИГЭУ  
к.т.н., доцент

С.Б. Плетников

Заведующий кафедрой  
«Промышленная теплоэнергетика»  
к.т.н., доцент

А.В. Банников

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

### **Объекты интеллектуальной собственности**

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 194759

## ПАРОВОЗДУШНАЯ ОПРЕСНИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Банников Александр Васильевич (RU), Соколов Павел Сергеевич (RU), Козлова Мария Владимировна (RU)*

Заявка № 2019128616

Приоритет полезной модели 11 сентября 2019 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 23 декабря 2019 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 11 сентября 2029 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

**№ 204107**

### ГИГРОСКОПИЧЕСКАЯ ТЕПЛОНАСОСНАЯ ОПРЕСНИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина" (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Банников Александр Васильевич (RU), Соколов Павел Сергеевич (RU), Козлова Мария Владимировна (RU)*

Заявка № 2020129312

Приоритет полезной модели 03 сентября 2020 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 06 мая 2021 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 03 сентября 2030 г.

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности*

ЭЛЕКТРОННО ПОДПИСАН И ЭЛЕКТРОННО ПОДПИСАНО  
Сертификат Федеральной службы по интеллектуальной собственности  
Владимир Григорий Петрович  
Действителен с 19.11.2021 по 19.01.2028

*Г.П. Илизеев*



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**СВИДЕТЕЛЬСТВО**

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2021613483****«Расчет термодинамических и теплофизических свойств  
паровоздушной смеси»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Ивановский государственный энергетический  
университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ) (RU)*

Авторы: *Банников Александр Васильевич (RU), Козлова  
Мария Владимировна (RU)*

Заявка № **2021612643**Дата поступления **02 марта 2021 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **09 марта 2021 г.**

*Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Исхиев