Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

Уральский энергетический институт Кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии»

На правах рукописи

Алхарбави Насир Тавфик Алван

Экспериментально теоретическое исследование опреснения воды с использованием солнечной энергии

05.14.08 - Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

> Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, Щеклеин Сергей Евгеньевич

«Екатеринбург – 2021»

БЛАГОДАРНОСТЬ

Во-первых, я должен выразить свою самую большую благодарность и признательность Всемогущему Аллаху за его провидческую заботу обо мне и за то, что он дал мне мужество, решимость и руководство в проведении этой исследовательской работы.

Я хотел бы выразить сердечную благодарность и признательность моему научному руководителю, профессору д-ру Щеклеину Сергею Евгеньевичу и советнику по диссертации, доценту д-ру Обеду Маджид Али за их активное руководство, постоянное вдохновение и поддержку.

Я хотел бы поблагодарить моего любимого отца за его постоянную поддержку и ободрение в моем академическом путешествии. Моя искренняя молитва обращена к Всемогущему Аллаху за душу моей покойной матери.

Моя особая благодарность и признательность моей любимой жене за ее щедрую любовь, поддержку, заботу и терпение с самого начала моего обучения. Также спасибо моим детям Сидре, Мустафе, Юсуфу и Далии.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	9
ГЛАВА 1. СОЛНЕЧНЫЕ ДИСТИЛЛЯЦИОННЫЕ	СИСТЕМЫ,
МОДИФИКАЦИИ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ	17
1.1. Общая информация	17
1.2. Дистилляция с применением солнечной энергии:	21
1.3. Методы солнечной дистилляции воды:	
1.3.1. Пассивный солнечный дистиллятор воды	
1.3.2. Активный солнечный дистиллятор воды	24
1.4. Принцип работы односкатного солнечного дистиллятора типа:	бассейнового 26
1.5. Параметры, влияющие на производительность дистиллятора:	солнечного 26
1.5.1. Метеорологические параметры	
1.5.2. Конструкционные и эксплуатационные параметры	
1.6. Методы повышения производительности и эффективност дистилляторов	ти солнечных 35
1.6.1. Добавление конденсационной установки	
1.6.2. Материалы для поглощения и аккумулирования энергии.	
1.6.3. Применение нагревательного элемента	
1.6.4. Применение вращающегося вала или цилиндра в	в солнечном
дистилляторе	
1.7. Выводы	45
1.8. Постановка проблемы	47
1.9. Цель работы:	

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА
ИССЛЕДОВАНИЯ
2.1. Введение
2.2. Экспериментальная установка с традиционным солнечным
дистиллятором (ТСД) 48
2.3. Модифицированный солнечный дистиллятор (солнечный дистиллятор на
основе применения вращающегося полого цилиндра и внешнего солнечного
коллектора (СДПЦСК)) 50
2.3.1. Солнечные дистилляторы воды и экспериментальная установка: 51
2.3.2. Плоский солнечный коллектор воды 55
2.3.3. Система солнечного электропитания и система нагрузки постоянного
тока
2.4. Солнечный дистиллятор с фотоэлектрическим диффузионно-
абсорбционным холодильником (СДДАХ)61
2.4.1. Модель диффузионно-абсорбционный холодильник (ДАХ) 62
2.4.2. Определение параметров и ход эксперимента
2.5. Солнечный дистиллятор с ультразвуковым увлажнителем (СДУУ) 65
2.5.1. Предлагаемый солнечный дистиллятор 66
2.5.2. Методика эксперимента 67
2.6. Пленочный солнечный дистиллятор с алюминиевой конденсационной
пластиной (ПСДАКП)
2.6.1. Экспериментальная установки и ее метод 69
2.7. Пленочный солнечный дистиллятор с тканевой испарительной
поверхностью и термоэлектрическим алюминиевым каналом. (ПСДТАК) 72
2.8. Методика измерений
2.8.1. Измерение температур74

2.8.2. Измерение интенсивности солнечного излучения
2.8.3. Измерение скорости ветра
2.8.4. Измерение расхода
2.8.5. Тахометр
2.8.6. Электронное измерение массы
2.9. Физические и химические тесты дистиллированной воды
2.10. Анализ экспериментальной погрешности
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕСКИХ
МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ
3.1. Введение
3.2. Полезная энергия плоского солнечного коллектора
3.3. Почасовое солнечное излучение
3.4. Солнечный дистиллятор 90
3.4.1. Облицовка емкости (bp) 92
3.4.2. Вращающийся полый цилиндр (hc)94
3.4.3. Вода в емкости (bw)
3.4.4. Крышка из оргстекла (g) 99
3.5. Почасовая совокупная производительность дистилляции Воды солнечных
дистилляторов
3.5.1. Почасовая совокупная производительность дистилляции воды
традиционного солнечного дистиллятора 103
3.5.2. Почасовая совокупная производительность дистилляции воды
модифицированного солнечного дистиллятора103
3.6. Часовой термический КПД солнечного дистиллятора 104

3.6.1. Часовой термический КПД традиционного солнечного дистиллятора
3.6.2. Часовой термический КПД модифицированного солнечного
дистиллятора104
3.7. Суточный КПД солнечного дистиллятора воды 105
3.7.1. Суточный КПД традиционного солнечного дистиллятора воды: 105
3.7.2. Суточный КПД модифицированного солнечного дистиллятора воды
3.8. Начальные и граничные условия 106
3.8.1. Начальные условия плоского солнечного коллектора воды: 106
3.8.2. Начальные условия солнечного дистиллятора воды 106
ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИСТИЛЛЯЦИИ
ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ 110
4.1. Результаты измерений параметров окружающей среды 110
4.2.1. Производительность солнечного дистиллятора при различных глубинах
воды в емкости
4.2.2. Производительность модифицированного солнечного дистиллятора
при различных скоростях вращения полого цилиндра115
4.2.3. Производительность модифицированного солнечного дистиллятора с
предварительным нагревом воды (СДПЦСК) 117
4.2.4. Производительность и Термический КПД модифицированного
солнечного дистиллятора с предварительным нагревом воды (СДПЦСК). 123
4.3. Результаты теоретической модели130
4.4. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов

4.5. Солнечный дистиллятор с фотоэлектрическим диффузионно-
абсорбционным холодильником (СДДАХ)143
4.6. Солнечный дистиллятор с применением ультразвуковых увлажнителей
(СДУУ)
4.7. Пленочный солнечный дистиллятор с алюминиевой конденсационной
пластиной (ПСДАКП)153
4.8. Пленочный солнечный дистиллятор с тканевой испарительной
поверхностью и термоэлектрическим алюминиевым каналом. (ПСДТАК). 157
4.9. Сравнение результатов данной диссертационной работы с предыдущими
исследованиями
ГЛАВА 5. ЭКОНОМИКА МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОЛНЕЧНЫХ
ДИСТИЛЛЯТОВ И КАЧЕСТВО ДИСТИЛЛИРОВАННОИ ВОДЫ 165
5.1. Оценка стоимости производства дистиллированной воды 165
5.1.1. Модифицированный солнечный дистиллятор с внешним солнечным
коллектором (СДПЦСК) 166
5.1.2. Солнечный дистиллятор с фотоэлектрическим диффузионно-
аосороционным холодильником (СДДАХ)
5.1.3. Солнечный дистиллятор с применением ультразвуковых
увлажнителей (СДУ У) 108
5.1.4. Пленочный солнечный дистиллятор с алюминиевой конденсационной (ПСЛАКП) 169
515 Пленоцици солненный листипиятор с тизнерой испарительной
поверхностью и термоэлектрическим алюминиевым каналом. (ПСДТАК). 170
5.2. Физико-химические параметры произволимой листиллированной волы
ЗАКЛЮЧЕНИЕ
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	
Приложение А	
Приложение Б	
Приложение В	
Приложение Г	
Приложение Д	

Введение

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности. Одна из самых важных проблем в мире – дефицитом воды. Возможно, большинство из нас нехватка воды не затрагивает, но от дефицита воды непосредственно страдают сотни миллионов людей каждый день своей жизни. Согласно статистике Всемирной организации здравоохранения, в 2020 году почти 800 миллионов человек не имеют ежедневного доступа к чистой воде. Почти 3 миллиона человек умирают каждый год из-за отсутствия чистой воды, и большинство из них (99%) проживает в развивающихся странах. Согласно программе Организации Объединенных Наций по окружающей среде, к 2025 году ожидается значительное усугубление дефицита пресной воды по сравнению с 1995 годом. Для получения пресной воды требуется источник энергии для преобразования соленой или неочищенной воды в пресную. Большинство крупных предприятий по опреснению воды по всему миру в качестве источника энергии используют ископаемое топливо (например, уголь, нефть и природный газ). Но это дорого, не во всех частях света доступно и оказывает негативное воздействие на окружающую среду в сравнении с возобновляемыми источниками энергии, такими как солнечная энергия. Применение солнечной энергии для опреснения морской воды является перспективным решением. Одним из практических способов применения солнечной энергии для производства пресной воды из соленой является солнечная дистилляция воды. Дистилляционный процесс включает в себя два подпроцесса – естественное испарение и естественная конденсация, в ходе которых происходит удаление примесей, таких как соли и бактерии, и получение питьевой воды. Солнечная дистилляция емкостного типа является перспективной технологией возобновляемой энергетики, которая может использоваться для производства питьевой воды с помощью солнечной тепловой энергии. Основные преимущества этих систем заключаются в простоте их конструкции, низких требованиях к обслуживанию, и безопасности эксплуатации. Тем не менее, непостоянство солнечного излучения отрицательно влияет на производительность этих систем, что приводит к их низкой производительности. Данное исследование направлено на теоретическое и экспериментальное изучение процессов термической дистилляции, получение новых знаний, способствующих расширению использования солнечной энергии в системах дистилляции необработанной воды, а также развитию методов и технологий увеличения продуктивности и эффективности малоразмерных систем солнечной дистилляции, простых в изготовлении и эксплуатации.

Повышение производительности солнечных дистилляционных установок является **актуальной** задачей для создания новых технологий и образцов техники, развивающих приоритетное направление развития науки, техники и технологий в Российской Федерации: Пункт 8 (Энергоэффективность, энергосбережение и атомная энергетика).

Объектом исследования является солнечная дистилляционная система для преобразования соленой воды в пресную.

Предмет исследования - модификация солнечного дистиллятора воды путем применения усовершенствованных методов и новых технологий испарения и конденсации.

Цель работы - теоретическое и экспериментальное исследование процессов испарения соленой воды и конденсации пара с целью модификации и применения новых технологий для повышения производительности солнечного дистиллятора при минимально возможных капитальных и эксплуатационных затратах для различных климатических условий.

Задачи исследования:

1. Создание традиционного солнечного дистиллятора (ТСД), который станет эталоном для других экспериментальных установок с точки зрения производительности.

- Разработка и создание установки для изучения возможностей повышения производительности солнечного дистиллятора на основе вращающегося полого цилиндра и внешнего солнечного коллектора (СДПЦСК).
- Разработка и создание установки для изучения возможностей повышения производительности солнечного дистиллятора путем применения в солнечном дистилляторе диффузионно-абсорбционного холодильника (СДДАХ).
- Разработка и создание установки для изучения возможностей повышения производительности солнечного дистиллятора путем применения в солнечном дистилляторе ультразвуковых увлажнителей (СДУУ).
- 5. Разработка и создание установки пленочного солнечного дистиллятора с алюминиевой конденсационной пластиной (СДАКП).
- Разработка и создание установки пленочного солнечного дистиллятора с тканевой испарительной поверхностью и конденсирующим каналом. (СДТАК).
- Проведение теоретического анализа традиционного солнечного дистиллятора и модифицированного солнечного дистиллятора (СДПЦСК). Для проведения теоретических расчетов использовался язык программирования FORTRAN 90.
- Проведение анализа и сравнения экспериментальных и теоретических результатов традиционных и модифицированных солнечных дистиллятов.

Научная новизна исследования:

 Доказано что эффективность испарения определяется как температурой жидкости, так и величиной межфазной поверхности. Предложена гибридная технология повышения эффективности испарения внутри солнечного дистиллятора путем увеличения межфазной поверхности и температуры жидкости с использованием вращающегося полого цилиндра и внешнего солнечного коллектора.

- Показано, что эффективность конденсации определяется температурой охлаждаемого участка. Предложено гибридная технология повышения эффективности конденсации внутри солнечного дистиллятора путем применения диффузионно-абсорбционного холодильника с солнечным энергоснабжением.
- Предложена новая технология увеличения межфазной поверхности и повышения эффективности испарения внутри солнечного дистиллятора путем применения ультразвуковых диспергаторов воды в объеме солнечного дистиллятора.
- Предложена новая технология увеличения межфазной поверхности и повышения эффективности конденсации с использованием металлического пленочного конденсатора.
- 5. Впервые предложено усовершенствование методов конденсации для пленочного солнечного дистиллятора путем установки алюминиевого канала в верхней части солнечного дистиллятора, который естественным образом охлаждается окружающим воздухом.
- Впервые предложено для повышения гарантированное устойчивого распределения и смачивания поверхности, использования хлопчатобумажной ткани путем покрытия абсорбирующей пластины хлопковой тканью.
- Предложена новая технология понижения температуры в зоне конденсации в верхней части солнечного дистиллятора путем установки алюминиевого канала, охлаждаемого термоэлектрическими элементами.
- Для предварительной оценки эффективности солнечных дистиллятов в различных климатических условия, разработана математическая модель, выполнен теоретический анализ и экспериментальная валидация результатов расчетов с использованием языка программирования FORTRAN 90.

Применение теоретической модели для расчетов дистиллятора с вращающимся полым цилиндром и внешним солнечным коллектором показали хорошее соответствие модели данным эксперимента.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- в физическом обосновании путей повышении производительности и эффективности солнечных дистилляторов.
- построения математической модели, позволяющей оценку производительности солнечных дистилляторов в различных климатических условиях.
- получение новых экспериментальных результатов по оценке эффективности солнечных дистиллятов модифицированных и новых типов.

Методология и методы диссертационного исследования:

Для исследования процессов солнечной дистилляции воды использовались основные теоретические положения тепломассообмена при испарении и конденсации. Для оценки производительности и эффективности солнечной дистилляции, выполнялось синхронное изучение процессов испарения и конденсации. При проведении экспериментальных исследований привлекались методы нестационарного теплообмена. Для проведения теоретических расчетов использовался язык программирования FORTRAN 90. Теоретическая модель системы основана на составлении баланса тепловой энергии для каждого компонента этой системы. Для каждого типа модифицированных и новых дистилляционных систем проводилось сравнение экспериментальных и теоретических результатов и сравнение с результатами, полученными другими авторами.

Личный вклад автора:

Работа выполнена под научным руководством д.т.н. Щеклеина Сергей Евгеньевич. Большая часть работы выполнена автором самостоятельно. Им проведен комплекс экспериментальных исследований, их обработка и анализ. Им разработана теоретическая модель и выполнен расчет с использованием языка программирования FORTRAN 90, а также выполнена подготовка материалов к публикации. Все основные результаты, обладающие научной новизной и выносимые на защиту, получены автором лично.

На защиту выносятся следующие положения:

- Результаты экспериментальных и теоретических исследований традиционного солнечного дистиллятора и модифицированного солнечного дистиллятора (солнечного дистиллятора на основе применения вращающегося полого цилиндра с внешним солнечным коллектором (СДПЦСК)).
- Результаты экспериментальных исследований солнечного дистиллятора с фотоэлектрическим диффузионно-абсорбционным холодильником (СДДАХ).
- 3. Результаты экспериментальных исследований солнечного дистиллятора с ультразвуковыми увлажнителями (СДУУ).
- 4. Результаты экспериментальных исследований пленочного солнечного дистиллятора с алюминиевой конденсационной пластиной (СДАКП).
- Результаты экспериментальных исследований пленочного солнечного дистиллятора с тканевой испарительной поверхностью и термоэлектрическим конденсирующим каналом. (СДТАК).
- Оценка стоимости и качества производимой дистиллированной воды для всех предложенных модификаций и новых конструкций дистилляционных систем (СДПЦСК, СДДАХ, СДУУ, СДАКП, и СДТАК).

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием известных, зарекомендовавших себя методов расчета, проверенного программного обеспечения, а также сравнением полученных данных с экспериментальными данными других авторов.

Апробация результатов работы. Подана заявка и получено положительное решение на изобретение РФ № «Энергонезависимая солнечная дистилляционная система непрерывного действия (варианты)».

Основные положения работы докладывались и обсуждались на 9-ти конференциях, в том числе:

- 2020 8th International Conference on Applied Science and Technology, IC-AST 2020; University of Kerbala, College of ScienceKarbala; Iraq; 15 April 2020 through 16 April 2020; Code 165421.
- 1st International Conference on Advances in Physical Sciences and Materials 2020, ICAPSM 2020; Coimbatore, Virtual; India; 13 August 2020 through 14 August 2020; Code 165967.
- 3. 3rd International Conference on Materials Engineering and Science, ICon-MEAS 2020; Kuala Lumpur; Malaysia; 28 December 2020 through 30 December 2020; Code 168222.
- Первая Международная научная конференция по проблемам цифровизации: EDCRUNCH URAL — 2020: материалы конференции (Екатеринбург, 29–30 сентября 2020 г.). — Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2020. — С. 406-418.
- 4th Scientific Conference for Engineering and Postgraduate Research, PEC 2019; Middle Technical University, Institute of Technology- Baghdad and Electrical Engineering Technical College Baghdad; Iraq; 16 December 2019 through 17 December 2019; Code 158785.
- 4th International Scientific and Technical Conference on Energy Systems, ICES 2019; Belgorod; Russian Federation; 31 October 2019 through 1 November 2019; Code 159053.
- Труды четвертой научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института. Екатеринбург: ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», 2019. - 257 с.
- Международный молодежный Даниловский энергетический форум (Всероссийская студенческая олимпиада с международным участием «Энерго- и ресурсосбережение», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Атомная энергетика» — 2019).

9. XXXV сибирском теплофизическом семинарм, посвящённом 75-летию профессора Виктора Ивановича Терехова, Новосибирск, 2019.

Также они рассматривались на научных семинарах кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского энергетического института УрФУ имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, в период с 2019 по 2020 г.

Публикации. Основные результаты представлены в 20-ти публикациях, из них 10 статей опубликованы в зарубежных изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science; 5 статей опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ; 5 тезисов в сборниках международных и российских научных конференций.

Диссертация была выполнена на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, основных выводов, списка сокращений/обозначений и списка цитируемой литературы. Диссертация изложена на 207 страницах, включая 98 рисунков, 26 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 134 наименования.

ГЛАВА 1. СОЛНЕЧНЫЕ ДИСТИЛЛЯЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ, МОДИ-ФИКАЦИИ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МЕТОДЫ.

1.1. Общая информация

Вопрос доступности пресной воды, вследствие быстрого истощения ее запасов, стал крайне важной проблемой, решение которой является одной из важнейших глобальных целей. Согласно программе ООН по окружающей среде, к 2025 году ожидается значительное усугубление дефицита пресной воды по сравнению с 1995 годом, как показано на Рисунке 1.1 [1]. Хотя пресная вода доступна в развитых регионах, доступ к ней в отдаленных и сельских районах представляет собой серьезную проблему, кроме того, в связи с развитием промышленности вырос уровень загрязнения питьевой воды [2], [3]. Таким образом, в удаленных и засушливых районах трудный доступ к пресной воде является одним из самых серьезных препятствий к развитию [4].

Обеспечение питьевой водой таких территорий приведет к экономическому росту и позволит снизить расходы на страхование и здравоохранение [5]. Согласно отчету Всемирной организации здравоохранения, более миллиарда человек страдают от нехватки чистой питьевой воды, большинство которых проживает в сельской местности, где строительство опреснительных установок затруднено [6], что также показано на карте из отчета Международного института управления водными ресурсами (IWMI) на Рисунке 1.2.

Согласно исследованиям, проведенным ООН, как показано на Рисунке 1.3, множество развивающихся стран Северной Африки и ближнего Востока страдает от проблем дефицита пресной воды, возникающих из-за стремительного роста населения и увеличившейся активности в области сельского хозяйства и промышленности, ведущей к загрязнению и истощению ресурсов питьевой воды [7].

На нашей планете пресная вода составляет 2.5% от всего объема воды несмотря на то, что 70% поверхности Земли покрыто водой. Как правило, минерализация морской воды составляет от 3500 до 4500 миллионных долей, причем согласно Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) допустимая

минерализация питьевой воды не должна превышать 500 миллионных долей (1000 миллионных долей в определенных особых случаях) [8]. Таким образом, для человеческих, сельскохозяйственных и промышленных нужд невозможно непосредственное использование морской воды, но существует множество стран, полагающихся на морскую воду после процесса опреснения как на источник питьевой воды [9]. Среднесуточное производство питьевой воды в ходе традиционного процесса опреснения во всем мире составляет $23 \cdot 10^6$ м³ [10]. Однако этот процесс требует большого количества ископаемого топлива. По оценкам, для производства 13 миллионов кубометров питьевой воды в сутки необходимо ежегодно сжигать около 130 миллионов тонн нефти [11].

В отчете Renewable Energy Policy Network на 21 век было упомянуто, как показано на Рисунке 1.4, что доминирующим источником энергии, используемым для удовлетворения глобального спроса, является ископаемое топливо, составляющее около 78.3% от общего количества произведенной энергии, 19.2% составляют возобновляемые источники энергии, а оставшиеся 2.5% обеспечивает атомная энергетика [12].

Энергетические системы будущего должны быть экономичными, надежными и безопасными, обеспечивать максимальную непрерывность энергоснабжения потребителей во всех регионах, особенно в отдаленных и сельских районах. Это может быть достигнуто путем развития энергетических систем, полагающихся на возобновляемые источники энергии [13].

Согласно вышеупомянутым причинам, были проведены исследования по использованию возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия, для производства питьевой воды. Солнечная энергетика – это экологически чистый, неистощимый источник энергии, который может применяться в различных формах. [14].

18



Рисунок 1.1 – Процент забора воды от общей доступной воды, [1].



Рисунок 1.2 – Международный институт управления водными ресурсами (IWMI) [15].



Рисунок1.3 – Процент истощения ресурсов пресной воды [16].



Рисунок 1.4 – Оценочная доля возобновляемых источников энергии в мировом энергопотреблении [12].

Согласно вышеупомянутым причинам, были проведены исследования по использованию возобновляемых источников энергии, таких как солнечная энергия, для производства питьевой воды. Солнечная энергетика – это экологически чистый, неистощимый источник энергии, который может применяться в различных формах. Например, возможно ее применение в качестве непосредственного источника тепловой энергии без преобразования, преобразование ее в другую форму энергии, такую как электрическая энергия, или поглощение солнечной энергии с помощью фотоэлектрических солнечных панелей [14].

В работе [17] указано на то, что общее количество солнечной энергии, поглощаемой планетой за один год, примерно в десять раз превышает энергию, которую возможно извлечь из всех запасов ископаемого топлива и урана Земли. Годовое количество энергии, поступающей на Землю от Солнца, оценивается примерно в $82 \cdot 10^{15}$ Вт, что более чем в 5200 раз превышает глобальное энергопотребление в 2006 году [18]. На Рисунке 1.5 показано удельное солнечное излучение в странах БВСА. Очевидно, что во многих странах региона высока интенсивность солнечного излучения. Таким образом, принимая во внимание уровни энергопотребления и воздействие на окружающую среду

сжигания углеводородных топлив, применение солнечной энергии для опреснения морской воды является перспективным решением. Одним из практических применений солнечной энергии для производства пресной воды из соленой является солнечная дистилляция воды.

В России процесс очистки соленой воды часто широко используется как в промышленности, так и в других областях [19]. Как правило, для опреснения используются два метода: первый - мембранный, с использованием полупроницаемых мембран, а второй - дистилляционный, с использованием фазового перехода [20].



Рисунок 1.5 – Годовое прямое солнечное излучение в БВСА, кВт·ч/м² [21].

1.2. Дистилляция с применением солнечной энергии:

Дистилляция с помощью солнечной энергии – простой процесс получения питьевой воды из морской, необработанной, загрязненной или соленой воды посредством поглощения свободной солнечной энергии без потребления топлива. Дистилляционный процесс включает в себя два подпроцесса – естественное испарение и естественная конденсация, в ходе которых происходит удаление примесей, таких как соли и бактерии, и получение питьевой воды при снижении эффектов глобального потепления и выбросов парникового газа [22]. Технология опреснения в солнечном дистилляторе имитирует процесс естественного гидрологического цикла испарения и конденсации. Процесс естественного цикла опреснения воды и солнечный дистиллятор показаны на Рисунках 1.6 и 1.8 соответственно.



Рисунок 1.6 – Принцип дистилляционного процесса в природе [23].

1.3. Методы солнечной дистилляции воды:

Существует два типа систем солнечной дистилляции: пассивные и активные солнечные дистилляторы. В пассивных солнечных дистилляторах энергия солнечного излучения используется без привлечения каких-либо механических устройств или традиционных источников энергии, однако слабой стороной таких систем является их низкая эффективность. Это главный недостаток пассивных солнечных дистилляторов. Таким образом, чтобы решить проблему низкой производительности, были разработаны различные активные солнечные дистилляторы, в которых солнечный дистиллятор бассейнового типа снабжается дополнительной тепловой энергией извне, что интенсифицирует испарение, таким образом улучшая его производительность. Подобными внешними модификациями, применяемыми для дистилляторов, могут быть солнечные коллекторы, фотоэлектрические панели и фокусирующие элементы. Все дистилляторы могут быть дополнительно классифицированы, как показано на Рисунке 1.7 [16].



Рисунок 1.7 – Упрощенная классификация солнечных дистилляторов воды [16].

1.3.1. Пассивный солнечный дистиллятор воды

Пассивный солнечный дистиллятор – это традиционный способ дистилляции, источником энергии в котором является исключительно солнечное излучение, непосредственно нагревающее соленую воду. Пассивные солнечные системы не требуют никаких механических устройств или традиционных источников энергии. Подобные системы просты в техническом исполнении, экологичны, для получения чистой воды в них не требуется применение бутылок,

фильтрации, предварительной обработки или дополнительных деталей. Из-за того, что дистиллятор работает при низких температурах, его продуктивность также низка [22], как показано на Рисунке 1.8 [24].

1.3.2. Активный солнечный дистиллятор воды

Активные солнечные дистилляторы воды, как правило, разделяются на три типа:

1) Высокотемпературные активные солнечные дистилляторы воды: Солнечные дистилляторы с внешним солнечным водным коллектором.

2) Активные солнечные дистилляторы воды с предварительным нагревом: Солнечный дистиллятор, емкость с водой в котором подпитывается горячей водой из различных источников при постоянном расходе.

3) Ночное активное производство: Емкость с водой солнечного дистиллятора подпитывается горячей водой из разных источников один раз в день. Это достигается либо за счет накопления солнечной энергии в течение дня и ее использования в ночное время, либо за счет утилизации сбросной теплоты из различных источников.

Внешняя тепловая энергия (солнечное излучение) используется в дистилляторе для увеличения интенсивности испарения. Его продуктивность выше продуктивности пассивного солнечного дистиллятора.

Активный солнечный дистиллятор состоит из стеклянной крышки, емкости с водой, внешнего солнечного коллектора и насоса. Соленая вода циркулирует из солнечного дистиллятора в плоский солнечный водный коллектор. Солнечное излучение продолжительное время падает на плоский солнечный водный коллектор, где соленая вода поглощает тепло, и получившаяся предварительно нагретая вода подается в солнечный дистиллятор. Соленая вода испаряется под воздействием солнечного излучения, после чего конденсируется на стеклянной крышке, где собирается и поступает в канал дистиллята, как показано на Рисунке 1.9 [25].



Рисунок 1.8 – Принципиальная схема пассивного односкатного солнечного дистиллятора бассейнового типа [24].



Рисунок 1.9 – Активный солнечный дистиллятор воды с плоским солнечным коллектором [25].

1.4. Принцип работы односкатного солнечного дистиллятора бассейнового типа:

Солнечный дистиллятор воды работает на основе принципов испарения и конденсации. Солнечные лучи падают сквозь стеклянную поверхность на облицовку емкости, поглощающую солнечную энергию, которая посредством конвекции распространяется по соленой воде, и малая часть которой теряется в ходе данного процесса. Тепло, поглощенное соленой водой, постоянно увеличивает ее температуру, что ведет к ее испарению из-за парникового эффекта. От поверхности емкости с водой энергия передается прозрачной крышке тремя механизмами: конвекцией, излучением и испарением, но по большей части – испарением воды из емкости. В водяном паре отсутствуют вредные отходы и микроорганизмы, которые остаются в емкости. Водяной пар конденсируется на внутренней поверхности прозрачной крышки (на которой поглощается теплота конденсации пара) и поступает в собирающий канал, а затем в сосуд с очищенной водой. На Рисунке 1.7 показана принципиальная схема односкатного солнечного дистиллятора бассейнового типа [24].

1.5. Параметры, влияющие на производительность солнечного дистиллятора:

На производительность солнечных дистилляторов влияют три фактора, а именно: климат, эксплуатационные условия и конструкционные параметры, как показано на Рисунке 1.10. Интенсивность солнечного излучения является главным из климатических параметров, среди которых также температура окружающего воздуха, скорость ветра и т.д. Конструкционные параметры также представляют собой важные факторы, которые оказывают эффект на производительность солнечных дистилляторов и которые можно легко контролировать и улучшать. К конструкционным параметрам относятся теплофизические свойства материалов солнечного дистиллятора, угол наклона прозрачной крышки солнечного дистиллятора, размеры и форма солнечного дистиллятора и т. д. [26]. Эксплуатационные условия включают в себя ориентацию дистиллятора, глубина емкости с водой, минерализация воды, начальная температура воды в емкости и т. д. [27].



Рисунок 1.10 – Параметры, влияющие на солнечный дистиллятор бассейнового типа [28].

1.5.1. Метеорологические параметры

> Интенсивность солнечного излучения

Влияние интенсивности солнечного излучения на производительность солнечных дистилляторов изучалось в ряде работ. Результаты этих исследований показали, что интенсивность солнечного излучения является наиболее важным фактором, влияющим на работу солнечных дистилляторов, особенно летом. В целом производительность солнечных дистилляторов растет с увеличением интенсивности солнечного излучения [29]. Омар О. Бадран и др. [30] провели теоретический и экспериментальный анализ односкатного солнечного дистиллятора. Было отмечено, что эффективность и производительность дистиллятора росли с увеличением интенсивности солнечного излучения, а самый высокий КПД был зарегистрирован в полдень при пиковой интенсивности солнечного излучения. В работе [31] была исследована и проанализирована производительность односкатного солнечного дистиллятора в сочетании с теплообменником, на который подается охлажденная вода из испарительной системы охлаждения, в жарких и влажных климатических условиях, а также изучено влияние интенсивности солнечного излучения на продуктивность и термический КПД системы. Результаты исследования показали, что интенсивность солнечного излучения оказывает существенное влияние на производительность солнечного дистиллятора. Самый высокий термический КПД солнечного дистиллятора воды был зафиксирован в 14:00 при пиковом значении интенсивности солнечного излучения и равнялся 69,2%. А. К. Сингв и др. [32] в своей работе пришли к выводу, что производительность солнечного дистиллятора непрерывно растет с увеличением интенсивности солнечного излучения. Это связано с тем, что высокая интенсивность солнечного излучения приводит к повышению температуры воды в емкости, способствуя ее испарению. Прозрачная крышка с оптимальным углом наклона пропускает максимальное количество солнечного излучения, что увеличивает выработку дистиллированной воды.

> Температура окружающего воздуха

В предыдущих исследованиях сформировались различающиеся мнения о влиянии температуры окружающего воздуха на производительность и эффективность солнечных дистилляторов. Х. Аль-Хинаи и др. [33] разработали математическую модель для прогнозирования производительности простого солнечного дистиллятора при различных климатических, конструкционных и эксплуатационных параметров в климатических условиях Омана. При повышении температуры окружающей среды с 30 до 32 °С наблюдалось увеличение производительности на 8,2%. К. Ган Сяо и др. [34] также отметили, что при повышении температуры окружающего воздуха производительность солнечного дистиллятора увеличивается. Из-за повышения температуры окружающего воздуха разница температур между водой в емкости и прозрачной крышкой увеличивается, что приводит к интенсификации испарения и увеличению выработки дистиллированной воды. Однако Воропулос и др. [35] сообщили о повышении производительности дистиллятора за счет снижения температуры окружающего воздуха. В работе [36] сделан вывод, что производительность опреснения воды в солнечном дистилляторе растет со снижением температуры воздуха и повышением скорости ветра, приводящих к увеличению разницы температур между водой в емкости и стеклянной крышкой солнечного дистиллятора.

Скорость ветра

Скорость ветра слабо влияет на продуктивность, которая растет с падением температуры крышки дистиллятора [37]. По мере того, как температура прозрачной крышки снижается, разница температур между прозрачной крышкой и водой увеличивается, что интенсифицирует естественную циркуляцию воздушной массы внутри солнечного дистиллятора [38]. Более того, конвективная теплопередача от прозрачной крышки к окружающему воздуху растет вследствие повышения скорости ветра, так как увеличение интенсивности конвективной и испарительной теплопередачи от воды в емкости компенсирует его [37], [38]. Кроме того, в работе [39] проведено теоретическое исследование влияния скорости ветра на продуктивность опреснения воды в климатических условиях Танты для двух моделей многоколонных пассивных солнечных дистилляторов, результаты которого показали, что суточная производительность растет с увеличением скорости ветра. В работе [40] исследован солнечный дистиллятор крытого типа с принудительной конвекцией для определения влияния скорости ветра на его производительность при совместном изучении механизмов тепло- и массообмена. Когда поток ветра при разных скоростях параллелен наклоненной под углом 10° стеклянной крышке, рост производительности опреснения воды происходит при уменьшении температуры стеклянной крышки (а значит увеличении разницы температур между водой в емкости и стеклянной крышкой), таким образом, с увеличением скорости ветра, количество испаряющейся воды растет. В работе [41] проведено аналитическое исследование влияния скорости ветра на коэффициенты механизмов теплопередачи, которые имеют место в процессе теплообмена в стационарных солнечных дистилляторах. Результаты показали, что с увеличением скорости ветра для определенных температур окружающего воздуха и воды в емкости, коэффициент теплопередачи излучение между водой в бассейне и стеклянной крышкой уменьшается (hr_{wa}). Кроме того, скорость ветра имеет очень слабое влияние на коэффициент теплопередачи испарением между водой в емкости и стеклянной крышкой (he_{wq}). Наконец, с увеличением скорости ветра коэффициент теплопередачи излучением между стеклянной крышкой и окружающим воздухом уменьшается (hr_{gs}) .

> Запыленность и облачность

В работе [42] в Бостоне было проведено экспериментальное исследование влияния запыленности на солнечные отопительные системы. Результаты показали, что имеет место потеря интенсивности солнечного излучения на 1% вследствие осаждения пыли на стеклянной крышке, наклоненной на 30°. В работе [43] исследован эффект запыленности на пропускающую способность стеклянных панелей с различным углами наклона, результаты были детально проанализированы, и был сделан вывод, что пропускающая способность стеклянных панелей сильно зависит от количества осажденной пыли. Кроме того, сделан вывод о наличии прямой связи между запыленностью и углом наклона стекла. Действительно, при увеличении количества осажденной пыли пропускающая способность стекла уменьшается. Замфир и др. [44] провели экспериментальное исследование влияния облачности на среднемесячную производительность солнечного коллектора для нагрева воды. По результатам был сделан вывод, что усредненная суточная производительность выше таковой только для пасмурных дней. Эль-Нашар [45] проведено экспериментальное исследования влияния осажденной пыли на производительность плоского коллектора с вакуумированными трубками. Сообщается, что пропускающая способность стекла снижается на 10% летом и 6% зимой. Кроме того, сделан вывод, что при его пропускающая способность снижается на 70% ежегодно при отсутствии очистки [46].

1.5.2. Конструкционные и эксплуатационные параметры

Одно- и двухскатные солнечные дистилляторы

Существуют различные конструкции прозрачной крышки солнечных дистилляторов, наиболее распространенными из которых являются одно- и двухскатные солнечные дистилляторы, а выбор типа зависит от конструкции и требований эксплуатации. Эдуардо и др. [47] провели лабораторное исследование двухскатного солнечного дистиллятора с контролем расхода воды при различных температурах стекла. Данный модифицированный солнечный дистиллятор сравнивался с экспериментальными данными односкатных дистилляторов. Результаты показали отсутствие значительных различий в производительности между двухскатными и односкатными солнечными дистилляторами при идентичных стеклянных крышках и температурах воды. В работе [48] проведено экспериментальное исследование по изучению влияния конструкционных параметров на производительность односкатных и двухскатных солнечных дистилляторов в засушливых погодных условиях различных регионов Индии. Сделан вывод, что односкатные солнечные дистилляторы поглощают большее количество солнечного излучения как в северных, так и в южных широтах по сравнению с аналогичными двухскатными солнечными дистилляторами.

Конструкционные материалы солнечных дистилляторов воды

При конструировании солнечных дистилляторов чаще всего используются алюминий, дерево и оцинкованное железо. В работе [49] провели экспериментальное исследование трех одинаковых солнечных дистилляторов воды. Первый солнечный дистиллятор воды, как и традиционный, сделан из листового железа. Последние два солнечных дистиллятора воды собраны из пластин оцинкованного железа и алюминия. Производительность традиционного солнечного дистиллятора воды сравнивалась с солнечными дистилляторами, состоящими из пластин оцинкованного железа и алюминия, при идентичных условиях окружающей среды. В ходе испытаний обнаружено, что выход дистиллированной воды на 15% больше в солнечном дистилляторе воды с пластиной из оцинкованного железа по сравнению с традиционным солнечным дистиллятором воды, а с алюминиевой пластиной – на 45%. В работе [50] предложен пластиковый солнечный дистиллятор для обеспечения домохозяйств пресной водой. Для повышения производительности солнечного дистиллятора он был объединен с конденсатором из трех пластиковых каналов. Результаты показали, что предложенная конструкция подходит для снабжения домохозяйств пресной водой.

32

Наклон прозрачной крышки

Угол наклона прозрачной крышки солнечного дистиллятора и глубина воды в емкости солнечного дистиллятора являются наиболее значимыми факторами, имеющими существенное влияние на характеристики солнечного дистиллятора. Этот угол, в свою очередь, зависит от ориентации и широты местоположения установки. Прозрачные крышки с наклоном, соответствующим значению широты, получают максимальное годовое количество солнечного излучения, что важно вследствие зависимости испарения воды внутри солнечного дистиллятора от интенсивности падающего солнечного излучения. В работе [51] проведен численный анализ в различных широтах (от 13 до 28) и рассмотрели влияние различных факторов, таких как интенсивность солнечного излучения, скорость ветра, глубина воды в емкости и наклон прозрачной крышки на продуктивность солнечного дистиллятора. Был сделан вывод, что оптимальный угол наклона прозрачной крышки для максимальной годовой производительности должен равняться углу широты расположения установки. Акаш и др. [52] провели экспериментальное исследование в Иордании, в котором использовался солнечный дистиллятор бассейнового типа с разными углами наклона стеклянной крышки (15, 25, 35, 45 и 55°). Установлено, что оптимальный угол наклона для опреснения воды в мае равняется 55°. Аль-Джубури [53] экспериментально исследовал характеристики солнечного дистиллятора воды. Было спроектировано и изготовлено пять односкатных солнечных дистилляторов, эксплуатировавшийся в погодных условиях Багдада в течение августа 2016 года. Размеры емкостей каждого дистиллятора равнялись 0,5 · 0,5 м. Стеклянные крышки были наклонены под углами 20°, 31°, 45° и 50° к горизонту. В этой работе было проведено экспериментальное исследование совокупной дистилляции воды при глубинах воды в бассейне 1, 2, 3, 5 и 7 см и при различных углах наклона стеклянных крышек в каждом дистилляторе. Также были измерены температуры наружных поверхностей стеклянных крышек. Результаты показали, что суточная производительность пресной воды увеличилась за счет уменьшения глубины воды в бассейне с 7 см до 1 см и уменьшения угла наклона с 50° до 20°. Максимальная суточная производительность составила 495 мл/сут (~ 2 л/м²·сут) для солнечного дистиллятора с глубиной воды в бассейне 1 см и углом наклона 20°. Хашим и др. [54] рассмотрели использование энергии солнечных лучей в солнечных дистилляторах пяти разных типов. Кроме того, были изучены четыре солнечных дистиллятора с аналогичными параметрами при разных углах наклона для оптимизации совокупной производительности дистилляции воды. Установлено, что лучшими показателями обладает симметричный двухскатный солнечный дистиллятор с оптимальным углом наклона, составляющим 45°, дающим максимальную совокупную производительность по дистиллированной воде.

Глубина воды в емкости

Глубина воды в емкости также является важным конструкционным параметром, влияющим на производительность солнечного дистиллятора, который не требует введения дополнительных деталей или лишних затрат. В работе [55] проведено исследование, чтобы найти влияние глубины воды на коэффициент массопередачи испарением и различные коэффициенты теплопередачи для односкатного солнечного дистиллятора в летний период. Исследование проводилось на протяжении 24 часов в течение пяти дней при пяти различных глубинах воды, от 4 до 18 см. Был сделан вывод, что малая глубина соответствует большей производительности и эффективности. Увеличение коэффициента теплоотдачи конвекцией происходило при снижении глубины воды, тогда как с ее увеличением он уменьшался. В работе С. Баламуруган [56] исследовано влияние глубины воды в емкости на тепломассообмен в односкатном пластиковом солнечном дистилляторе. Исследование велось при глубинах воды емкости от 2 до 12 см. При глубине 2 см была зафиксирована самая высокая продуктивность опреснения воды, которая равнялась 2,1 л/м²-сут, а

34

максимальный КПД составил 34%. Юнис и др. [57] предложили модель солнечного дистиллятора для анализа ряда параметров. В работе рассматривались следующие параметры, влияющие на производительность солнечного дистиллятора: толщина стеклянной крышки (2, 4 и 6 мм), глубина воды (6, 9 и 12 см), доля светлого времени суток (43,7, 47,4 и 52,1%), интенсивность солнечного излучения, температура окружающего воздуха, скорость ветра и относительная влажность. Под эффективностью солнечного дистиллятора воды подразумевались совокупный выход дистиллированной воды и КПД дистиллятора. Максимальный совокупный выход дистиллированной воды составил около 5 n/m^2 сут при глубине воды 6 см, толщине стеклянного покрытия 6 мм и 52,1% светлого времени суток (в течение июля и августа 1997 г.). Муафаг Сулиман К. [58] исследовал влияние глубины воды в емкости на опреснение воды. Он также изучил эффект эксплуатационных и конструкционных параметров на процесс солнечной дистилляции воды. Различная глубина соленой воды (0,5, 2, 3 и 4 см) в емкости с минерализацией 5000 миллионных долей исследовалась при идентичных климатических условиях. Результаты показали, что увеличение продуктивности дистилляции воды происходит при уменьшении глубины воды в емкости. Было отмечено, что производительность тесно связана с интенсивностью падающего солнечного света, а оптимальное охлаждение стеклянной крышки позволило добиться баланса между активностью испарения и интенсивностью конденсации. Омар К.А и др. [59] провели экспериментальное испытание для определения влияния глубины воды в емкости на совокупную производительность солнечных дистилляторов воды. Исследование показало, что суммарный объем дистиллированной воды увеличивается с уменьшением глубины воды в емкости.

1.6. Методы повышения производительности и эффективности солнечных дистилляторов

Производительность солнечного дистиллятора обычно оценивается по его производительности, которая представляет собой количество пресной

воды, производимой системой на единицу площади используемого солнечного дистиллятора. Производительность обычных солнечных дистилляторов бассейнового типа относительно невысока. В этом контексте было проведено много обширных экспериментальных и аналитических исследований солнечных дистилляторов с одной емкостью с целью повышения их эффективности и производительности. Усилия были сосредоточены на основных факторах, влияющих на их производительность: добавление конденсаторного блока, добавление материалов для поглощения и хранения энергии, добавление нагревательного элемента и добавление вращающегося вала или цилиндра внутрь солнечного дистиллятора.

1.6.1. Добавление конденсационной установки

Производство пресной воды в обычных солнечных дистилляторах увеличивается за счет увеличения скорости испарения и / или скорости конденсации. Кроме того, чтобы ускорить процессы конденсации, площадь конденсации увеличивается различными способами и конструкциями, включая интеграцию встроенного пассивного конденсатора в традиционный солнечный дистиллятор [60], добавление отдельного конденсатора к односклонному солнечному дистиллятору [61], увеличение размеров основания дистиллятора с применением отражающих пластин для направления солнечного излучения на емкость дистиллятора [62] и добавление внутреннего конденсатора в односкатный солнечный дистиллятор [63]. Результаты этих исследований показали, что модифицированные солнечные дистилляторы за счет увеличения площади конденсации более эффективны, чем традиционные солнечные дистилляторы в различной степени в зависимости от условий окружающей среды, конструкционных и эксплуатационных условий для каждой такой системы, как показано в таблице 1.1.
1.6.2. Материалы для поглощения и аккумулирования энергии

Для увеличения количества энергии, достигающей поверхности солнечного дистиллятора, существует множество методов, в том числе увеличение поглощательной способности путем добавления в дистиллируемую воду угля, интенсифицирующего ее испарение за счет большего поглощения солнечной энергии [64], исследование [65] включало добавление различных абсорбирующих материалов (губчатые вещества, металлические и вулканические породы черного цвета) в воду односкатного солнечного дистиллятора, другое исследование [66] включало добавление абсорбирующих материалов в емкости, в том числе алюминиевых ребер, покрытых хлопчатобумажной тканью, губчатого материала, хлопка и кокосового волокна, а в работе [67] были исследованы характеристики солнечного дистиллятора с использованием различных материалов в емкости, в том числе губчатого материала, джутовой и хлопковой ткани, а также испытаны иные пористые материалы, такие как кварцит и промытый камень.

Использование парафина в качестве материала для аккумулирования энергии считается одной из самых эффективных технологий для применения в опреснении неочищенной воды с использованием пассивного солнечного дистиллятора. Исследователи сходятся в том, что применение материалов для аккумулирования энергии (физической теплоты и теплоты фазового перехода) является одном из наиболее подходящих альтернативных способов снабжения дистилляционных установок энергией, который можно использовать в солнечных дистилляторах для накопления энергии в солнечную погоду и высвобождения в течение ночи для увеличения производительности. Парафин использовался для аккумулирования энергии в виде тепла фазового перехода в емкости солнечного дистиллятора [68]. В исследовании [69] был проведен анализ эксергии пассивного солнечного дистилятора с применением системы аккумулирования тепла (парафиновый воск) для расчета величины потерь эксергии во время процесса аккумулирования тепла (аккумулирования тепла). В работе

37

[70] изучены характеристики переходного процесса в солнечном дистилляторе, в котором используется парафин для аккумуляции тепловой энергии, для обогрева и увлажнения сельскохозяйственных теплиц. В исследовании [71] представлена математическая модель переходного процесса в односкатном солнечном дистилляторе в случае применения парафина, установленного под пластиной емкости, и без него. Модифицированные солнечные дистилляторы, в которых применяются материалы для поглощения и хранения энергии, более эффективны, чем традиционные солнечные дистилляторы, с различным процентным соотношением в зависимости от условий окружающей среды, конструкции и эксплуатации для каждой системы, как показано в таблице 1.1.

1.6.3. Применение нагревательного элемента

Одним из наиболее важных практических применений солнечной энергии в домохозяйствах является система нагрева воды солнечным излучением. Данная технология основана на применении плоской пластины для нагрева воды непосредственно, или с использованием иных систем, таких как солнечные дистилляторы, для повышения температуры воды. В быту обычно используются вакуумированные трубы и плоские солнечные коллекторы [72]. Традиционный солнечный коллектор состоит из стеклянной крышки, трубок из меди или нержавеющей стали и оцинкованной железной пластины, которые используются для поглощения солнечной энергии внутри солнечного коллектора [73]. Проведено исследование по применению нагрева воды с помощью стеклянных вакуумированных труб в дистилляторе с одной емкостью [74]. Авторы [75] провели экспериментальное исследование производительности двухскатного дистиллятора с одной емкостью с применением узкого солнечного пруда. Повышена продуктивность солнечного дистиллятора, применением в емкости вакуумированного трубчатого солнечного коллектора [76]. Плоский солнечный коллектор работает как от прямых солнечных лучей, так и рассеянного излучения, таким образом, он функционирует даже когда облака перекрывают солнечное излучение. Было проведено несколько исследований, посвященных

влиянию применения плоских солнечных водонагревателей в солнечных дистилляторах. В исследовании [77] спроектированы и разработаны два традиционных солнечных дистиллятора воды с применением плоского солнечного коллектора со схемой аккумуляции тепла. В другом исследовании [78] разработали ступенчатую емкость в замену плоской для уменьшения глубины объема воды и увеличения площади ее поверхности. Более того, для увеличения температуры воды на входе в дистиллятор был применен плоский солнечный коллектор. Система (односкатный солнечный дистиллятор и солнечный водонагреватель), продолжала функционировать даже в условиях низкой интенсивности солнечного света и повышенной облачности благодаря поддержанию дистилляции при помощи теплопередачи от резервуара горячей воды к холодной воде в емкости дистиллятора [79]. В работе [80] в целях верификации сравнены теоретические данные о производительности активного односкатного солнечного дистиллятора с экспериментальными при различных эксплуатационных параметрах и определены факторы, увеличивающие производительность. Оценивался термический КПД односкатного солнечного дистиллятора с солнечным коллектором. В другом исследовании [81] проведен анализ эксергии и термической эффективности для определения термического КПД двухскатных солнечных дистилляторов с применением плоского солнечного коллектора при принудительной циркуляции воды. В работе [82] разработали и испытали солнечный дистиллятор для производства горячей и дистиллированной воды из неочищенной питательной воды. Солнечный дистиллятор воды был дополнен солнечным коллектором из вакуумированных трубок для нагрева теплоносителя, циркулирующего по замкнутому контуру за счет механизма термосифона. В исследовании [83] проведено экспериментальное исследование по изучению возможности использования возобновляемых источников энергии для опреснения соленой воды в соответствии с климатическими условиями Челябинска / Россия. Солнечный водяной коллектор с вакуумной трубкой передает тепловую энергию с помощью циркуляционного

насоса в теплообменник, установленный в секции опреснения. Результаты показали возможность использования коллекторов солнечной энергии для опреснения воды в России. Добавление нагревательного элемента к солнечному дистиллятору во всех предыдущих исследованиях привело к увеличению выхода пресной воды из системы дистилляции с различным процентным соотношением, в зависимости от условий окружающей среды, конструкционных и эксплуатационных условий для каждой системы, как показано в таблице 1.1.

1.6.4. Применение вращающегося вала или цилиндра в солнечном дистилляторе

Чтобы увеличить площадь поверхности испарительной части и уменьшить толщину соленой воды солнечного дистиллятора, в предыдущих исследованиях был добавлен вращающийся вал или цилиндр внутрь солнечного дистиллятора. В таких системах на горячей вращающейся поверхности постоянно образуется и испаряется тонкая пленка воды, в отличие от традиционных солнечных дистилляторов. В исследовании [84] увеличили производительность дистиллятора воды за счет применения в солнечном дистилляторе вращающихся дисков (плоских дисков и гофрированных дисков с фитилем и без него).

В работе [85] провели исследование эффективности солнечных дистилляторов с применением фитиля, вращающегося за счет фотоэлектрической солнечной панели. В другом исследовании [86] было проведено изучение влияния вращающегося вала, установленного у поверхности воды в емкости. Вращающийся вал служит для разрыва пограничного слоя воды в емкости, тем самым интенсифицируя процесс испарения и конденсации воды. Были сравнены традиционный и два модифицированных дистиллятора. В работе [87]– [90] предложена новая техническая модификация, улучшающая продуктивность солнечной дистилляции. Эта технология заключается в применении в солнечном дистилляторе медленно вращающегося цилиндра, на поверхности которого постоянно образуется быстро испаряющаяся тонкая пленка воды. Они определили, что максимальная скорость вращения должна находиться в диапазоне от 0.25 до 0.5 об/мин, в зависимости от особенностей климатических условий. Данный новый улучшенный дистиллятор оценивался с точки зрения как экономической, так и эксплуатационной применимости. Чтобы оценить применимость системы в реальных рыночных условиях, исследователи провели расчет затрат на дистилляцию соленой воды. Расчеты основывались на сравнении затрат как на систему, использующее топливо, так и на модифицированный солнечный дистиллятор, при этом в расчетах учитывались непредвиденные траты на устранение возникающих неисправностей. Анализ показал, что новый дистиллятор может обходиться дешевле по сравнению с другими типами дистилляторов, как показано в таблице 1.1.

Таблице 1.1 – Методы интенсификации опреснения воды в солнечных дистилляторах

Методы интенси-			
фикации опресне-	Иссле-		Производительность опресне-
ния воды в сол-	дования	Метод улучшения	ния воды и / или термический
нечных дистилля-			КПД
торах			
		Интеграция встроенного пас-	+↑ 16.7% Более высокая про-
	[60]	сивного конденсатора в тради-	изводительность по сравне-
		ционном солнечном дистилля-	нию с традиционным солнеч-
		торе.	ным дистиллятором.
		Добавление отдельного конден-	+1 19% Более высокая произ-
	[61]	сатора к одному склонному сол-	водительность по сравнению
		нечному дистиллятору.	с традиционным солнечным
			дистиллятором.
		Увеличение размеров основания	
Добавление		дистиллятора с использованием	от18% до 24% увеличенная
конденсационной	[62]	отражающих пластин.	производительность по срав-
установки			нению с традиционным сол-
			нечным дистиллятором.
		Добавление внутреннего кон-	
		денсатора в односкатный сол-	+↑ Продуктивность
	[63]	нечный дистиллятор	опреснения воды увеличена
			с 5,5 до 5,9 кг/м ² .

	[64]	Добавление угля в воду емкости	+↑ Повышенная
			продуктивность опреснения
			воды.
		Добавление различных абсорби-	Наиболее эффективным мате-
		рующих материалов (губчатые	риалом для поглощения и ак-
		вещества, металлические и вул-	кумулирования солнечной
		канические породы черного	энергии является минераль-
	[65]	цвета) в воду односкатного сол-	ная порода черного цвета, ко-
		нечного дистиллятора	торая увеличила производи-
Материалы для			тельность примерно на +↑
поглощения и ак-			20%.
кумулирования		Добавление различных абсорби-	+1 Солнечный дистиллятор с
энергии		рующих материалов, таких как	алюминиевым оребрением,
	[66]	алюминиевые ребра, покрытые	покрытым хлопчатобумажной
		хлопчатобумажной тканью, губ-	тканью, является наиболее
		чатый материал, хлопок и коко-	производительным и эффек-
		совое волокно в солнечный ди-	тивным.
		стиллятор воды.	
		Использование различных мате-	
		риалов в емкости, в том числе	
		губчатого материала, джутовой	+↑ Результаты показали, что
		и хлопковой ткани, а также ис-	черная ткань из хлопка имеет
	[67]	пытаны иные пористые матери-	наилучшее влияние на эффек-
		алы, такие как кварцит и промы-	тивность и производитель-
		тый камень	ность.
		Использование парафина, уста-	
		новленного под пластиной ем-	+↑ Повышенная
	[69]	кости солнечного дистиллятора.	продуктивность опреснения
			воды.
		Использование парафина, уста-	+1 Продуктивность
		новленного под пластиной ем-	опреснения воды увеличена
	[70]	кости солнечного дистиллятора.	с 4,6 до 4,9 кг/м ² .
			+↑ Повышение термического
			КПД от 57% до 61%.

		Использование парафина, уста-	
	[71]	новленного под пластиной ем-	+↑ Продуктивность
		кости солнечного дистиллятора.	опреснения воды увеличена
			с 4,99 до 9,00 кг/м ² .
		_	
		Применение нагрева воды с по-	
		мощью стеклянных вакуумиро-	+↑ 72 % Более высокая про-
	[74]	ванных труб в дистилляторе с	изводительность по сравне-
		одной емкостью	нию с традиционным солнеч-
			ным дистиллятором.
		Солнечный дистиллятор с двой-	
Применение		ным наклоном с одной емко-	+↑ Повышенный термиче-
нагревательного	[75]	стью с применением узкого сол-	ский КПД от 54% до 71%.
элемента		нечного пруда.	
		Соединение емкости солнечного	
		дистиллятора с вакуумирован-	+↑ 62.5 % Более высокая
		ным трубчатым солнечным кол-	производительность по срав-
	[76]	лектором	нению с традиционным сол-
			нечным дистиллятором.
		Солнечный дистиллятор, инте-	
		грированный плоским пластин-	+↑ Продуктивность пресной
	[77]	чатым коллектором и аккумуля-	воды в августе, сентябре, но-
		тором тепла.	ябре и декабре увеличивается
			на 75%, 94%, 121%, и 109%,
			соответственно.
		Применение ступенчатой емко-	
		сти в замену плоской. Более	Среднесуточная производи-
		того, для увеличения темпера-	тельность в ходе испытаний
		туры воды на входе в дистилля-	равнялась 2.24 л/м ² , а по тео-
	[78]	тор был применен плоский сол-	- ретическому прогнозу – 3.78
		нечный коллектор	л/м ² , таким образом КПД ди-
			стиллятора составил 60%.
		Интегрирование односкатного	-
		солнечного дистиллятора сол-	+120 % Более высокая про-
	[79]	нечным водонагревателем	изводительность по сравне-
			нию с традишионным солнеч-
			ным дистиллятором.

		Олноскатный солнечный ли-	+↑ Активные солнечные ли-
		стилятор интегрированный	
	[80]	солистивим водонагревателем	
	[00]		шения производительности
		Π	опреснения.
		Двухскатныи солнечныи ди-	+Т Эксергический КПД раз-
	50.43	стиллятор, интегрированный	нился от 0.26 до 1.34%,
	[81]	плоским солнечным коллекто-	а среднесуточный термиче-
		ром	ский КПД солнечного дистил-
			лятора от 13.55 до 31.07%.
	[82]	Солнечный дистиллятор воды	+↑ Производительность сол-
		дополнен солнечным коллекто-	нечного дистиллятора состав-
		ром из вакуумированных тру-	ляла до 0.15 л/ч дистиллиро-
		бок.	ванной воды.
			+1 Модифицированный ди-
		Интегрирование дистиллятора	стиллятор имеет производи-
		вакуумными трубками.	тельность примерно на 10-
	[83]		30% больше, чем традицион-
			ный дистиллятор, в зависимо-
			сти от условий окружающей
			среды.
		Интеграция солнечного дистил-	+↑ Производительность в
		лятора вращающимися дисками	сравнении с традиционным
		(плоские диски и гофрирован-	солнечным дистиллятором в
		ные диски с фитилем и без	случае гофрированного вра-
	[84]	него).	щающегося диска с фитилем
			увеличилась на 124%, а мак-
			симальный термический КПД
			равнялся 54% и 50%.
		Солнечный дистиллятор с вра-	+1 47 % Более высокая про-
	[85]	щающимся фитилем	изводительность по сравне-
Применение вра-			нию с традиционным солнеч-
щающегося вала			ным дистиллятором.
или цилиндра в			+↑ Произволительность сол-
солнечном ди-			нечной листиллянионной си-
стилляторе			стемы за счет молификации
1			стемы за стег модификации

	Применение вращающегося	дополнительным слоем, запа-
	вала, установленного на поверх-	сающим тепло, увеличилась
[86]	ности воды в емкости. (0,1	на 5%, 6% и 7.5% в мае, июне
	об/мин).	и июле соответственно, а за
		счет вала (0,1 об/мин), враща-
		емого ФЭП, увеличилась на
		2.5%, 5% и 5.5% в мае, июне
		и июле соответственно.
	Улучшение включало в себя	+1 200 % Более высокая про-
[87]–	медленно вращающийся полый	изводительность по сравне-
[90]	цилиндр внутри солнечного ди-	нию с традиционным солнеч-
	стиллятора.	ным дистиллятором.
		Максимальная скорость вра-
		щения должна находиться в
		диапазоне от 0.25 до 0.5
		об/мин

1.7. Выводы

По литературному обзору вышеперечисленных исследований можно сделать следующие выводы:

1. В большинстве приведенных исследований использовался солнечный дистиллятор, как с односкатной, так и с двухскатной крышкой.

2. В экспериментальных исследованиях рассматривались параметры окружающей среды (интенсивность солнечного излучения, температура окружающего воздуха и скорость воздуха), температура воды в емкости, температура стеклянной крышки и температура пластины основания.

3. Из сравнения различных материалов (алюминия и оцинкованного железа) определено, что алюминий – лучший материал с точки зрения максимального поглощения солнечного излучения. Но по стоимости оцинкованный железный лист был самым дешевым.

4. Определены оптимальные углы наклона стеклянной крышки и ориентация солнечного дистиллятора для максимального поглощения солнечного излучения через стеклянную крышку. Углы наклона находятся в пределах от 10° до 40°. Оптимальные углы наклона равны углу широты.

5. С уменьшением толщины стеклянной крышки происходит увеличение суточной производительности дистилляции воды.

6. Испытаны различные глубины соленой воды в емкости при идентичных климатических условиях. Результаты показали, что производительность растет со снижением глубины воды.

7. В экспериментальных исследованиях предварительный нагрев воды при помощи внедрения солнечного водонагревателя перед процессом опреснения в солнечном дистилляторе ведет к увеличению производительности воды.

8. Простым усовершенствованием для увеличения площади испарительной поверхности является внедрение внутрь солнечного дистиллятора медленно вращающегося полого цилиндра.

Таким образом, целью данной аспирантской работы является теоретическое и экспериментальное исследование влияния модификаций солнечного дистиллятора воды при различных условиях окружающей среды и эксплуатационных условиях на термический КПД и производительность дистилляции воды модифицированных солнечных дистилляторов. Основными задачами данного исследования являются: повышение производительности и эффективности традиционных солнечных дистилляторов при минимально возможных затратах в различных климатических условиях, а также анализ солнечного дистиллятора воды путем построения математической модели с использованием языка программирования FORTRAN 90.

1.8. Постановка проблемы

Эффективность солнечного дистиллятора оценивается, как правило, по его производительности. За последние десятилетия были проведены обширные исследования систем солнечной дистилляции по улучшению их эксплуатационной и экономической эффективности. Солнечная дистилляция бассейнового типа является перспективной технологией возобновляемой энергетики, которая может использоваться для производства питьевой воды с помощью солнечной тепловой энергии. Основные преимущества этих систем заключаются в простоте их конструкции, низких требованиях к обслуживанию, высокой маневренности и безопасности эксплуатации. Тем не менее, непостоянная доступность солнечного излучения отрицательно влияет на производительность этих систем, и, вследствие зачастую относительно низкой производительности таких систем, повышение эксплуатационных характеристик солнечных дистилляторов воды, а именно продуктивности и эффективности, является сложной задачей. Данное исследование способствует расширению области научных исследований практического применения возобновляемой энергии, в частности использования солнечной энергии в системах дистилляции необработанной воды, а также развитию методов увеличения эффективности малоразмерных систем солнечной дистилляции, простых в изготовлении, установке и транспортировке.

1.9. Цель работы:

Теоретическое и экспериментальное исследование процессов испарения соленой воды и конденсации пара с целью модификации и применения новых технологий для повышения производительности солнечного дистиллятора при минимально возможных капитальных и эксплуатационных затратах для различных климатических условий.

ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТО-ДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Введение.

Для получения надежных данных об опреснении воды при помощи односкатного солнечного дистиллятора было сконструировано несколько экспериментальных установок. Кроме традиционного солнечного дистиллятора были спроектированы и сконструированы пять экспериментальных установок с повышенной продуктивностью опреснения воды, как показано на Рис 2.1.



Рисунок 2.1 – Список экспериментальных установок, использовавшихся в диссертационной работе.

2.2. Экспериментальная установка с традиционным солнечным дистиллятором (ТСД).

На Рисунках (2.2 и 2.3) показаны фотографии и поэтапная схема порядка изготовления и сборки традиционного солнечного дистиллятора (ТСД), состоящего из четырех основных компонентов: крышки из оргстекла, деревянного каркаса, металлической емкости, основания. Эффективная площадь емкости односкатного солнечного дистиллятора составляет 0,5 м², размеры водонепроницаемого деревянного каркаса составляют: длина – 103,6 см, ширина – 53,6 см, большая высота -61,8 см, меньшая высота -26,6 см и толщина -1,8 см; размеры плиты МДФ, закрепленной на задней стороне солнечного дистиллятора: ширина – 100 см, высота – 60 см и толщина – 1,8 см. Деревянный каркас солнечного дистиллятора покрыт тонким слоем светоотражающей изоляции для защиты от дождя и влаги. Крышка из оргстекла имеет длину 100 см, ширину 50 см, большую высоту 50 см, малую высоту 14,8 см, толщину 0,3 см и наклонена под углом 35° к горизонту. Алюминиевый канал использовался для фиксации крышки из оргстекла на деревянном каркасе, сбора дистиллированной воды и переноса ее в пластиковый сосуд под солнечным дистиллятором. Водонепроницаемое деревянное основание солнечного дистиллятора имеет длину 103,6 см, ширину 53,6 см и толщину 1,8 см. Внутренняя поверхность солнечного дистиллятора была покрыта алюминиевой фольгой толщиной 0,03 см. Силиконовый клей использовался для скрепления всех частей системы, чтобы предотвратить возникновение утечек воздуха. Емкость для воды сделана из оцинкованной стали длиной 100 см, шириной 50 см, высотой 10 см и толщиной 0,1 см. Она покрыта черной матовой краской для увеличения поглощения солнечного излучения.



Рисунок 2.2 – Принципиальная схема изготовления и сборки традиционного солнечного дистиллятора (ТСД); 1- Крышка из оргстекла; 2- Деревянный лист МДФ; 3- U-образбый алюминиевый канал; 4- Механический поплавок; 5- Емкость; 6- Вода в емкости; 7- Основание; 8- Металлические ножки; 9- Сферический клапан; 10- Градуированный цилиндр; 11- Дистиллированная вода.



Рисунок 2.3 – Фотографии этапов изготовления и сборки традиционного солнечного дистиллятора (ТСД); 1- Деревянный каркас; 2- Покрытие изоляцией деревянного каркаса; 3- Закрепленный на деревянном каркасе алюминиевый канал; 4- Крышка из оргстекла; 5- Зафиксированная на деревянном каркасе крышка из оргстекла; 6- Изготовление емкости для воды; 7- Покрытие краской емкости для воды; 8- Основание; 9- Традиционный солнечный дистиллятор.

2.3. Модифицированный солнечный дистиллятор (солнечный дистиллятор на основе применения вращающегося полого цилиндра и внешнего солнечного коллектора (СДПЦСК)).

В данном разделе описаны экспериментальная установка и этапы изготовления. Были сконструированы две экспериментальные модели: традиционный солнечный дистиллятор (ТСД) и модифицированный солнечный дистиллятор (СДПЦСК). Испарение воды интенсифицируется с уменьшением ее глубины. На основе данного принципа был предложен модифицированный солнечный дистиллятор, который представляет собой солнечный дистиллятор, совмещенный с вращающимся полым цилиндром малой массы, открытым с

обоих концов и установленным на вращающемся валу внутри солнечного дистиллятора. Цилиндр окрашен матовой черной краской, чтобы увеличить его способность поглощать солнечное излучение. Нижней частью полый цилиндр был погружен на 1 см в воду в емкости. В отличие от традиционного солнечного дистиллятора, в модифицированном на поверхности полого цилиндра при его вращении образовывалась тонкая пленка воды, которая с каждым оборотом цилиндра постоянно обновлялась. Водяная пленка быстро испаряется с горячей поверхности полого цилиндра из-за более интенсивной теплоотдачи от поверхности цилиндра к тонкой водной пленке по сравнению с теплоотдачей от облицовки емкости к воде в традиционных солнечных дистилляторах, в которых для нагрева и испарения воды в емкости требуется больше времени. Для решения проблемы снижения температуры воды в емкости, связанной с тенью от полого цилиндра, которая покрывает 76% площади поверхности воды, в модифицированном солнечном дистилляторе был применен внешний солнечный коллектор, как показано на Рисунках 2.5 и 2.6. Экспериментальная установка была установлена на крыше лаборатории кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» Уральского Федерального университета. Работа проводилась при погодных и эксплуатационных условиях Екатеринбурга, Россия, 56,84° с.ш., 60,58° в.д., в течение пяти месяцев с июня по октябрь 2019 г. в солнечные дни. Были выбраны пять типичных дней: 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября 2019 года с 08:00 до 20:00, причем система солнечной дистилляции была зафиксирована в южном направлении.

2.3.1. Солнечные дистилляторы воды и экспериментальная установка:

На Рисунках (2.4, 2.5 и 2.6.) показаны фотография экспериментальной установки и принципиальная схема двух моделей солнечных дистилляторов: традиционного солнечного дистиллятора (ТСД) и модифицированного солнечного дистиллятора (СДПЦСК). Для сравнения характеристик двух моделей

изучались дистилляторы одинаковых размеров при одинаковых эксплуатационных условиях.

Детально традиционный солнечный дистиллятор рассмотрен в разделе 2.2. Внутри солнечного дистиллятора был установлен полый вращающийся цилиндр. Полый цилиндр диаметром 32 см, длиной 90 см и толщиной 0,1 см, был изготовлен из листа оцинкованного стали длиной 100 и шириной 100 и покрыт черной матовой краской для увеличения его способности поглощать солнечное излучение. Внутри модифицированного солнечного дистиллятора полый цилиндр был зафиксирован с помощью вала из низкоуглеродистой стали диаметром 0,8 см и длиной 95 см, на концах которого установлены два подшипника диаметром 0,8 см. На конце вращающегося вала был закреплен легкий шкив диаметром 6,8 см. Вращающийся шкив (6,8 см) приводится в движение шкивом (1,6 см), который был закреплен на валу двигателя постоянного тока через приводной ремень (зубчатый ремень высокомоментного привода).



³

Рисунок 2.4 – Этапы изготовления и сборки модифицированного солнечного дистиллятор; 1- Изготовление полого цилиндра; 2- Установка крышки из оргстекла на деревянный каркас и полого цилиндра в емкость с водой; 3- Модифицированный солнечный дистиллятор (МСД).



Рисунок 2.5 – Принципиальная схема экспериментальной установки, ТСД и СДПЦСК, 1- Крышка из оргстекла; 2- Деревянный лист МДФ; 3- Полый цилиндр; 4- Механический поплавок; 5- Металлические ножки; 6- Емкость с водой; 7-Вода в емкости; 8- Двигатель постоянного тока 12В; 9- Градуированный цилиндр; 10- Сферический клапан; 11- Үобразный сетчатый фильтр воды; 12- Водяной насос; 13- Солнечный коллектор воды; 14- Обратный клапан; 15- Предохранительный клапан; 16- Резервуар питательной воды.



Рисунок 2.6 – Фотография модифицированного и традиционного солнечных дистилляторов.

2.3.2. Плоский солнечный коллектор воды.

Плоский солнечный коллектор воды имеет огромное множество применений, включая то, которое мы собираемся рассматривать в данном разделе. По сравнению с другими типами солнечных коллекторов его характеристики хорошо известны. Он прост в изготовлении и обслуживании и имеет низкую стоимость. Более того, он может функционировать как от прямого, так и от рассеянного солнечного излучения. Касательно солнечной дистилляции плоский солнечный водосборник может производить тепловую энергию при температурах, достаточных для нагрева воды в емкости. Интенсификация испарения воды в емкости увеличивает выработку дистиллированной воды.

На Рисунках 2.7 и 2.8 показаны фотография и схема плоского солнечного коллектора воды. Для удержания и изоляции всех частей солнечного коллектора воды был изготовлен водонепроницаемый деревянный корпус с размерами: длина – 120 см, ширина – 110 см, глубина – 10 см и толщина деревянной изоляции – 3 см. Снизу солнечный коллектор воды закрыт оцинкованной поглотительной пластиной 110 см в длину, 90 см в ширину и 0,1 см в толщину, а его эффективная площадь составляет 9900 см². На данной пластине расположены тридцать медных трубок, плотно закрепленных зажимами на поглотительной пластине, внутренний диаметр трубок равен 1,6 см, внешний – 1,7 см, а расстояние между соседними трубками составляло 2 см. Поглотительная пластина и трубки покрыты матовой черной краской, чтобы увеличить их способность поглощать энергию солнечного излучения. Вода циркулирует от впускной трубы коллектора к выпускной трубе коллектора (материал – медь, диаметр – 4,2 см) через 30 медных трубок. В качестве крышки плоского солнечного коллектора воды использовалось прозрачное стекло с размерами: длина – 116 см, ширина – 106 см и толщина – 0,4 см. Стеклянная крышка пропускает сквозь себя солнечные лучи и в то же время снижает теплопотери от поглотительной пластины. Солнечный коллектор воды наклонен на 35° к горизонту с помощью механической опорной конструкции, представляющей собой основание из четырех угловых профилей из низкоуглеродистой стали, движущихся под разными углами.



Рисунок 2.7 – Принципиальная схема плоского солнечного коллектора воды.



Рисунок 2.8 – Фотография; 1- 30 медных трубок; закрепленных на поглотительной пластине; 2- поглотительная пластина и трубки; установленные в водонепроницаемый деревянный корпус с крышкой из стекла.

Водяной насос постоянного тока 12 В и 0,66 А с объемным расходом 1,2 л/мин использовался для циркуляции воды между плоским солнечным коллектором воды и емкостью модифицированного солнечного дистиллятора, как показано на Рисунке 2.9. Обратный клапан подключен к выходу плоского солнечного коллектора воды. Он не позволяет горячей воде течь обратно из емкости солнечного дистиллятора в солнечный коллектор, особенно когда водяной насос выключен, как показано на Рисунке 2.9. Сетчатый Y-образный фильтр

воды использовался для предотвращения попадания в насос примесей и твердых частиц из емкости солнечного дистиллятора.

Предохранительный клапан подключен к выходу плоского солнечного коллектора воды для очистки системы от газов и предотвращения повышения давления выше заданного предела (4 бар), как показано на Рисунке 2.9.

Следующие данные записывались ежечасно, как показано на Рисунке 2.10: температуры пластины емкости (T_p) , воды в емкости (T_w) , внутренней поверхности полого цилиндра (T_{hci}) , наружной поверхности полого цилиндра (T_{hco}) , внутренней поверхности крышки из оргстекла (T_{gi}) и внешней поверхности крышки из оргстекла (T_{go}) , температура окружающего воздуха (T_a) , интенсивность солнечного излучения I(t), скорость ветра (V_a) и производительность опреснения (m_h) .



Рисунок 2.9. Фотография соединений труб и вспомогательных деталей плоского солнечного коллектора воды.



Рисунок 2.10 – Принципиальная схема измерительной системы.

2.3.3. Система солнечного электропитания и система нагрузки постоянного тока.

Фотоэлектрическая система, ФЭ система или система солнечного электропитания, представляет собой энергетическую систему, предназначенную для подачи солнечной энергии с помощью фотоэлектрических элементов. Данная система состоит из фотоэлектрической панели, аккумулятора и контроллера заряда солнечной энергии. Солнечная энергия запасается в аккумуляторе. Из-за ускоряющегося процесса накопления энергии для предотвращения перезаряда аккумулятора использовался контроллер заряда. Контроллер заряда регулирует напряжение и силу постоянного электрического тока, передаваемого ФЭ/солнечной панелью для заряда аккумулятора. Аккумулятор накапливает электрическую энергию постоянного тока, чтобы затем ее можно было использовать в отсутствие солнечной энергии. Потребители постоянного тока могут получать питание непосредственно от ФЭ/солнечной панели/аккумулятора, как показано на Рисунке 2.11.



Рисунок 2.11 – Система солнечного электропитания и система нагрузки постоянного тока.

Фотоэлектрическая панель:

Была выбрана поликристаллическая фотоэлектрическая панель (18,60 В и 5,92 А постоянного тока) с пиковой мощностью (110 Вт) и размерами (Д = 101,5 см, Ш = 66,8 см и В = 3 см). Фотоэлектрическая панель наклонена под углом (35°) с помощью механизма, который представляет собой основание из четырех угловых профилей из низкоуглеродистой стали, движущихся под разными углами (поддерживающая конструкция), как показано на Рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Фотоэлектрическая панель.

Контроллер заряда солнечной энергии:

Использование аккумуляторов требует установки другого необходимого элемента, а именно контроллера заряда солнечной энергии. Срок службы аккумуляторов можно увеличить, если не допускать перезаряда и многочисленного разряжения. Именно это обеспечивает контроллер заряда. Когда аккумулятор полностью заряжен, контроллер заряда останавливает течение тока от ФЭ модулей. Контроллер не позволяет току возобновить течение, пока аккумулятор не разрядится до определенного уровня. Большинство контроллеров заряда не допускают полной разрядки аккумулятора. Таким образом, контроллер необходим для обеспечения длительного срока службы аккумулятора.

> Аккумулятор:

Кальциевый аккумулятор для тяжелых эксплуатационных условий (12 В постоянного тока и 55 А·ч) использовался для подачи электроэнергии на контроллер привода двигателя постоянного тока и водяного насоса, особенно в отсутствие солнечного излучения.

➤ Инвертор SVC BI-500

Инвертор SVC BI-500 – преобразователь напряжения предназначен для обеспечения электроэнергией электроники и устройств, для функционирования которых требуется переменный ток 220В, 50Гц. Портативный преобразователь постоянного тока в переменный (инвертор) позволяет подавать питание на нагрузку с потребляемой мощностью 500Вт.

Двигатель постоянного тока и регулятор скорости:

Интерфейс двигателя постоянного тока со схемой контроллера привода состоит из регулятора сопротивлений для обеспечения требуемой силы и напряжения тока для питания двигателя постоянного тока. Схема питается от контроллера заряда аккумулятора и фотоэлектрической панели. Двигатель постоянного тока вращает полый цилиндр через приводной ремень (зубчатый ремень высокомоментного привода) и потребляет ток 12 В и 0,1 А с моментом 6,8 Н·м.

2.4. Солнечный дистиллятор с фотоэлектрическим диффузионно-абсорбционным холодильником (СДДАХ).

Экспериментальная установка представляет собой два типа солнечных дистилляторов. Первый тип – это традиционный солнечный дистиллятор (ТСД), второй тип – это модифицированный солнечный дистиллятор (солнечный дистиллятор с применением диффузионно-абсорбционного холодильника (СДДАХ)). Детально традиционный солнечный дистиллятор разобран в разделе 2.2. В данном разделе целью является увеличение производительности опреснения воды за счет введения в солнечный дистиллятор воды диффузионно-абсорбционной холодильной системы (ДАХ), которая состоит из генератора, конденсатора, испарителя, теплообменника и абсорбера. В данной работе осуществлена инновационная попытка объединения двух систем, для ДАХ требуется относительно небольшая мощность (около 79-100 Вт), которую может обеспечить солнечная панель мощностью 110 Вт. Испаритель диффузионно-абсорбционного холодильника был помещен под верхнюю часть крышки из оргстекла солнечного дистиллятора в небольшом изолированном коробе для предотвращения проникновения солнечного света. При этом конденсатор диффузионно-абсорбционного холодильника был погружен в емкость с водой солнечного дистиллятора. Конденсатор способствует повышению температуры воды в емкости солнечного дистиллятора (интенсификация процесса испарения), особенно в первые часы работы дистилляционной системы, в пасмурную погоду и ночью. Таким образом, вода в емкости солнечного дистиллятора нагревается от двух источников: солнечного излучения и конденсатора абсорбционного холодильника. При этом испаритель абсорбционного холодильника способствует конденсации большего количества водяного пара. Часть водяного пара конденсируется на внутренней поверхности крышки из оргстекла, а остальная часть конденсируется на поверхности испарителя абсорбционного холодильника, как показано на Рисунке 2.13.



Рисунок 2.13 – Принципиальная схема модифицированного солнечного дистиллятора и фотография для ТСД и СДДАХ.

2.4.1. Модель диффузионно-абсорбционный холодильник (ДАХ)

Модель ДАХ представляет собой традиционный солнечный дистиллятор с применением диффузионно-абсорбционного холодильника ДАХ для увеличения производительности опреснения воды и поддержания опреснения в ночное время.



Рисунок 2.14 – Принципиальная схема системы ДАХ.

На Рисунке 2.14, представлена принципиальная схема работы Triplefluid Platen-Munters. В точке 5 концентрированный раствор, поступающий из абсорбера в генератор, нагревается электронагревателем (79-100 Вт), в результате чего образуются пары аммиака. Из-за выталкивающей силы образующиеся пары аммиака движутся вверх, унося разбавленный раствор в верхнюю часть канала. В верхнем уровне канала пары аммиака отделяются от разбавленного раствора. В точке 1 хладагент в виде паров аммиака поступают в конденсатор с высоким давлением и температурой, после чего конденсируются за счет отвода тепла в окружающий воздух. В точке 2 конденсат поступает в испаритель, в котором парциальное давление снижается из-за присутствия в нем газообразного водорода. В условиях низкого давления аммиак испаряется, поглощая тепловую энергию из охлаждаемого пространства. Пары аммиака диффундируют через газообразный водород с образованием охлажденной смеси, стекающей в абсорбер в точке 3 из-за выталкивающей силы. Внутри абсорбера абсорбируется слабый раствор, который поступает из точки 6 пузырьковой накачки, кроме того, при абсорбции происходит отвод тепла в окружающую среду. В результате температура газообразного водорода растет, и он поступает обратно в испаритель в точке 4 из-за выталкивающей силы. Таким образом циркуляция жидкостей по системе поддерживается гравитацией и выталкивающей силой. Концентрированный раствор (вода + аммиак) в абсорбере течет обратно в генератор в точке 5. фотоэлектрическая панель (18,60 В постоянного тока и 5,92 А) и пиковая мощность (110 Вт) используется для поддержания в нагревателе генератора напряжения 220 В через преобразователь тока в дневное время. Для работы в ночное время используется аккумулятор. [91],[92].

2.4.2. Определение параметров и ход эксперимента.

Процесс конденсации внутри солнечного дистиллятора по большей части зависит от разницы температур между водой в емкости и крышкой из оргстекла (от свободной конвекции, вызванной выталкивающей силой из-за разности плотности пара). Когда вода в емкости нагревается, ее плотность в пограничном слое меняется, и в нем происходит испарение части молекул воды. Образующийся пар поднимается и замещает более холодный пар, который, в свою очередь, так же нагревается и поднимается. Это явление принято называть естественной или свободной конвекцией. Когда пар достигает более холодной поверхности, он отдает часть своей энергии и конденсируется. Количество конденсирующегося пара увеличивается с увеличением разницы температур между двумя поверхностями. Таким образом, в данном исследовании были изучены два фактора: первый – повышение температуры воды в емкости, а второй – увеличение площади поверхности конденсации в верхней части солнечного дистиллятора. Начальная температура воды в емкости является важным параметром, напрямую влияющим на производительность и эффективность солнечного дистиллятора. Во время экспериментов было замечено, что температура воды в емкости в утреннее время была низкой и составляла около 18 °C. Таким образом, чтобы решить эту проблему, конденсатор ДАХ был погружен в емкость для повышения температуры воды в ней. Для увеличения разницы температур внутри солнечного дистиллятора испаритель был

помещен в небольшой теплоизолированный короб под крышкой из оргстекла в верхней части дистиллятора, чтобы солнечные лучи не падали на него. Все тесты проводились с 08:00 до 08:00 следующих суток (24 часа) в разные дни. Ежечасно регистрировались следующие данные: температуры крышки из оргстекла, облицовки емкости, воды в емкости, испарителя; интенсивность солнечного излучения, скорость ветра и производительность опреснения воды. Исследование проводилось в течение одного месяца с различными условиями окружающей среды, при восходе и заходе солнца в промежутке с 05:20 до 20:40. Данное исследование состояло из двух этапов. На первом этапе была исследована производительность опреснения воды традиционных дистилляторов. На втором этапе исследовалось влияние применения установки ДАХ в ТСД на производительность дистилляционной системы. Все экспериментальные исследования проводились в течение 10 дней, причем 27 июля и 28 июля 2019 года приняты за идеальные дни.

2.5. Солнечный дистиллятор с ультразвуковым увлажнителем (СДУУ).

Из-за ультразвукового капиллярного эффекта, возбуждаемого увлажнителем, в слоях воды в емкости возникают возмущения (явление гидравлического удара), в результате чего образуется мелкодисперсный аэрозоль [37, 38]. Мелкодисперсный аэрозоль нельзя считать водяным паром, следовательно, возможно содержание примесей, таких как соли и бактерии. В модифицированный солнечный дистиллятор была установлена хлопчатобумажная ткань для предотвращения попадания не опресненной жидкой воды с примесями от ультразвуковых увлажнителей в верхнюю часть солнечного дистиллятора (на стеклянную крышку) и уменьшения характеристического размера между поверхностью испарения и крышкой из оргстекла.

На Рисунке 2.15, показана фотография двух моделей дистилляторов, традиционного солнечного дистиллятора (ТСД) и предлагаемого солнечного дистиллятора (СДУУ). Для сравнения тепловых характеристик двух моделей они

65

исследовались при одинаковых размерах и эксплуатационных параметрах. Детально традиционный солнечный дистиллятор рассмотрен в разделе 2.2.



Рисунок 2.15 – Фотография предлагаемого солнечного дистиллятора (СДУУ) и традиционного солнечного дистиллятора (ТСД).

2.5.1. Предлагаемый солнечный дистиллятор

На Рисунке 2.16, представлена принципиальная схема предлагаемого солнечного дистиллятора. Внутри предлагаемого солнечного дистиллятора были использованы три ультразвуковых увлажнителя (распылителя аэрозоля), которые были помещены в воду в емкости внутри каркаса из поликарбоната и оболочки из хлопчатобумажной ткани, как показано на Рисунке 2.17. В Таблице. 2.1 приведены размеры поликарбонатного каркаса и технологические характеристики ультразвукового увлажнителя.

i pusmepbi kupkueu ni noinikupoonuru			
Ультразвуковой увлажнитель			
Диаметр	45мм		
Расход аэрозоля	Более 400 cc/har		
Рабочее напряжение	24 B		
Мощность	14 Вт		

Таблица. 2.1 – Технологические характеристики ультразвукового увлажнителя и размеры каркаса из поликарбоната

Емкость	160 мл		
Каркас из поликарбоната			
Длина	93 см		
Ширина	45 см		
Большая высота	20 см		
Меньшая высота	12 см		



Рисунок 2.16 – Принципиальная схема предлагаемого солнечного дистиллятора (СДУУ).1- крышка из оргстекла; 2- МДФ; 3- Хлопчатобумажная ткань; 4- Механический поплавок; 5- Металлические ножки; 6- Емкость с водой; 7-Вода в емкости; 8- Ультразвуковые увлажнители; 9- Градуированный цилиндр; 10- Резервуар питательной воды.

2.5.2. Методика эксперимента.

Все экспериментальные исследования проводились в Уральском Федеральном университете с 08:00 до 20:00 в течение июля 2020 года, а 24 июля выбран в качестве типичного дня в климатических условиях Екатеринбурга, Россия, солнечный дистиллятор был зафиксирован в южном направлении, время восхода и захода солнца равнялись 07:05 (96° Восток) и 18:26 (263° За-

пад) соответственно. Масса воды в резервуаре составляла 21,5 кг, что соответствовало высоте воды в емкости примерно 5 см. При данной высоте производительность ультразвукового увлажнителя идеальна, и соответствует стандартным размерам увлажнителя. Ежечасно регистрировались следующие данные: температуры воды в емкости, хлопчатобумажной ткани, крышки из оргстекла и окружающего воздуха, интенсивность солнечного излучения и продуктивность опреснения воды.



Рисунок 2.17 – Фотография; 1- каркаса из поликарбоната; 2- ультразвукового увлажнителя; 3- Ультразвуковой увлажнитель внутри емкости с водой, и 4-Хлопчатобумажная ткань внутри каркаса из поликарбоната в предлагаемом солнечном дистилляторе

2.6. Пленочный солнечный дистиллятор с алюминиевой конденсационной пластиной (ПСДАКП).

Процесс конденсации – это осаждение водяного пара из окружающего воздуха на открытых поверхностях, которые холоднее окружающего воздуха, таких как листья растений, деревья, стеклянные панели, плиты и т. д. Конденсат в виде жидких капель воды или роса обычно образуется ночью или в тени, при неподвижном воздухе или слабом ветре. Выпадение росы происходит изза того, что большинство открытых объектов излучают больше тепла, чем окружающий воздух, что и охлаждает их. Температура, при которой на этих телах образуется роса, называется точкой росы, то есть температурой, при которой воздух, окружающий объекты, достигает точки насыщения.

В соответствии с этим принципом предлагаемый солнечный дистиллятор предназначен для получения пресной воды из водяного пара, (образующегося в солнечном дистилляторе) путем пропускания его через более холодную поверхность (оребренная алюминиевая пластина), которая естественным путем охлаждается окружающими воздушными потоками. Соленая вода распыляется с верхней части солнечного дистиллятора на абсорбирующую пластину небольшими форсунками. Микро-водяной насос использовался для циркуляции воды между солнечным дистиллятором и изолированным резервуаром для воды (40 см в длину, 20 см в ширину и 10 см в высоту) с очень низким расходом 0,066 л/мин. Насос обеспечен электроэнергией от фотоэлектрической панели мощностью 20 Вт. Абсорбирующая пластина нагревается солнечным излучением, при этом водяная пленка в виде капель падает на эту горячую пластину и испаряется, часть водяного пара конденсируется на внутренней поверхности стеклянной крышки солнечного дистиллятора, а оставшуюся часть пара уносит воздушный поток вверх (за счет выталкивающей силы), пропуская его через холодную алюминиевую пластину и затем конденсируя водяной пар на ее поверхности.

2.6.1. Экспериментальная установки и ее метод

На Рисунках (2.18 и 2.19) показаны принципиальная схема и фотография пленочного солнечного дистиллятора. Дистилляционная система имеет размеры 100 см в длину, 50 см в ширину и 10 см в глубину, солнечный водяной дистиллятор расположен под углом 25°. Рассматриваемый солнечный дистиллятор состоит из деревянного корпуса, стеклянной крышки, абсорбирующей пластины, двух алюминиевых каналов для сбора дистиллированной воды,

69

форсунок с подводом питательной воды, микро-насоса, расходомера и резервуара с водой. Деревянный корпус состоит из рамы 100 см в длину, 50 см в ширину, 10 см в высоту, 1,8 см в толщину и плиты МДФ 100 см в длину, 50 см в ширину, 1,8 см в толщину, находящейся в задней части солнечного дистиллятора. Стеклянная крышка имеет длину 100 см, ширину 50 см и толщину 0,4 см. Низ солнечного дистиллятора воды покрыт абсорбирующей пластиной из нержавеющей стали длиной 100 см, шириной 50 см и толщиной 0,1 см, покрытой матовой черной краской, чтобы увеличить его способность поглощать солнечный свет. Между панелью МДФ и абсорбирующей пластиной была помещена стекловата толщиной 1 см, для уменьшения теплопотерь от абсорбирующей плиты. Вверху солнечного дистиллятора был установлен прямоугольный канал с размерами 60 см в длину и 30 см в ширину. Нижняя поверхность канала представляет собой лист алюминия с ребрами толщиной 0,1 см, а верхняя поверхность канала покрыта панелью МДФ для предотвращения попадания солнечного света на поверхность алюминиевой пластины. Алюминиевая пластина пленочная на 30° к горизонту, для обеспечения контакта влажного воздуха с ее поверхностью.



Рисунок 2.18 – Принципиальная схема предлагаемого солнечного дистиллятора (ПСДАКП).



Рисунок 2.19 – Фотография предлагаемого солнечного дистиллятора, 1- Передняя сторона, 2- Задняя сторона, 3- Микро-насос и аккумулятор, 4- Расходомер.

Все тесты проводились в Уральском Федеральном университете с 08:00 до 20:00 в течение июля 2020 года, а 29 июля выбран в качестве типичного дня в климатических условиях Екатеринбурга, Россия, солнечный дистиллятор был зафиксирован в южном направлении. Ежечасно регистрировались следующие данные: температуры абсорбирующей пластины, стеклянной крышки, воды на входе в солнечный дистиллятор, воды на выходе из солнечного дистиллятора, алюминиевой пластины и окружающего воздуха, интенсивность солнечного излучения и продуктивность опреснения воды.

2.7. Пленочный солнечный дистиллятор с тканевой испарительной поверхностью и термоэлектрическим алюминиевым каналом. (ПСДТАК).

Структура и геометрические размеры модифицированного солнечного дистиллятора изложены в разделе 2.6, за исключением того, что к поверхности поглощающей пластины была добавлена хлопковая сетчатая ткань, а в верхней части солнечного дистиллятора введен внешний конденсирующий канал. Поверхность поглощающей пластины покрыта черной сетчатой тканью (толщиной 1 мм), поверхность которого имеет форму поверхности поглощающей пластины. На алюминиевой пластине установлены четыре термоэлектрических модуля охлаждения (ТЭО) различной компоновки для интенсификации конденсации пара и повышения производительности. После прохождения через термоэлектрический конденсатор сконденсировавшийся пар собирается в градуированный контейнер. Весь канал теплоизолирован эластомерной пеной для предотвращения теплопотерь канала термоэлектрического конденсатора. На Рисунках (2.20 и 2.21) показаны принципиальная схема и фотография пленочного солнечного дистиллятора (ПСДТАК)..



Рисунок 2.20 – Принципиальная схема предлагаемого солнечного дистиллятора (ПСДТАК).


Термоэлектрическое охлаждение (элемент Пельтье)

Рисунок 2.21 – Фотография предлагаемого солнечного дистиллятора (ПСДТАК).

Все тесты проводились в Уральском Федеральном университете с 08:00 до 20:00 с мая по июль 2021 года, 16 июня был принят в качестве типичного дня в климатических условиях Екатеринбурга, Россия, солнечный дистиллятор был ориентирована в южном направлении. Каждый час записывались следующие данные: температура поглощающей пластины, стеклянной крышки, воды на входе в солнечный дистиллятор, воды на выходе из солнечного дистиллятора, температура алюминиевой пластины и окружающего воздуха, интенсивность солнечного излучения и производительность опреснения воды.

2.8. Методика измерений.

В экспериментальной части для проверки производительности и эффективности солнечных дистилляторов были измерены следующие базовые величины:

1. Температуры в различных точках рассматриваемого солнечного дистиллятора.

2. Интенсивность солнечного излучения.

3. Скорость ветра.

4. Расход воды.

5. Скорость вращения вращающегося полого цилиндра.

6. Совокупная производительность дистиллированной воды солнечного дистиллятора.

2.8.1. Измерение температур

4-канальный регистратор данных с SD-картой и термопарами К-типа (модель 88598) использовался для измерения температуры в различных точках солнечных дистилляторов, как показано на Рисунке 2.22 (А). Регистратор температуры 88598 AZ К-типа может замерять и отображать температуру из 4 различных источников, а пользователь может присоединить к регистратору свои собственные термопары К-типа. Значение температуры сохраняется в формате ТХТ на SD-карту, после чего пользователь может продолжить анализ с помощью Excel или другого программного обеспечения. При этом для плоского солнечного коллектора воды измеренные температуры отображались с помощью ОВЕН МВ110-8А с модулем сбора данных (МСД-200), как показано на Рисунке 2.22 (Б). Во всех экспериментах измерения температур проводились в основном с использованием термопар К-типа (хромель/алюмель). Для проверки термопары перед исследованием теплообмена все термопары были помещены в водяной термостат, где они были откалиброваны с помощью обычного ртутного термометра с делением шкалы 0,1 °С. Температуры, считываемые модулем сбора данных (МСД-200) и устройством регистрации данных с SD-картой, сравнивались с показаниями термометра в диапазоне от 0 до 100 °С с интервалом 20 °С. На Рисунке А.1. в Приложении-А. отображены результаты калибровки.



Рисунок 2.22 – Фотография устройств измерения температуры, (А) 4-канальный регистратор данных с SD-картой, (Б) модуль сбора данных МСД-200.

2.8.2. Измерение интенсивности солнечного излучения

Измеритель солнечного излучения TENMARS TM-207 с внешним 1.5 м сенсором и ЖК-дисплеем, с диапазоном измерений от 0 до 2000 Вт/м² использовался для замера интенсивности солнечного излучения, падающего на плоский солнечный коллектор воды и солнечный дистиллятор, как показано на Рисунок 2.23. Градуировочная кривая измерителя солнечного излучения представлена на Рисунке А.2 в Приложении-А.



Рисунок 2.23 – Измеритель солнечного излучения.

2.8.3. Измерение скорости ветра

Измерение скорости ветра проводилось при помощи лопастного цифрового анемометра модели UT363, измерителя скорости ветра и температуры воздуха. Это малоразмерное устройство непосредственно отображает скорость воздушного потока на ЖК-дисплее, как показано на Рисунке 2.24. Диапазон измерения составляет от 0 до 30 м/с, с точностью ± 0,05 м/с. Градуировочная кривая измерителя скорости ветра приведена на Рисунке А.3 в Приложении-А.



Рисунок 2.24 – Цифровой анемометр.

2.8.4. Измерение расхода

Расходомер с диапазоном от 0,2 до 5 л/мин использовался для измерения расхода воды через плоский солнечный коллектор воды, как показано на Рисунке 2.25. Градуировочная кривая расходомера на Рисунке А.4 в Приложении-А.



Рисунок 2.25 – Расходомер.

2.8.5. Тахометр

Фотоконтактный тахометр типа DT-2236В с диапазоном от 0 до 30000 об/мин использовался для измерения скорости вращения вращающегося полого цилиндра модифицированного солнечного дистиллятора. Градуировочная кривая тахометра представлена на Рисунке A.5 в Приложении-А.

2.8.6. Электронное измерение массы

Электронные весы типа 14192-722Е с диапазоном от 0 до 40 кг использовались для измерения массы дистиллированной воды, выработанной в солнечном дистилляторе. Градуировочная кривая тахометра представлена на Рисунке А.6 в Приложении-А.

2.9. Физические и химические тесты дистиллированной воды

Физические и химические свойства требуются для определения качества воды, будь то питьевая вода или пресная вода, полученная в солнечном дистилляторе. Физические и химические свойства воды особенно важны при

определении ее пригодности для употребления человеком. Каждый показатель сравнивался с утвержденными стандартами в Таблице 2.2 следующим образом:

1. Общая минерализация и электропроводимость: Измерения проводились с помощью цифрового измерителя общей минерализации и электропроводимости (TDS&EC) питьевой воды.

2. pH: Измерения проводились при помощи цифрового измерителя pH питьевой воды.

Таблица 2.2 – Максимально допустимые значения по стандартам ВОЗ и России.

N⁰	Величина	Единица из-	Стандарт	
		мерения	BO3 [95], [96]	Россия[97],
				[98]
1	Общая минерализация	миллион-	500	1000
	(TDS)	ных долей		
2	pH	-	6.5-8.5	6-9
3	Электропроводимость,	мкСм/см	1000	1000
	(EC)			

2.10. Анализ экспериментальной погрешности

В настоящем исследовании использовался метод, предложенный Холманом [99] для оценки неопределенности результатов. Пусть W_R – это неопределенность результата, а W_1 , W_2 , W_3 , ..., W_n – это неопределенности независимых величин. Неопределенность результата рассчитывается по уравнению, предложенному Холманом [99], как показано далее:

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_2} W_2 \right)^2 + \cdots \left(\frac{\partial R}{\partial X_n} W_n \right)^2 \right]^{0.5}$$
(2-1)

В Таблице 2.3 приведена неопределенность, связанная со следующим экспериментальным измерительным оборудованием: измеритель солнечного излучения, термопары, анемометр, градуированный цилиндр, измеритель минерализации и измеритель pH. Минимальная погрешность равна отношению между ценой деления и минимальным значением измеренной величины (Сритар [100]). Часовая выработка дистиллята $m_h = f(d)$, где d –

глубина воды в колбе (градуированный цилиндр). Согласно формуле (2), общая неопределенность часовой выработки конденсата может быть записана как:

$$W_m = \left[\left(\frac{\partial m}{\partial m_1} W_d \right)^2 \right]^{0.5} \tag{2-2}$$

Согласно уравнению (1), общая неопределенность термического КПД (η) – рассчитывается как (А – это константа, а h_{fg} , P_{motor} и P_{Pump} – приняты постоянными):

$$W_{\eta_{th}} = \left[\left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial I(t)} W_{I(t)} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial motor} W_{motor} \right)^2 + \left(\frac{\partial \eta_{th}}{\partial Pump} W_{Pump} \right)^2 \right]^{0.5}$$
(2-3)

Таким образом, итоговая погрешность измеренной суточной производительности равна ±1.2%. Кроме того, итоговая погрешность рассчитанного КПД солнечного дистиллятора равна ±3%.

Таблица 2.3 – Неопределенность, стандартная неопределенность, погрешность и диапазон измерений устройств

Устройство	Точность	Диапазон	Стандартная	Погреш-
			неопределен-	ность, %
			ность	
Измеритель	<u>±1</u> Вт/м ²	0	$\pm 0.5 \text{ BT/m}^2$	1.5
солнечного		— 2000 Вт/м ²		
излучения				
Измеритель	±1 °C	0-100°C	±0.57 °C	1.3
температур				
Анемометр	0.05 м/с	0-30 м/с	±0.05 м/с	3
Градуирован-	<u>±</u> 5 мл	0 — 2000 мл	<u>±0.577 мл</u>	2
ный цилиндр				
Расходомер	<u>±0.2</u> л/мин	0-5 л/мин	±0.05 л/мин	5
Измеритель	± 0.01	0 – 9999	± 0.0058	10
минерализа-	миллионных	миллионных	миллионных	
ции	долей	долей	долей	
Измеритель	$\pm 0.01 pH$	0 – 14 <i>pH</i>	$\pm 0.0058 pH$	10
pH				

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА ФИЗИЧЕСКИХ И МАТЕМАТИЧЕ-СКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИСТИЛ-ЛЯЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ.

3.1. Введение

В данной главе демонстрируется порядок теоретического анализа традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов воды с вращающимся полым цилиндром и внешним солнечным коллектором воды.

На Рисунке (2.5) в главе 2 показана принципиальная схема экспериментальной установки, состоящей из резервуара с регулируемым расходом неочищенной воды для солнечного дистиллятора и плоского солнечного коллектора, используемого для предварительного нагрева воды в емкости солнечного дистиллятора. За счет силы тяжести вода протекает из резервуара питательной воды в солнечный дистиллятор. Небольшой насос используется для обеспечения циркуляции воды между плоским солнечным коллектором и емкостью солнечного дистиллятора. Использование циркуляционного насоса воды необходимо для преодоления потерь на трение в трубах, а емкость солнечного дистиллятора является по сути вторым накопительным резервуаром плоского коллектора.

Последующий численный анализ применялся к комплексному процессу без прибегания к дорогостоящим прототипам и сложным экспериментальным измерениям. Для проведения теоретических расчетов использовался язык программирования FORTRAN 90. Чтобы создать теоретическую модель системы, необходимо составить баланс тепловой энергии для каждого компоненте этой системы.

3.2. Полезная энергия плоского солнечного коллектора

Плоский солнечный коллектор использовался для предварительного нагрева воды в емкости солнечного дистиллятора. Плоский солнечный коллектор представлял собой деревянный короб с крышкой из стекла толщиной 4 мм, 30 черных поглотительных медных трубок, лежащих на черной поглотительной пластине из нержавеющей стали, как показано на Рисунках 2.7 и 2.8 в главе 2.

Для построения модели системы солнечного нагрева были приняты следующие допущения [101]:

1. Процесс стационарный.

2. Торцы (верхний и нижний) составляют небольшую часть площади поверхностей коллектора, таким образом, ими можно пренебречь.

3. От торцов коллектора поступает однородный поток.

4. Поглощения солнечного излучения стеклянной крышкой не происходит, так как отсутствует влияние на теплопотери коллектора.

5. Тепловой поток через крышку имеет одномерен.

6. Падением температуры на крышке коллектора можно пренебречь.

7. Стеклянная крышка не пропускает инфракрасное излучение.

8. Тепловой поток через черную термоизоляцию одномерен.

9. Небо принято за абсолютно черное тело для длинноволнового излучения при его эквивалентной температуре.

10. Градиенты температуры по направлению потока и между трубками можно рассматривать раздельно.

11. Свойства не зависят от температуры.

12. Влиянием пыли и грязи на коллектор можно пренебречь.

13. Затенением поглотительной пластины коллектора можно пренебречь.

Уравнения баланса энергии для плоского солнечного коллектора:

$$Q_u = A_{s.c} \cdot F_R \cdot \left[S - U_L \left(T_{w,sci} - T_a \right) \right]$$
(3-1)

$$Q_u = \dot{m}_w \cdot Cp_w \cdot \left(T_{w,sco} - T_{w,sci}\right) \tag{3-2}$$

Где: Q_u – полезная энергия от солнечного коллектора, $A_{s.c}$ – это площадь поверхности коллектора (м²), $U_L(T_{w,sci} - T_a)$ – это потери теплообмена солнечного коллектора окружающей среде посредством теплопроводности, конвекции и излучения, $T_{w,sco}$ – это температура воды на выходе из солнечного коллектора (°C), $T_{w,sci}$ – это температура воды на входе из солнечного коллектора (°C), T_a – это температура окружающего воздуха (°C), \dot{m}_w – это массовый расход воды (кг/с) и Cp_w – это удельная теплоемкость воды (кДж/кг·°C).

Достаточно удобно ввести величину, связывающую действительную полезную энергию, получаемую коллектором, с полезной энергией, которую получал бы коллектор, если бы температура всей поверхности коллектора равнялась температуре воды на входе. Эта величина называется коэффициентом отвода тепла от коллектора F_R , которая рассчитывается следующим образом [101]:

$$F_{R} = \frac{\dot{m}_{w} \cdot cp_{w}(T_{w,sco} - T_{w,sci})}{A_{s \cdot c}[s - U_{L}(T_{w,sci} - T_{a})]}$$
(3-3)

$$F_R = \frac{\dot{m}_w \cdot cp_w}{A_{s.c} \cdot U_L} \left[1 - e^{\left(-\frac{A_{s.c} \cdot U_L \cdot F'}{m_w \cdot cp_w} \right)} \right]$$
(3-4)

$$F' = \frac{U_{Lo}}{U_L} = \frac{\frac{1}{U_L}}{w \left[\frac{1}{U_L [d_0 + (w - d_0) \cdot F]} + \frac{1}{c_c} + \frac{1}{\pi \cdot d_i h_{fi}} \right]}$$
(3-5)

Где: F' – это коэффициент эффективности солнечного коллектора, U_{Lo} – это коэффициент теплопотерь от воды к окружающему воздуху, U_L – это коэффициент теплопотерь от поглотительной пластины к окружающему воздуху, w – это расстояние между трубками (м), F – это эффективность ребер при прямом оребрении, d_o – это внешний диаметр трубки (м), d_i – это внутренний диаметр трубки (м) и C_c – это теплопроводность трубок (Вт/м·К).

Потери тепловой энергии через верхнюю и нижнюю поверхности, поступление солнечной энергии и получаемая полезная тепловая энергия показаны в схеме теплообмена на Рисунке (3.1). Ее можно преобразовать в тепловую сеть, как показано на Рисунке (3.2). Потери тепловой энергии через верхнюю поверхность происходят в результате конвекции и излучения от поглотительной пластины к окружающей среде.



Рисунок 3.1 – Схема теплообмена плоского солнечного коллектора (а) для термического сопротивления теплопроводности, конвекции и излучения; (b) для термического сопротивления между пластинами [101].



Рисунок 3.2 – Эквивалентная схема теплообмена плоского солнечного коллектора [101].

Установившаяся теплопередача между поглотительной пластиной и стеклянной крышкой эквивалентна теплопотерям от верхней поверхности

стеклянной крышки к окружающему воздуху [101]. Теплопотери через верхнюю поверхность на единицу площади, таким образом, равны теплопередаче от поглотительной пластины к стеклянной крышке:

$$Q_{Loss \ top, \ P-gi} = h_{C,P-gi} \Big(T_P - T_{gi} \Big) + \frac{\sigma(T_P^4 - T_{gi}^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_{gi}} - 1}$$
(3-6)

Где $h_{C, P-g_i}$ – это коэффициент теплопередачи свободной конвекцией между поглотительной пластиной и внутренней поверхностью стеклянной крышки. Теплопередача свободной конвекцией обычно описывается при помощи трех безразмерных параметров: число Нуссельта (*Nu*), число Рэлея (*Ra*) и число Прандтля (*Pr*), которые равны:

$$N_u = \frac{h_{C,P-gi} \cdot L}{K} \tag{3-7}$$

$$R_a = \frac{g \cdot \beta' \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu * \alpha'} \tag{3-8}$$

$$P_r = \frac{C_P \cdot \mu}{K} = \frac{\nu}{\alpha} \tag{3-9}$$

Где L – это расстояние между поглотительной пластиной и стеклянной крышкой (*м*), а свойства воздуха представлены следующими величинами: *K* – это теплопроводность (*Bm/м·K*), *g* – это ускорение свободного падения на Земле (*м/c*²), β' – это коэффициент объемного расширения (для идеального газа β' = 1/*T*), ΔT – это разница температур между поглотительной пластиной и стеклянной крышкой (K), *v* – это кинематическая вязкость (*м*²/*c*) и *α* – это коэффициент температуропроводности (*м*²/*c*). Для углов наклона от 0° до 75° связь между числом Нуссельта (*Nu*) и числом Рэлея (*Ra*) представлена Холландом и др. [101]:

$$N_{\rm u} = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\beta)^{1.6}}{R_a \cdot \cos\beta} \right] \left[1 - \frac{1708}{R_a \cdot \cos\beta} \right] \left[\left(\frac{R_a \cdot \cos\beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]$$
(3-10)

Теплопотери, таким образом:

$$Q_{Loss top, P-gi} = (h_{C, P-gi} + h_{r, P-gi})(T_P - T_{gi})$$
(3-11)

Где *h_{r, P-gi}* – это коэффициент теплообмена излучением между поглотительной пластиной и стеклянной крышкой [102]:

$$h_{r, P-gi} = \frac{\sigma(T_P^2 + T_{gi}^2)(T_P + T_{gi})}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{gi}} - 1}$$
(3-12)

Где σ – это постоянная Стефана-Больцмана (5,67 · 10⁻⁸ $\frac{BT}{M^2K^4}$), ε_p – это излучательная способность пластины, равная 0.23, и ε_g – это излучательная способность стекла, равная 0.88. Термическое сопротивление R₂ может быть выражено как:

$$R_2 = \frac{1}{h_{C,P-gi} + h_{r,P-gi}}$$
(3-13)

Термическое сопротивление от внешней поверхности стеклянной крышки к окружающей среде аналогично уравнению (3-13), но коэффициент теплообмена конвекцией $h_{C, go-a}$ (*Bm/м·K*) из-за влияния ветра выражается следующим образом [103]:

$$h_{C, go-a} = 2,8 + 3 \cdot V_a \tag{3-14}$$

Где V_a – это скорость ветра (м/с);

Термическое сопротивление также зависит от теплоотдачи излучением от верхней крышки к окружающей среде при T_{sky}. Таким образом, коэффициент теплообмена излучением может быть записан, как [104]:

$$h_{r, go-sky} = \sigma \cdot \varepsilon_g \cdot \left(T_{sky}^2 + T_{go}^2\right) \left(T_{sky} + T_{go}\right)$$
(3-15)

Точная модель температуры неба разработана Бердалем и Мартином (1984) и равна [101]:

$$T_{sky} = T_a[(0,711 + 0,0056T_{dp} + 0,000073T_{dp}^2 + 0,013\cos(15t))]^{1/4}$$
 (3-16)
Где T_{sky} и T_a выражаются в [K], T_{dp} – это температура точки росы (°С) и t –
это время после полуночи (ч).

Термическое сопротивление теплоотдаче к окружающей среде R₁ равняется:

$$R_1 = \frac{1}{h_{C,go-a} + h_{r,go-sky}}$$
(3-17)

Следовательно, коэффициент теплопотерь от верхней поверхности плоского коллектора к окружающей среде равна:

$$U_{top} = \frac{1}{R_1 + R_2} \tag{3-18}$$

$$Q_{Loss \ top, \ go-a} = \left(h_{C, \ go-a} + h_{r, \ go-sky}\right) \left(T_{go} - T_{sky}\right) \tag{3-19}$$

Процедура расчета коэффициента теплопотерь от верхней поверхности является итерационным процессом. Сначала делается предположение о величине неизвестной температуры крышки, по которой затем рассчитываются коэффициенты конвективной и радиационной теплопередачи между параллельными поверхностями. После данного приближения уравнение (3-18) может быть решено для нахождения коэффициента теплопотерь от верхней поверхности.

Теплопотери от нижней поверхности коллектора описывается двумя термическими сопротивлениями, R_3 и R_4 на Рисунке (3.1). Где R_3 представляет собой термическое сопротивление теплоизоляции и равняется:

$$R_3 = \frac{L}{K_{ins}} \tag{3-20}$$

Где K_{ins} – это теплопроводность теплоизоляции (Вт/м · К), а L – это толщина деревянной теплоизоляции (0,03 м).

R₄ представляет собой термическое сопротивление теплоотдаче конвекцией и излучением окружающей среде. R₄ может быть выражено как:

$$R_4 = \frac{L}{h_{C,b-a} + h_{r,b-sky}} \tag{3-21}$$

Где $h_{c, b-a}$ Коэффициент теплообмена конвекцией ($\frac{B_{T}}{M^{2}}$. К) окружающей среде выражается как [103];

$$h_{C, b-a} = 2,8 + 3 \cdot V_a \tag{3-22}$$

Где *V_a* – это скорость ветра окружающего воздуха (м/с);

Термическое сопротивление теплоотдаче излучением от нижней поверхности определяет теплообмен излучением с окружающей средой при T_{sky} . Таким образом, коэффициент теплообмена излучением можно выразить как: $h_{r,b-sky} = \sigma \cdot \varepsilon_b \cdot (T_b^2 + T_{sky}^2) (T_b + T_{sky})$ (3-23)

 ε_b – это излучательная способность нижней поверхности.

Следовательно, коэффициент теплопотерь от нижней поверхности плоского коллектора к окружающему воздуху:

$$U_{bottom} = \frac{1}{R_3 + R_4} \tag{3-24}$$

Теплопотери от боковой поверхности оцениваются путем введения одномерности теплового потока по периметру боковой поверхности коллекторной системы. Потери от боковой поверхности соотносятся с площадью коллектора. Если произведение коэффициента теплопотерь от боковой поверхности на площадь – (UA)_{edge}, то коэффициент теплопотерь от боковой поверхности равен:

$$U_{edge} = \frac{(UA)_{edge}}{A_{s.c}}$$
(3-25)

Если принять, что все теплопотери происходят при одной температуре T_a , общий коэффициент теплопотерь коллектора U_L – это сумма коэффициентов теплопотерь о верхней, нижней и боковой поверхностей:

$$U_L = U_{top} + U_{bottom} + U_{edge} \tag{3-26}$$

Поглотительная пластина и набор трубок показаны на Рисунке 3.3. Расстояние между трубками W = 2 см, диаметр трубок был выбран как внутренний диаметр ($d_i = 16$ мм) и внешний диаметр $d_o = 17$ мм. Функция F – это эффективность оребрения для прямых ребер [101]:

$$F = \frac{tanh\left[m(\frac{w-d_o}{2})\right]}{m\left(\frac{w-d_o}{2}\right)}$$
(3-27)

Где
$$m = \sqrt{\frac{U_L}{K \cdot \delta}}$$
 (3-28)

Поглотительная пластина толщиной $\delta = 1$ мм. Предполагается, что материал поглотительной пластины обладает высокой теплопроводностью, k – это теплопроводность поглотительной пластины (Вт/м·К), а температурный градиент через поглотительную пластину незначителен. Трубка изготовлена из меди и закреплена к поглотительной пластине фиксирующими зажимами. Предполагается, что теплопроводность зажимов C_c очень велика (т. е. $\frac{1}{C_c} = 0$). Внутренний диаметр трубы – d_i , а h_{fi} – коэффициент теплоотдачи между водой и стенкой трубы. Поток воды в трубке ламинарный и имеет число Рейнольдса $Re_d = 202,5$ [101]. h_{fi} можно рассчитать из эмпирического соотношения, предложенного Зидером и Тейтом для ламинарного теплообмена в трубках [104]:



Рисунок 3.3 – Размеры поглотительной пластины и трубок [101].

$$S = I_T \cdot (\tau \alpha)$$
 (3-30)
Где: S – это общее поглощенное солнечное излучение (Вт/м²), (τ . α) – произве-
дение коэффициентов пропускания и поглощения, свойство системы крышка-
поглотительная пластина, а I_T – это общее солнечное излучение, падающее на
наклонную поверхность (Вт/м²).

3.3. Почасовое солнечное излучение

Для множества мест на Земле доступны данные почасового солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность. Однако, данные солнечного излучения для наклонных поверхностей в основном отсутствуют. Первым шагом в расчете солнечной радиации на наклонной поверхности является разделение горизонтальной солнечной радиации на прямую и рассеянную составляющие. Это достигается с помощью корреляции Эрбса [105], которая связывает $\left(\frac{l_d}{r}\right)$ с индексом ясности k_T . Корреляция:

$$\begin{cases} 1 - 0.09 \cdot K_T & K_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.16 \cdot K_T + 4.388 \cdot (K_T)^2 - 16.638 \cdot (K_T)^3 + 2.336 \cdot (K_T)^4 & 0.22 < K_T \leq 0.8 \\ 0.165 & K_T > 0.8 \end{cases}$$

$$(3-31)$$

Где: *I_d* – рассеянное излучение, *I* – это солнечное излучение на горизонтальной поверхности, значение К_т берется из [106], [107] и где:

$$K_T = \frac{I}{I_{ex}} \tag{3-32}$$

Где: *I_{ex}* – это внеатмосферное излучение, падающее на горизонтальную поверхность в течение часа, *I_{ex}* в Джоулях на квадратный метр может быть рассчитан как [101]:

$$I_{ex} = \frac{12 \cdot 3600}{\pi} \cdot G_{sco} \cdot \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right)\right] \cdot \left[\cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + \frac{2\pi(\omega_2 - \omega_1)}{360} \cdot \sin\varphi \sin\delta\right]$$
(3-33)



Рисунок 3.4 – Изменение внеатмосферного излучения на протяжении года

[101].

Однако, из-за разницы в расстоянии между землей и солнцем поток излучения к земле разнится в пределах \pm 3,3%. На Рисунке 3.4 показана зависимость внеатмосферного излучения от времени года. Уравнение (4-34) очень точно (\pm 0,01%) [101].

 $G_{sco} = G_{sc}(1,00110 + 0,034221cosB + 0,001280sinB + 0,000719cos2B + 0,000077sin2B)$ (3-34)

Где *G_{sco}* – это внеатмосферное излучение, падающее на плоскость, перпендикулярную излучению, в n-ый день года, а *B* – равен:

$$B = (n-1)\frac{360}{365} \tag{3-35}$$

Где: G_{sc} это солнечная постоянная (1367 Вт/м²), δ – наклон (радиан), n – это номер дня в году, φ – это угол широты (56,84 °N), ω_2 – это часовой угол в последний час и ω_1 – это часовой угол в начальный час:

$$\omega_1 = 15(i - 12) \tag{3-36}$$

$$\omega_2 = \omega_1 + 15 \tag{3-37}$$

Где і – номер часа (*i* = 1..., 24). Аппроксимирующая формула для солнечного склонения представлена далее [108]:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360(284+n)}{365}\right) \tag{3-38}$$

Компонента рассеянного излучения (I_d) может быть получена из корреляции Эрбса, таким образом, компонента прямого излучения (I_B) может быть рассчитана как:

$$I_B = I - I_d \tag{3-39}$$

Затем рассчитывается почасовое излучение, падающее на наклонную поверхность, І_т следующим образом [109]:

$$I_T = R \cdot I \tag{3-40}$$

Где (R) – отношение почасового излучения на наклонной поверхности к данной величине для горизонтальной поверхности. Падающее излучение имеет три различной природы появления: прямые лучи, рассеянное излучение и отраженное излучение. Принимая рассеянное излучение изотропным, т.е. равномерно распределенным в пространстве, R можно выразить как [101]:

$$R = \left(1 - \frac{I_d}{I}\right) \cdot R_B + \frac{I_d}{I} \cdot \frac{(1 + \cos\beta)}{2} + \rho_g + \frac{(1 + \cos\beta)}{2}$$
(3-41)

Где: β – это угол наклона поверхности,

Геометрический фактор R_B – это отношение между прямым излучением на наклонной поверхности к этой величине для горизонтальной поверхности, может быть рассчитана как [105]:

$$R_B = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \tag{3-42}$$

$$\cos\theta_z = \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega + \sin\delta \cdot \sin\varphi \tag{3-43}$$

$$\cos\theta = \cos\delta \cdot \cos\left(\varphi - \beta\right) \cdot \cos\omega + \sin\delta \cdot \sin\left(\varphi - \beta\right) \tag{3-44}$$

Где: θ – это зенитный угол, а положение солнца относительно оси север-юг.

3.4. Солнечный дистиллятор

В процессах солнечной дистилляции воды принципы испарения и конденсации моделируются для описания тепломассопереноса в солнечном дистилляторе. Таким образом, чтобы изучить параметры, которые влияют на производительность и эффективность солнечной дистилляции, необходимо одновременное изучение различных переходных процессов. На Рисунке (3.5) показаны уравнения баланса энергии для модифицированного солнечного дистиллятора с вращающимся полым цилиндром (СДПЦСК), а именно: для облицовки емкости, воды в емкости, полого цилиндра, а также внутренней и внешней поверхностей крышки из оргстекла. В основном они включают в себя процессы теплопроводности, конвекции, излучения и испарения.

Для описания термических свойств солнечного дистиллятора были приняты следующие упрощения:

1. Угол наклона крышки из оргстекла оптимален.

2. В солнечном дистилляторе отсутствуют утечки пара и воды.

3. Влиянием пыли и грязи на крышку солнечного дистиллятора из оргстекла можно пренебречь.

4. Солнечный дистиллятор воды и соединительные трубки идеально теплоизолированные.

5. Существует энергетическое равновесие между поверхностью вращающегося полого цилиндра и водной пленкой на ней.

6. На каждой элементарной полоске толщина водяной пленки одинакова.

- 7. Для каждой элементарной полоски температура одинакова.
- 8. Сухой воздух и водяной пар ведет себя как идеальный газ.



Рисунок 3.5 – Тепло- и массообмен, протекающий на поверхности вращающегося полого цилиндра.

3.4.1. Облицовка емкости (bp)

Количество тепловой энергии, поглощаемой пластиной емкости, равняется количеству тепловой энергии, запасаемой в ней, количеству энергии, передаваемой воде в емкости, и теряемой в окружающую среду через боковую и нижнюю поверхности солнечного дистиллятора, показаны на Рисунке 3.6 [103].



Рисунок 3.6 – Энергобаланс пластины емкости, воды в емкости и крышки из оргстекла солнечного дистиллятора.

$$I(t) \cdot (A_{bp} - A_{sh}) \cdot \alpha_{bp} \cdot (1 - \alpha_g) \cdot (1 - \alpha_{bw}) = m_b \cdot Cp_{bp} \cdot \frac{dT_b}{dt} + Q_{C,bp-w} + Q_{Loss,bp-a}$$
(3-45)

Где: I(t) – это интенсивность солнечного излучения Вт/м², A_{bp} – это площадь поверхности емкости (м²), A_{sh} – это площадь тени полого цилиндра (м²), T_{bw} – это температура воды в емкости (°С), α_{bp} – это поглощательная способность

пластины емкости, α_g – это поглощательная способность крышки из оргстекла, α_{bw} – это поглощательная способность воды в емкости, m_{bp} – это масса пластины емкости (кг), Cp_{bp} – это удельная теплоемкости пластины емкости (Дж/кг · К), $Q_{C,bp-bw}$ – это конвекционная теплоотдача от облицовки емкости к воде в емкости (Вт), $Q_{Loss,bp-a}$ – это теплоотдача (теплопотеря) от облицовки емкости к окружающему воздуху (Вт) [103].

$$Q_{C,bp-bw} = h_{C,bp-bw} \cdot A_{bp} \cdot \left(T_{bp} - T_{bw}\right)$$
(3-46)

$$Q_{Loss,bp-a} = h_{b,bp-a} \cdot A_{bp} \cdot (T_{bp} - T_a)$$
(3-47)

Где: $h_{C,bp-w}$ – это коэффициент теплообмена конвекцией от облицовки емкости к воде в емкости (Вт/м² · К), T_{bp} – это температура облицовки емкости (°С), $h_{b,bp-a}$ – представляет общий коэффициент теплообмена от нижней поверхности облицовки емкости к окружающему воздуху (Вт/м² · К), а T_a – это температура окружающего воздуха (°С).

Коэффициент теплообмена конвекцией от облицовки емкости к воде в емкости рассчитывается как [103]:

$$h_{C,bp-bw} = \frac{\overline{Nu_L} \cdot K_{bw}}{L_{bp}}$$
(3-48)

Где:
$$\begin{cases} Nu_L = 0,54 Ra_L^{1/4} & (10^4 \le Ra_L \le 10^7) \\ Nu_L = 0,15 Ra_L^{1/3} & (10^7 \le Ra_L \le 10^{11}) \end{cases}$$
(3-49)

Где: K_{bw} – это теплопроводность воды (Вт/м · К), L_{bp} – это отношение площади поверхности к периметру пластины емкости (м), R_a – это число Рэлея, которое рассчитывается как:

$$R_a = \frac{g \cdot \beta_{bw} \cdot L_b^3 \cdot (T_{bp} - T_{bw})}{v_w \cdot \alpha'_{bw}}$$
(3-50)

Где: v_{bw} – это кинематическая вязкость (м²/с), α_{bw} – это температуропроводность $\left(\frac{m^2}{s}\right)$, а β_{bw} – это коэффициент термического расширения воды в емкости, [$\alpha'_w = \frac{k_{bw}}{\rho_{bw} \cdot cp_{bw}}$ и $\beta_{bw} = \frac{1}{T} \left(\frac{1}{K}\right)$].

Коэффициент теплоотдачи от нижней поверхности облицовки емкости к окружающему воздуху рассчитывается как [103]:

$$h_{b,bp-a} = \left[\frac{L_i}{K_i} + \frac{1}{h_{t,bp-a}}\right]^{-1}$$
(3-51)

Где L_i – это толщина теплоизоляции (0,18 см) и K_i представляет собой теплопроводность теплоизоляции (Вт/м · К), $h_{t,bp-a}$ – это общий коэффициент теплоотдачи (конвекцией и излучением) от облицовки емкости к окружающему воздуху (Вт/м² · К), который рассчитывается как [103]:

$$h_{t,bp-a} = 5,7 + 3,8 \cdot V_a \tag{3-52}$$

Где: *V_a* – это скорость окружающего воздуха (м/с).

3.4.2. Вращающийся полый цилиндр (h_c)

Переходный процесс теплопередачи между элементами поверхности полого цилиндра и влажным воздухом около внутренней и внешней поверхностей полого цилиндра рассчитывается следующим образом:

$$I(t) \cdot \alpha_{hc} \cdot (1 - \alpha_g) = \frac{d}{dt} [m_{hc} \cdot C_{P_{hc}} \cdot T_{hc} + m_{wf} \cdot C_{P_{wf}} \cdot T_{wf}] + Q_{cond-hc} + Q_{t,hco-gi} + Q_{t,hci-gi}$$
(3.53)

$$Q_{cond-hc} = k_{hc} \left(\frac{T_{hc} - T_{hc-hc,before}}{thx_{hc}} \right) + k_{hc} \left(\frac{T_{hc-hc,after} - T_{hc}}{thx_{hc}} \right)$$
(3.54)

$$Q_{t,hco-gi} = [h_{c,hco-gi} + h_{r,hco-gi} + h_{e,hco-gi}](T_{hco} - T_{gi})$$
(3-55)

$$Q_{t,hci-gi} = [h_{c,hci-gi} + h_{c,hci-gi}](T_{hci} - T_{gi})$$
(3-56)

Где: α_{hc} – это поглощающая способность пластины полого цилиндра, m_{hc} – это удельная масса элемента полого цилиндра (кг/м²) за указанный отрезок

времени dt (c), m_{wf} – это масса пленки воды на единицу площади вдоль элемента полого цилиндра (кг/м²), *С*_{*Phc*} – это удельная теплоемкость полого цилиндра (Дж/кг · К), $C_{P_{wf}}$ – это удельная теплоемкость пленки воды (Дж/кг · К), T_{hc} – это температура элемента полого цилиндра (°С), T_{wf} – это температура пленки воды (°С), $T_{wf} = T_{hc}$ (как было принято ранее), $Q_{cond-hc}$ – это теплопередача через пластину полого цилиндра (Вт), $Q_{t,hco-gi}$ – это общая теплоотдача от наружной поверхности полого цилиндра к внутренней поверхности крышки из оргстекла (Вт), $Q_{t,hci-gi}$ – это общая теплоотдача о внутренней поверхности полого цилиндра к внутренней поверхности крышки из оргстекла (Вт), k_{hc} – это теплопроводность полого цилиндра (Вт/м · К), thx_{hc} – это толщина элемента полого цилиндра (1 мм), *T_{hc,before}* и T_{hc,after} – это температуры двух продольных элементов полого цилиндра, непосредственно прилегающие к рассматриваемому элементу, как показано на Рисунке 3.7, $h_{C,hco-gi}$ – это коэффициент теплообмена конвекцией между наружной поверхностью элемента полого цилиндра и внутренней поверхностью крышки из оргстекла (Вт/м 2 · К), $h_{r,hco-gi}$ – это теплоотдача излучением между элементом наружной поверхности полого цилиндра и внутренней поверхностью крышки из оргстекла (Вт/м² · К), $h_{e,hco-gi}$ – это коэффициент теплоотдачи испарением от элемента наружной поверхности полого цилиндра к внутренней поверхности крышки из оргстекла (Вт/м 2 · К), T_{hco} – это температура элемента поверхности полого цилиндра (°С), T_{hci} – это температура элемента внутренней поверхности полого цилиндра (°С), T_{gi} – это температура внутренней поверхности оргстекла (°C).

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от элемента наружной поверхности полого цилиндра к внутренней поверхностью крышки из оргстекла рассчитывается следующим образом [103]:

$$h_{C,hco-ai} = 0,884 \cdot (\Delta T')^{1/3} \tag{3-57}$$

$$\Delta T' = (T_{hco} - T_{gi}) + \frac{(P_{hco} - P_{gi})(T_{hco} + 273, 15)}{(26,89 \cdot 10^4 - P_{hco})}$$
(3-58)

Где: *P_{hco}* – это давление пара при температуре элемента наружной поверхности полого цилиндра, *P_{gi}* – это давление пара при температуре внутренней поверхности оргстекла [103];

$$P_{hco} = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_{hco} + 273,15}\right) \tag{3-59}$$

$$P_{gi} = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_{pgi+273,15}}\right) \tag{3-60}$$

Коэффициент теплоотдачи испарением от элемента наружной поверхности полого цилиндра к внутренней поверхности крышки из оргстекла рассчитывается следующим образом [103]:

$$h_{e,hco-gi} = 16.273 \cdot 10^{-3} \cdot h_{c,hco-gi} \cdot \frac{(P_{hco} - P_{gi})}{(T_{hco} - T_{gi})}$$
(3-61)

Коэффициент теплоотдачи излучением от элемента наружной поверхности полого цилиндра к внутренней поверхности крышки из оргстекла рассчитывается следующим образом [110]:

$$h_{r,hco-gi} = \varepsilon_{eff} \sigma \left[(T_{hco} + 273,15)^2 - (T_{gi} + 273,15)^2 \right] \cdot \left[T_{hco} + T_g + 546 \right]$$
(3-62)

Где ε_{eff} – это эффективная излучательная способность от поверхности воды к крышке из оргстекла;

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{hco}} + \frac{1}{\varepsilon_{gi}} - 1\right)} \tag{3.63}$$

Где σ – это постоянная Стефана-Больцмана, принятая за 5,67 · 10⁻⁸ Вт/м²К⁴, ε_{hco} – это излучательная способность элемента наружной поверхности полого цилиндра и ε_{gi} – это коэффициент излучения крышка из оргстекла.



Рисунок 3.7 – Изменение продольных элементов вращающегося цилиндра за промежуток времени

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от элемента внутренней поверхности полого цилиндра и внутренней поверхности крышки из оргстекла равен [103]:

$$h_{C,hci-gi} = 0,884 \cdot (\Delta T')^{1/3} \tag{3-64}$$

$$\Delta T' = (T_{hci} - T_{gi}) + \frac{(P_{hci} - P_{gi})(T_{hci} + 273.15)}{(26.89 \cdot 10^4 - P_{hci})}$$
(3-65)

Где *P_{hci}* – это давление пара при температуре элемента внутренней поверхности полого цилиндра [103]:

$$P_{hci} = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_{hci} + 273.15}\right) \tag{3-66}$$

Коэффициент теплоотдачи испарением от элемента внутренней поверхности полого цилиндра к внутренней поверхности крышки из оргстекла равен [103]:

$$h_{e,hci-gi} = 16.276 \cdot 10^{-3} h_{c,hci-gi} \cdot \frac{(P_{hci}-P_{gi})}{(T_{hci}-T_{gi})}$$
(3-67)

3.4.3. Вода в емкости (bw)

Количество солнечной энергии, поглощенной пластиной емкости, количество энергии, переданной конвекцией от пластины емкости к воде в ней

 $Q_{c,bp-bw}$ (Вт), и полезное тепло, полученное от плоского солнечного коллектора, Q_u (Вт), равняются количеству запасенной тепловой энергии и общей переданной тепловой энергии конвекцией $Q_{c,bw-gi}$ (Вт), испарением $Q_{e,bw-gi}$ (Вт) и излучением $Q_{r,bw-gi}$ (Вт) к внутренней поверхности крышки из оргстекла:

$$I(t) \cdot \left(A_{bp} - A_{sh}\right) \cdot \alpha_{bw} \cdot \tau_g + Q_{C,bp-bw} + Q_u = m_{bw} \cdot c_{bw} \left(\frac{dt_{bw}}{dt}\right) + Q_{t,w-gi}$$
(3-68)

$$Q_{t,bw-gi} = Q_{c,bw-gi} + Q_{r,bw-gi} + Q_{e,bw-gi}$$

$$I(t) \cdot (A_{bp} - A_s) \cdot \alpha_{bw} \cdot (1 - \alpha_g) + h_{C,bp-bw} \cdot A_{bp} \cdot (T_{bp} - T_{bw}) + Q_u = m_{bw} \cdot Cp_{bw} \cdot \left(\frac{dt_w}{dt}\right) + \left[h_{c,bw-gi} + h_{e,bw-gi} + h_{r,bw-gi}\right] \cdot (A_{bp} - A_{su}) \cdot (T_{bw} - T_{gi})$$

$$(3-69)$$

$$(3-69)$$

$$(3-69)$$

$$(3-69)$$

$$(3-69)$$

Где m_{bw} – это масса воды в емкости, кг, Cp_{bw} – это удельная теплоемкость воды в емкости Дж/кг · °С, $h_{C,bw-Pgi}$ – это коэффициент теплоотдачи конвекцией от воды в емкости к внутренней поверхности оргстекла (Вт/м² · К), $h_{e,bw-gi}$ – это коэффициент теплоотдачи испарением от воды в емкости к внутренней поверхности крышки из оргстекла (Вт/м² · К), $h_{r,bw-gi}$ – это коэффициент теплоотдачи излучением от воды в емкости к внутренней поверхности крышки из оргстекла (Вт/м² · К), A_{su} – это площадь погруженной в воду емкости поверхности полого цилиндра (м²).

Коэффициент теплоотдачи конвекцией от воды в емкости к внутренней поверхности крышки из оргстекла выводится из уравнения Дюнкеля [103];

$$h_{c,bw-gi} = 0.884 \cdot (\Delta T')^{1/3} \tag{3-71}$$

$$\Delta T' = (T_{bw} - T_{gi}) + \frac{(P_{bw} - P_{gi})(T_{bw} + 273.15)}{(268900 - P_{bw})}$$
(3-72)

Где *P*_{bw} – это давление пара при температуре воды в емкости [103];

$$P_{bw} = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_{bw} + 273,15}\right) \tag{3-73}$$

Коэффициент теплоотдачи испарением от воды в емкости к внутренней поверхности крышки из оргстекла равен:

$$h_{e,bw-gi} = 16.273 \cdot 10^{-3} h_{c,bw-gi} \cdot \frac{(P_{bw} - P_{gi})}{(T_{bw} - T_{gi})}$$
(3-74)

Коэффициент теплоотдачи излучением от воды в емкости к внутренней поверхности крышки из оргстекла равен [110]:

$$h_{r,bw-g} = \varepsilon_{eff} \sigma \left[(T_{bw} + 273,15)^2 - (T_{gi} + 273,15)^2 \right] \cdot \left[T_{bw} + T_g + 546 \right] (3-75)$$

Где ε_{eff} – это эффективный коэффициент излучения от поверхности воды к

крышке из оргстекла:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{bw}} + \frac{1}{\varepsilon_{Pg}} - 1\right)} \tag{3-76}$$

Где ε_{bw} – это коэффициент излучения от поверхности воды.

3.4.4. Крышка из оргстекла (g)

Уравнение энергобаланса для крышки из оргстекла модифицированного солнечного дистиллятора с вращающимся полым цилиндром адаптировано следующим образом:

Внутренняя поверхность крышки из оргстекла (g_i):

Количество солнечной энергии, поглощаемой крышкой из оргстекла, количество тепловой энергии, передаваемой конвекцией, излучением и испарением от воды в емкости к внутренней поверхности крышки из оргстекла, количество тепловой энергии, передаваемой конвекцией, излучением и испарением от внешней поверхности полого цилиндра к внутренней поверхности крышки из оргстекла, и количество тепловой энергии, передаваемой конвекцией и испарением от внутренней поверхности полого цилиндра к внутренней поверхности крышки из оргстекла равняются количеству накопленной в крышке из оргстекла энергии и количества тепловой энергии, передаваемой за счет теплопроводности через крышку из оргстекла (от внутренней поверхности к внешней поверхности крышки из оргстекла), как показано далее:

$$I(t) \cdot \alpha_{g} \cdot A_{g} + \left[h_{C,bw-gi} + h_{r,bw-gi} + h_{e,bw-gi}\right] \cdot \left(A_{bp} - A_{su}\right) \cdot \left(T_{bw} - T_{gi}\right) + \left[h_{C,hco-gi} + h_{r,hco-gi} + h_{e,hco-gi}\right] \cdot A_{ea,hc} \cdot \left(T_{hco} - T_{gi}\right) + \left[h_{c,hci-gi} + h_{e,hci-gi}\right] \cdot A_{ea,hc} \cdot \left(T_{hci} - T_{gi}\right) = m_{g} \cdot C_{P_{g}} \cdot \frac{dT_{g}}{dt} + \frac{K_{g}}{th_{g}} \left(T_{gi} - T_{go}\right)$$
(3-77)

Где: A_g – это площадь крышки из оргстекла (M²), Cp_g – это удельная теплоемкость крышки из оргстекла (Дж/кг · °С), dT_g – это разница температур между внутренней и внешней поверхностями крышки из оргстекла (°С), $A_{ea,hc}$ – это площадь элемента поверхности полого цилиндра (M²), K_g – это теплопроводность крышки из оргстекла (Вт/м · K), th_g – это толщина крышки из оргстекла (0,003 м), T_{go} – это температура наружной поверхности крышки из оргстекла (°С).

Поверхность элемента полого цилиндра площадью A_{ea,hc} взаимодействует с крышкой из оргстекла, и каждый i-ый элемент из n элементов полого цилиндра имеет ширину dx и длину L = 0,9 м, таким образом:

$$A_{\text{ea,hc}} = L_{hc} \sum_{i=1}^{n} dx \tag{3-78}$$

В данной работе временной шаг равнялся 0,5 с, поскольку это значение обеспечивает приемлемое время расчета, а использование меньших временных шагов практически не влияет на результаты, но значительно увеличивает время расчета. Свойства влажного воздуха, такие как температуропроводность, теплопроводность, плотность, удельная теплоемкость, вязкость и давление насыщенного пара, принимались согласно [111].

При создании прототипа для моделирования модифицированного солнечного дистиллятора как вода в емкости солнечного дистиллятора, так и крышка из оргстекла рассматривались как единый элемент с равномерным распределением температуры, а полый цилиндр был разбит на продольные элементы, для которых было составлено определяющее уравнение баланса, на основе расположения этих элементов по ходу вращения полого цилиндра. Четыре характерных сегмента показаны на Рисунке (3.7), на которые в зависимости от конкретного места и определенного времени падает различное количество солнечного излучения, как показано на Рисунке (3.5). Для заданного периода времени dt (c) длина приращения расстояния dx (м) задана следующим образом [87]:

$$dx = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot dt}{60 \cdot N_{hc}} \tag{3-79}$$

Где r – это радиус полого цилиндра (м), N_{hc} – это число оборотов полого цилиндра в минуту (об/мин). Число элементов было получено путем деления окружности полого цилиндра на приращение расстояния dx, получаемого из уравнения (3-79). Число итераций для одного цикла полого цилиндра рассчитывалось путем деления времени, требуемого для совершения полного оборота, на приращение времени dt. В течение одного часа в рассматриваемый день отклонение температуры одного элемента от следующего было минимальным, но разница температур становилась более явной от часа к часу при всех возможных значениях параметров, температура первого элемента полого цилиндра, вышедшего из воды, принималась равной температуре воды в емкости.

▶ Наружная поверхность крышки из оргстекла (g₀):

Количество тепла, передаваемого теплопроводностью Q_{cond-g} от внутренней поверхности крышки из оргстекла к внешней, равняется количеству энергии, передаваемого от внешней поверхности крышки из оргстекла к окружающему воздуху конвекцией $Q_{c,go-a}$ и излучением $Q_{r,Pgo-a}$ следующим образом:

$$\frac{K_g}{th_g} \left(T_{gi} - T_{go} \right) = \left[h_{C,go-a} + h_{r,go-sky} \right] \cdot A_g \left(T_{go} - T_a \right)$$
(3-80)

Где: $h_{C,go-a}$ – это коэффициент теплоотдачи конвекцией от внешней поверхности крышки из оргстекла к окружающему воздуху (Вт/м² · К), который равен [101]:

$$h_{C,go-a} = 5,7 + 2,8V_a$$
 при $V_a > 5$ м/с (3-81)

$$h_{C,go-a} = 2,8 + 3V_a$$
 при $V_a \le 5$ м/с (3-82)

Где: $h_{r,go-sky}$ – это коэффициент теплоотдачи излучением от внешней поверхности крышки из оргстекла и окружающей средой при температуре T_{sky} . Коэффициент теплообмена излучением может быть рассчитан следующим образом:

$$h_{r,go-sky} = \varepsilon_{go} \cdot \sigma \left[\left(T_{sky} + 273.15 \right)^2 - \left(T_{go} + 273.15 \right)^2 \right] \cdot \left[T_{sky} + T_{go} + 546 \right]$$
(3-83)

Где ε_{go} – это коэффициент излучения оргстекла на его наружной поверхности.

▶ Толщина пленки воды (th_{wf})

Толщина водной пленки на внутренней и внешней поверхности вращающегося полого цилиндра рассчитывается со следующим упрощением: в пределах угла контакта, от точки входа цилиндра в воду до точки выхода из нее, поверхность цилиндра можно принять плоской. Следовательно, безразмерная постоянная толщина th_{wf0} может рассчитываться как функция ряда свойств жидкости, угла контакта θ_c и безразмерного капиллярного числа. Чтобы экстраполировать эту теорию от анализа плоских пластин на вращающийся полый цилиндр, вводится угол замера θ_j , а толщина водной пленки th_{wft} (м) рассчитывалась наверху вращающегося полого цилиндра, которую сначала можно рассматривать как функцию th_{wf0} , после чего толщину водной пленки th_{fw} (м) возможно рассчитать по ее позиции на окружности [112]:

$$th_{wft} = th_{wf} - \frac{\rho_w \cdot g \cdot th_{wf}^3 \cdot \sin \theta_j}{3 \cdot \mu_w \cdot V_{hc}} = th_{fw0} - \frac{\rho_w \cdot g \cdot th_{wf0}^3 \cdot \sin \theta_j}{3 \cdot \mu_w \cdot V_{hc}}$$
(3-84)

Где ρ_w – это плотность воды (кг/м³), μ_w – это динамическая вязкость воды (Па. с), а V_{hc} – это окружная скорость полого цилиндра, которая рассчитывалась по следующему уравнению (м/с) [87]:

$$V_{hc} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot N_{hc}}{60} \tag{3-85}$$

3.5. Почасовая совокупная производительность дистилляции Воды солнечных дистилляторов

3.5.1. Почасовая совокупная производительность дистилляции воды традиционного солнечного дистиллятора

Почасовая Совокупная производительность дистилляции воды m_{hwc} в кг/м² · ч традиционного солнечного дистиллятора равняется произведению коэффициента теплообмена испарением $h_{e,bw-gi}$, площади поверхности емкости $A_{bp} = 0,5 \text{ м}^2$, разницы температур между водой в емкости и внутренней поверхности крышки из оргстекла $T_{bw} - T_{gi}$ и 3600, разделенному на скрытую теплоту испарения воды перехода h_{fg} (Дж/кг) при средней температуре воды в емкости:

$$m_{hdwc} = \frac{h_{e,bw-gi} \cdot A_b \cdot (T_{bw} - T_{gi}) \cdot 3600}{h_{fg}}$$
(3-86)

$$\Gamma_{de:} h_{fg} = 10^3 [2501,9 - 2,40706 \cdot T_{bw} + 1,192217 \cdot 10^{-3} \cdot T_{bw}^2 - 1,5863 \cdot 10^{-5} \cdot T_{bw}^3]$$
(3-87)

3.5.2. Почасовая совокупная производительность дистилляции воды модифицированного солнечного дистиллятора

Почасовая совокупная производительность дистилляции воды, m_{hwm} модифицированного солнечного дистиллятора, (кг/м² · ч) рассчитывался путем произведения коэффициентов теплообмена испарением $h_{e,bw-gi}$, $h_{e,hco-gi}$ и $h_{e,hci-gi}$, разниц определенных температур и внутренней температуры крышки из оргстекла T_{gi} (°C) и 3600, разделенной на скрытую теплоту испарения воды h_{fg} при средней температуре воды в емкости [113]:

$$m_{hdwm} = \left[\frac{h_{e,bw-gi} \cdot 0.8 A_b \cdot (T_{bw} - T_{gi}) + h_{e,hco-gi} \cdot A_{ea,hc} \cdot (T_{hco} - T_{gi}) + h_{e,hci-gi} \cdot A_{ea,hc} \cdot (T_{hco} - T_{gi})(T_{hci} - T_{gi})}{h_{fg}}\right] \cdot 3600$$

$$(3-88)$$

3.6. Часовой термический КПД солнечного дистиллятора

3.6.1.Часовой термический КПД традиционного солнечного дистиллятора

Часовой термический КПД, η_{hc} , традиционного солнечного дистиллятора рассчитывался путем произведения суммарной часовой выработки дистиллированной воды m_{hwc} на скрытую теплоту испарения воды h_{fg} , разделенного на интенсивность солнечного излучения I(t) (Вт/м²), полную площадь (0,5 м²) и отрезок времени Δt (3600 с):

$$\eta_{hc} = \frac{m_{hwc} \cdot h_{fg}}{A_{bp} \cdot I(t) \cdot 3600} \, 100\% \tag{3-89}$$

3.6.2.Часовой термический КПД модифицированного солнечного дистиллятора

Часовой термический КПД, η_{hm} , модифицированного солнечного дистиллятора рассчитывался путем произведения суммарной часовой выработки дистиллированной воды m_{hwm} , скрытой теплоты испарения воды h_{fg} , разделенного на интенсивность солнечного излучения I(t) (Вт/м²) и отрезок времени Δt (3600 с) как для модифицированного солнечного дистиллятора, так и для плоского коллектора воды, а также на потребление энергии водяного насоса (8 Вт) и двигателя постоянного тока (1.2 Вт).

$$\eta_{hm} = \frac{\dot{m}_{hwm} \cdot h_{fg}}{I(t) \cdot A_{bp} \cdot 3600 + I(t)_{S.C} \cdot A_{S.C} \cdot 3600 + (P_{motor} + P_{pump}) \cdot 3600} \,100\%$$
(3-90)

Где $I(t)_{SC}$ – это интенсивность солнечного излучения (Вт/м²) для плоского солнечного коллектора, $A_{S.C}$ – это площадь поверхности (м²) плоского солнечного коллектора. В таблице (3.1) показаны параметры для теоретического исследования, которые использовались в математической модели.

3.7. Суточный КПД солнечного дистиллятора воды

3.7.1. Суточный КПД традиционного солнечного дистиллятора воды:

Суточный КПД, η_{dc} , традиционного солнечного дистиллятора равен сумме часовых КПД, разделенной на число часов эффективного опреснения воды:

 $\eta_{dc} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \eta_{hc}}{n}$ (3-91) Где: n – это число часов эффективного опреснения воды.

3.7.2. Суточный КПД модифицированного солнечного дистиллятора воды

Суточный КПД, η_{dm} , модифицированного солнечного дистиллятора равен сумме часовых КПД, разделенной на число часов эффективного опреснения воды:

$$\eta_{dm} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \eta_{hm}}{n} \tag{3-92}$$

Параметр	Значение	Параметр	Значение
A _{bp}	0,5 м ²	$\varepsilon_{\rm b} = \varepsilon_{\rm hc}$	0,31 [104]
Ag	0,825 м ²	ε _{bw}	0,963 [114]
m _{bw}	25 кг	ε _g	0,88 [104]
m _g	3,14 кг	$CP_b = CP_{hc}$	460 [114]
$\alpha_b = \alpha_{hc}$	0,95 [114]	CP _{bw}	4180 [104]
α_{bw}	0,05 [114]	CPg	1270 [104]
α _g	0,05 [104]	K _g	0,19-0,20 [104]
$ au_{bw}$	0,95 [115]	K _i	0,12 [104]
$ au_{g}$	0,92 [104]	L _i	0,018 [104]

Table 3.1 – Параметры для теоретического исследования

3.8. Начальные и граничные условия

Начальные условия требуются для начала расчета модели, как представлено далее:

3.8.1.Начальные условия плоского солнечного коллектора воды:

Для начала анализа численного моделирования плоского солнечного коллектора воды требуются начальные граничные условия различных параметров. Начальные условия представляют собой температуры: воды на входе в солнечный коллектор ($T_{w,sci}$), стеклянной крышки (T_g), окружающего воздуха (T_a); и скорость ветра (V_a). Известны количество дней (n), погодные условия, геометрия, угол наклона коллектора (β), и эксплуатационные параметры. Уравнения баланса энергии использовались для определения интенсивностей солнечного излучения I_h и I_T и полезной энергии (Q_u).

3.8.2. Начальные условия солнечного дистиллятора воды

Чтобы начать анализ численного моделирования традиционного и модифицированного солнечного дистиллятора воды требуются начальные граничные условия различных параметров. В них входят: температуры облицовки емкости (T_{bp}), воды в емкости (T_{bw}), полого цилиндра (T_{hc}), а также внутренней и внешней поверхностей крышки из оргстекла (T_{gi} и T_{go}). Исходные погодные параметры, такие как температура окружающего воздуха (T_a°) и скорость ветра (V_a°), конструкционные и эксплуатационные параметры, а также различные температурные параметры, такие как T_{go}° , T_{gi}° , T_{bp}° , T_{bw}° и T_{hc}° , были заданы в начале моделирования для нулевого момента времени. Затем уравнения баланса энергии использовались для определения значений температуры на следующем временном шагу:

1. Из начальных условий $T_{bp}^{\circ}, T_{bw}^{\circ}, T_{hc}^{\circ}, T_{gi}^{\circ}, T_{go}^{\circ}$ и уравнения (3-45) рассчитывался T_{bp}^{1} на следующем временном шагу.

2. Из T_{bp}^{1} , T_{bw}° , T_{hc}° , T_{gi}° , T_{go}° и уравнения (3-70) рассчитывался T_{bw}^{1} на следующем временном шагу.

3. Из T_{bp}^1 , T_{bw}^1 , T_{hc}° , T_{gi}° , T_{go}° и уравнения (3-53) рассчитывался T_{hc}^1 на следующем временном шагу.

4. Из T_{bp}^1 , T_{bw}^1 , T_{hc}^1 , T_{gi}° , T_{go}° и уравнения (3-77) рассчитывался T_{gi}^1 на следующем временном шагу.

5. Из T_{bp}^1 , T_{bw}^1 , T_{hc}^1 , T_{gi}^2 , T_{go}° и уравнения (3-80) рассчитывался T_{go}^1 на следующем временном шагу.

6. Уравнение баланса энергии полого цилиндра было выведено для каждого элемента поверхности полого цилиндра в зависимости от его положения, как показано на Рисунке (3.5). Также в граничных условиях теоретической модели принято, что температуры воды в емкости и первого элемента полого цилиндра, выходящего из поверхности воды в емкости, равны.

7. Было принято, что температура пленки воды на поверхности элемента полого цилиндра равна температуре самого элемента ($T_{wf} = T_{hc}$).

8. Данное моделирование было проведено итеративно с использованием метода конечных разностей на языке FORTRAN 90. Этот язык был использован для проведения теоретических расчетов производительности и эффективности солнечного дистиллятора. Используемый временной шаг равнялся 0,5 с, поскольку это значение обеспечивает приемлемое время расчета, а использование меньших временных шагов практически не влияет на результаты, но значительно увеличивает время расчета.




Рисунок 3.8 – Блок-схема устройства считывания данных

ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДО-ВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДИ-СТИЛЛЯЦИИ ВОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕР-ГИИ.

4.1. Результаты измерений параметров окружающей среды.

Данная работа направлена на экспериментальный анализ и верификацию влияния модифицирования солнечного дистиллятора воды различными технологиями на производительность дистилляции и тепловые характеристики. В данной главе проводились экспериментальные испытания при различных эксплуатационных параметрах. Результаты экспериментов описывают характеристики солнечного дистиллятора с модификациями и без них в условиях города Екатеринбург, Россия. Данные результаты были проверены и сопоставлены с другими исследованиями. Для определения оптимальных рабочих и эксплуатационных параметров представлены и проанализированы массивы результирующих данных.

На Рисунке 4.1(1) показано изменение общей интенсивности солнечного излучения в течение пяти месяцев в городе Екатеринбург в 2019 году, и были выбраны пять типичных дней: 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября 2019 года. На нем видно, что общая интенсивность солнечного излучения увеличивается с июня по июль, а затем постепенно уменьшается в остальные месяцы испытаний, в ходе которых проводились замеры, причем самые низкие значения зарегистрированы в октябре. Суточные пики для каждого месяца приходились на 13:00, за исключением октября, в котором пик регистрировался в 14:00. Из данного Рисунка видно, что самый высокий уровень интенсивности солнечного излучения в течение 24 часов за пять типичных дней был в июле, а самый низкий – в октябре.

На Рисунке 4.1(2) показано среднемесячное изменение температуры окружающей среды за пять месяцев для Екатеринбурга в 2019 году. Зависи-

мость аналогична зависимости солнечного излучения. Все кривые имеют одинаковую динамику изменения, максимальная температура зарегистрирована между 16:00 и 17:00, а минимальная – в 8:00.

На Рисунке 4.1(3) показано изменение среднечасовой скорости ветра за пять месяцев для Екатеринбурга в 2019 году. Очевидно, что тенденции в разные месяцы отличаются. Однако, ветер, как правило, усиливается с 12:00 до 16:00.



Рисунок 4.1 – Изменение часового, 1- солнечного излучения, 2- температуры окружающей среды, и 3- скорости ветра за пять месяцев на протяжении 2019.

4.2. Модифицированный солнечный дистиллятор с внешним солнечным коллектором (СДПЦСК)

Данная работа направлена на экспериментальный анализ и верификацию влияния применения в модифицированном солнечном дистилляторе воды вращающегося полого цилиндра и внешнего плоского солнечного коллектора воды (СДПЦСК) на производительность дистилляции и тепловые характеристики дистиллятора. В рамках следующих разделов были проведены экспериментальные испытания при различных эксплуатационных параметрах. Результаты экспериментов описывают характеристики солнечного дистиллятора с модификацией и без нее в условиях города Екатеринбург, Россия. Данные результаты были сопоставлены с результатами математической модели и данными других исследований.

Дистилляционная система была экспериментально испытана в течение пяти месяцев с июня по октябрь 2019 года в Екатеринбурге, Россия. Были проведены различные экспериментальные испытания, чтобы изучить влияние различных параметров на производительность солнечного дистиллятора. Экспериментальные испытания можно обобщить в следующие категории:

1. Производительность солнечного дистиллятора при различных глубинах воды в емкости.

2. Производительность солнечного дистиллятора без плоского солнечного коллектора (без вращающегося цилиндра и при различных частотах вращения полого цилиндра) и с солнечным коллектором (без цилиндра и при различных частотах вращения полого цилиндра).

3. Эффект предварительного нагрева воды плоским солнечным коллектором на производительность солнечного дистиллятора.

4. Физические и химические испытания дистиллированной воды.

4.2.1. Производительность солнечного дистиллятора при различных глубинах воды в емкости.

Глубина воды в емкости является важным конструкционным параметром, влияющим на производительность солнечной дистилляционной системы. На Рисунках 4.2 (1, 2 и 3) показаны экспериментальные данные результатов испытаний солнечного дистиллятора при разной глубине воды в емкости для трех экспериментальных конфигураций (традиционный солнечный дистиллятор, солнечный дистиллятор с вращающимся цилиндром и солнечный дистиллятор с вращающимся цилиндром и с внешним солнечным коллектором воды). Глубина воды в емкости обеспечивается при постоянной начальной температуре воды на входе. На Рисунке 4.2 (1) показано, что самая высокая продуктивность традиционного солнечного дистиллятора наблюдается при самой низкой глубине в 1 см. Следует отметить, что с увеличением глубины воды с 1 см до 7 см продуктивность дистилляции воды снижалась, что согласуется с результатами предыдущего исследования [116] (чем меньше глубина воды, тем выше продуктивность опреснения воды). Когда глубина воды увеличивается, общая теплоемкость ее объема также увеличивается, в результате чего температура воды в емкости снижается, что, в свою очередь, снижает интенсивность испарения воды. Таким образом, производительность понижена при большей глубине, а время испарения воды из емкости при глубине 1 см было меньше, чем при других глубинах. На Рисунке 4.2 (1) также показано, что глубине воды в бассейне 1 см соответствует наилучшая продуктивность в 2700 мл/м²·сут, а тенденция падения продуктивности наблюдается при наибольшей глубине воды в емкости 7 см, при которой она равняется всего лишь 2220 мл/м²·сут.

Во втором случае, как показано на Рисунке 4.2 (2) применение вращающегося полого цилиндра внутри солнечного дистиллятора привело к значительному улучшению производительности в сравнении с традиционным солнечным дистиллятором при различных глубинах воды в емкости. Это происходит из-за образования с обеих сторон вращающегося полого цилиндра (внутренней и внешней) тонкого слоя воды, который непрерывно обновляется с каждым циклом после испарения, в отличие от постоянного слоя воды в бассейне 3 см в традиционном солнечном дистилляторе, которому нужно время, чтобы испариться. Кроме того, было отмечено, что самая высокая продуктивность в течение дня при глубине воды 3 см равнялась примерно 4500 мл/м²·сут, что на 73% больше в сравнении с традиционным солнечным дистиллятором при той же глубине воды и эксплуатационных параметрах. Поскольку тень от полого цилиндра покрывает 76% площади водной поверхности бассейна (прямые солнечные лучи падают на 24% поверхности воды в емкости), основная часть тепла к воде в емкости передается за счет теплопроводности от металла цилиндра. Таким образом, воде в емкости требуется больше времени, чтобы нагреться и испариться. С увеличением глубины воды в емкости до 3 см увеличивается ее потенциальная тепловая энергия, высвобождающаяся для испарения во время заката, поэтому при 3 см продуктивность была относительно выше, чем при других глубинах, за счет получения тепла в солнечное время, и его высвобождении, во время заката.

Суточная производительность выше, если в солнечном дистилляторе с вращающимся цилиндром применен плоский солнечный коллектор воды для глубин воды свыше 2 см, как показано на Рисунке 4.2 (3). Солнечный коллектор воды эффективно нагревает воду перед подачей в солнечный дистиллятор. Увеличение количества горячей воды в емкости солнечного дистиллятора приводит к увеличению количества производимой дистиллированной воды, однако только при соответствующих глубинах. Таким образом, внешний солнечный коллектор может нагревать воду при требуемых расходах и времени, соответствующем его емкости и площади. Из Рисунка 4.2 (3) видно, что самая высокая производительность солнечного дистиллятора с вращающимся полым цилиндром и солнечным коллектором воды, зарегистрирована при глубине воды в бассейне 5 см и равнялась 9450 мл/м² сут, интенсификация производительности в сравнении с традиционным солнечным дистиллятором при той же глубине воды и эксплуатационных параметрах составил 285%. Данная

глубина типична для данной системы солнечной дистилляции, поскольку изза высокой потенциальной тепловой энергии (высокой общей теплоемкости) она продолжает дистилляцию в ночное время, после захода солнца, что соответствует обзору литературы [117]–[119].



Рисунок 4.2 – Влияние глубины воды на совокупную производительность дистилляции воды для 1- Традиционного солнечного дистиллятора, 2- Солнечного дистиллятора с вращающимся полым цилиндром,

3- Солнечного дистиллятора с вращающимся полым цилиндром и внешним солнечным коллектором воды, (5 -11 июня 2019, Екатеринбург, Россия).

4.2.2. Производительность модифицированного солнечного дистиллятора при различных скоростях вращения полого цилиндра.

В данном исследовании основным параметром, влияющим на производительность модифицированных солнечных дистилляторов, является скорость вращения полого цилиндра (СВПЦ). СВПЦ должна быть подходящей (не слишком медленной и не слишком быстрой) [87], потому что в случае, если СВПЦ слишком высокая, она негативно влияет на скорость испарения тонкой пленки воды с поверхностей цилиндра, а если СВПЦ слишком низкая, она приведет к преждевременному испарению пленки воды и полному осушению поверхностей полого цилиндра. На Рисунке 4.3 (1) показано влияние числа оборотов в минуту полого цилиндра на совокупную производительность дистилляции воды. На данном Рисунке видно увеличение совокупной производительности дистилляции воды вследствие уменьшения числа оборотов вращающегося полого цилиндра. Из этого Рисунка видно, что при скорости вращения 0,5 об/мин для испарения водяной пленки было достаточно времени, поэтому при 0,5 об/мин была зафиксирована самая высокая производительность, около 4700 мл/м² сут, что превышает производительность 12 июня 2019 года традиционного солнечного дистиллятора на 161%, в сравнении с производительность традиционного солнечного дистиллятора на 40% 15 июня 2019 года.



Рисунок 4.3 – Влияние числа оборотов полого цилиндра на совокупную производительность дистилляции воды, 1- Без внешнего солнечного коллектора воды (12-15 июня 2019), 2- С применением внешнего солнечного коллектора воды (19-22 июня 2019, Екатеринбург, Россия).

На Рисунке 4.3 (2) показано увеличение производительности при предварительном нагреве воды в емкости с помощью плоского солнечного коллектора воды, которое составило примерно 159-280% в сравнении с традиционным солнечным дистиллятором при различных скоростях вращения, от 0,5 до 6 об/мин. Из этого Рисунка видно, что при скорости вращения 0,5 об/мин производительность была больше, чем при других скоростях вращения. Предварительный нагрев воды при 0,5 об/мин вызывает интенсификацию процесса испарения слоя воды, прилегающего к внутренней и внешней поверхностям полого цилиндра (интенсификация процесса испарения). Таким образом, 0,5 об/мин была типичной скоростью вращения полого цилиндра внутри солнечного дистиллятора для обоих случаев (с и без применения внешнего солнечного коллектора воды в солнечном дистилляторе).

4.2.3. Производительность модифицированного солнечного дистиллятора с предварительным нагревом воды (СДПЦСК).

Из Рисунка 4.4 видно, что для солнечного дистиллятора с вращающимся цилиндром в сравнении с традиционным солнечным дистиллятором температура воды в емкости под полым цилиндром модифицированного солнечного дистиллятора была примерно на 0-5 °C ниже, чем в традиционном дистилляторе воды. Это связано с тем, что внутри традиционного солнечного дистиллятора прошедшие солнечные лучи непосредственно падают на воду, в то время как в модифицированном дистилляторе тень от полого цилиндра покрывает 76% площади водной поверхности емкости, и прямые солнечные лучи падают на 24% поверхности воды в емкости, а оставшемуся объему тепло передается за счет теплопроводности от металла цилиндра к воде в емкости. Кроме того, хотя температура воды в дистилляторе с цилиндром в основном ниже, чем у традиционного дистиллятора, температура стекла дистиллятора с цилиндром выше, чем у традиционного дистиллятора. Это происходит из-за большей интенсивности испарения в дистилляторе с цилиндром. В общем, установлено, что температура крышки из оргстекла модифицированного дистиллятора примерно на 0-2 ° C выше, чем у традиционного дистиллятора.



Рисунок 4.4 – Изменение почасовой температуры крышки из оргстекла и воды в емкости для дистиллятора с вращающимся цилиндром и традиционного дистиллятора в типичный день 12 июня 2019.

Таким образом, чтобы решить эту проблему, в модифицированный солнечный дистиллятор со скоростью вращения 0,5 об/мин был введен внешний солнечный коллектор. Из Рисунка 4.5 (1, 2, 3, 4 и 5) для пяти типичных дней пяти месяцев (июнь - октябрь 2019 г.) было замечено, что использование солнечного коллектора воды приводит к повышению температуры воды в емкости под полым цилиндром примерно на 0-10,5 °C по сравнению с традиционным солнечным дистиллятором. С другой стороны, температура крышки из оргстекла дистиллятора с цилиндром увеличилась примерно на 0,3-5,1 °C по сравнению с температурой в традиционном дистилляторе, что связано с более интенсивным испарением в дистилляторе с цилиндром. Таким образом, температура стекла модифицированного дистиллятора выше, чем у традиционного дистиллятора.

На данном Рисунке показано изменение интенсивности солнечного излучения, температуры окружающего воздуха и температуры в различных точках традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов в течение пяти типичных дней: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа, (4) 15 сентября и (5) 2 октября 2019 года в климатических условиях города Екатеринбург, Россия. Из Рисунка видно, что данные температуры зависят от погодных условий, таких как солнечное излучение и температура окружающего воздуха. Температуры облицовки емкости, воды в емкости и крышки из оргстекла модифицированного солнечного дистиллятора выше, чем в традиционном солнечном дистилляторе. Процесс предварительного нагрева воды плоским солнечным коллектором воды, в дополнение к эффекту вращающегося полого цилиндра, приводит к увеличению теплосодержания (энтальпии) внутри СДПЦСК. Кроме того, из данного Рисунка видно, что самые высокие температуры были зарегистрированы в июле, а самые низкие – в октябре 2019 года из-за отличающихся погодных параметров. В июле температуры облицовки емкости воды в емкости и крышки из оргстекла традиционного солнечного дистиллятора составляли 58,3 °C, 56,1 °C и 46,1 °C соответственно, причем аналогичные температуры солнечного дистиллятора с применением внешнего солнечного коллектора, составляли около 65,16 °C, 64,4 °C и 50,4 °C соответственно. В октябре температура облицовки емкости, воды в емкости и крышки из оргстекла традиционного солнечного дистиллятора составила 27,6 °C, 26,8 °C и 13,3 °C, в то время как аналогичные температуры солнечного дистиллятора с применением наружного солнечного коллектора, составили около 34,9 °C, 34,1 °C и 17,5 °С соответственно.





Рисунок 4.5 – Почасовое изменение интенсивности солнечного излучения, температуры окружающего воздуха и температуры в различных точках традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов за пять типичных дней: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа, (4) 15 сентября и (5) 2 октября 2019 года, в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.

На Рисунках 4.6 (1 и 2) представлена среднечасовая производительность дистилляции воды традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов для типичных дней 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября 2019 года. Максимальная часовая производительность традиционного солнечного дистиллятора составила около 340, 350, 300, 240 и 120 мл/м²·ч, а модифицированного солнечного дистиллятора — примерно 1320, 1420, 1160, 900 и 600 мл/м²·ч для 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября 2019 года соответственно, причем эти значения были зарегистрированы в 16:00, за исключением 2 октября, значение в котором зарегистрировано в 15:00. Также сделан вывод, что производительность дистилляции воды в ди-

120

стилляторе с цилиндром и с солнечным коллектором воды выше, чем у традиционного солнечного дистиллятора. Это означает, что модифицированный солнечный дистиллятор обладает большей дополнительной теплопроизводительностью, которая может использоваться для испарения соленой воды из емкости. Из-за непрерывного образования тонкого слоя соленой воды на поверхностях вращающегося цилиндра (внутренней и внешней поверхностях), для испарения которого при соответствующей скорости вращения (0,5 об/мин) есть достаточно времени, интенсивность испарения выше в сравнении с слоем воды в емкости с глубиной 5 см в традиционном солнечном дистилляторе, для испарения которого требуется большее время. Кроме того, когда полый цилиндр вращается, в воде в емкости и водяном паре возникают возмущения около поверхностей цилиндра и над водной поверхностью. Эта турбулентность побуждает циркуляцию и подъем пара к внутренней поверхности оргстекла, тем самым интенсифицируя процесс конденсации на поверхности крышки из оргстекла. Также следует отметить, что самая высокая производительность была зарегистрирована 17 июля 2019 года, поскольку интенсивность солнечного излучения и температура окружающего воздуха были выше, чем в типичные дни других месяцев.

На Рисунках 4.7 и 4.8 показана совокупная производительность дистилляторах ляции воды в традиционном и модифицированном солнечных дистилляторах в типичные дни 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября 2019 года. Накопленная производительность опреснения воды с помощью традиционного солнечного дистиллятора составляла около 2600, 2800, 2200, 1600 и 660 мл/м², а в модифицированном дистилляторе с цилиндром составила около 9900, 11100, 8600, 6400 и 3300 мл/м² на 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября соответственно. Благодаря вращающемуся полому цилиндру и предварительность обычного солнечного дистиллятора в емкости солнечным коллектором воды, производительность обычного солнечного дистиллятора была значительно повышена. Наиболее важными факторами являются: увеличенная площадь поверхности испарения [6], малая толщина слоя испаряющейся воды в сравнении с слоем воды в емкости традиционного дистиллятора, а также повышение температуры воды в емкости под вращающимся полым цилиндром.



Рисунок 4.6 – Изменение среднечасовой производительности, 1- традиционного солнечного дистиллятора (ТСД), 2- модифицированного солнечного дистиллятора (СДПЦСК) за пять месяцев 2019 года.



Рисунок 4.7 – Совокупная производительность дистилляции воды традиционного дистиллятора (ТСД) воды за пять месяцев 2019.



Рисунок 4.8 – Совокупная производительность дистилляции воды модифицированного дистиллятора (СДПЦСК) воды за пять месяцев 2019.

4.2.4. Производительность и Термический КПД модифицированного солнечного дистиллятора с предварительным нагревом воды (СДПЦСК).

Влияние солнечного излучения на работу солнечных дистилляторов было изучено в нескольких исследованиях. Результаты этих исследований показали, что солнечное излучение является самым важным фактором, влияющим на работу солнечных дистилляторов, особенно в летний сезон. В целом производительность солнечных дистилляторов растет с увеличением интенсивности солнечного излучения [7]. На Рисунке 4.9 представлено изменение интенсивности солнечного излучения, совокупная производительность дистилляции воды в обычном и модифицированном солнечных дистилляторах в типичные дни 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября 2019 года. Из Рисунка можно наблюдать увеличение совокупной производительности дистилляции воды модифицированного и традиционного солнечных дистилляторов с увеличением интенсивности солнечного излучения и температуры окружающего воздуха до достижения максимума в 16:00. Хотя интенсивность солнечного излучения снижается примерно после 18:00, продуктивность солнечной дистилляции СДПЦСК и ТСД сохраняется, поскольку вода в емкости глубиной 5 см имеет достаточно потенциальной тепловой энергии, которая высвобождается к закату, кроме того, из-за более низкой температуры окружающего воздуха температура оргстекла также снижается. Кроме того, из этого Рисунка видно, что производительность опреснения воды модифицированного солнечного дистиллятора с внешним солнечным коллектором воды, была выше, чем у традиционного солнечного дистиллятора во все типичные дни. Причина этого – непрерывное образование тонкого слоя соленой воды на поверхностях вращающегося цилиндра (внутренней и внешней поверхностях), для испарения которого при соответствующей скорости вращения (0,5 об/мин) есть достаточно времени, интенсивность испарения выше в сравнении с слоем воды в емкости с глубиной 5 см в традиционном солнечном дистилляторе, для испарения которого требуется большее время. Кроме того, когда полый цилиндр вращается, в воде в емкости и водяном паре возникают возмущения около поверхностей цилиндра и над водной поверхностью. Эта турбулентность побуждает циркуляцию и подъем пара к внутренней поверхности оргстекла, тем самым интенсифицируя процесс конденсации на поверхности крышки из оргстекла.

Совокупная производительность опреснения воды за пять типичных дней равнялась 2840 мл/м²·сут, 3100 мл/м²·сут, 2400 мл/м²·сут, 1700 мл/м²·сут и 700 мл/м²·сут в традиционном солнечном дистилляторе в сравнении с 11000 мл/м²·сут, 12500 мл/м²·сут, 9400 мл/м²·сут, 7000 мл/м²·сут и 3500 мл/м²·сут в модифицированном солнечном дистилляторе 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября 2019 года. Производительность увеличилась на 281%, 296%, 290%, 300% и 400 %, соответственно.

На Рисунках 4.10 (1 и 2) показана почасовая экспериментальная зависимость термического КПД для традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов для типичных дней 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября 2019 года.



Рисунок 4.9 – Изменение интенсивности солнечного излучения и совокупной производительности дистилляции воды традиционных и модифицированных солнечных дистилляторов за пять типичных дней: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа, (4) 15 сентября и (5) 2 октября 2019 года, в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.

Из данных Рисунков видно, что термический КПД традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов монотонно растет с наступлением светового дня из-за интенсификации конденсации на поверхности крышки из оргстекла в результате интенсификации испарения воды из емкости. Максимальный термический КПД был зафиксирован в октябре в связи с более низкой температурой поверхности крышки из оргстекла. Также было замечено, что термический КПД модифицированного и традиционного солнечных дистилляторов зависит от интенсивности солнечного излучения и количества производимой дистиллированной воды, как показано на Рисунке (4.11). Следовательно, с течением времени термический КПД увеличивается, достигая максимального значения в 16:00, благодаря продолжающейся с уменьшением интенсивности солнечного излучения и температуры окружающего воздуха производительности. Таким образом, теплопотеря от крышки из оргстекла к окружающему воздуху в ходе этого процесса интенсифицирует конденсацию на поверхности крышки из оргстекла. Среднечасовой КПД традиционного солнечного дистиллятора для типичных пяти дней 19 июня, 17 июля, 22 августа, 15 сентября и 2 октября 2019 года составил около 54%, 52%, 60,38%, 65,8% и 72%, соответственно, что ниже, чем термический КПД модифицированного солнечного дистиллятора, который составил около 74,9%, 72,58%, 80,5%, 81,37%, 99,67%, соответственно.



Рисунок 4.10 – Изменение термического КПД, 1- традиционного солнечного дистиллятора (ТСД), 2- модифицированного солнечного дистиллятора (СДПЦСК), воды за пять месяцев в течение 2019 года.



Рисунок 4.11 – Зависимость среднесуточного термического КПД от интенсивности солнечного излучения.

На Рисунке 4.12 показано изменение коэффициент повышения производительности модифицированного солнечного дистиллятора по сравнению с традиционным солнечным дистиллятором в течение пяти месяцев 2019 года. Из этого Рисунка видно, что средний коэффициент повышения производительности с июня по октябрь 2019 год колебался в пределах 280%-400%. Самые высокие значения были зарегистрированы в более прохладные месяцы (сентябрь и октябрь), около 300% и 400%, из-за снижения температуры окружающего воздуха, следовательно, увеличения скорости конденсации водяного пара.

Из Рисунка 4.13 видно, что совокупная производительность дистиллированной воды как традиционного, так и модифицированного солнечного дистиллятора воды растет с увеличением интенсивности солнечного излучения с июня по октябрь.



Рисунок 4.12 – Среднемесячная зависимость коэффициент повышения производительности дистиллированной воды.



Рисунок 4.13 – Изменение суточной производительности дистиллированной воды и интенсивности солнечного излучения в традиционном и модифицированном солнечных дистилляторах в течение пяти месяцев (с июня по октябрь 2019 г.).

На Рисунке 4.14 показано почасовое изменение термического КПД плоского солнечного коллектора воды. Термический КПД солнечного коллектора воды за все месяцы составил от 33 до 66%, а самый высокий термический КПД был зарегистрирован 17 июля 2019 года, поскольку солнечное излучение, падавшее на коллектор, и полезная энергия, полученная в этот день, были максимальными в сравнении с другими типичными днями. При этом самый низкий тепловой КПД был зарегистрирован в октябре, из-за низкого солнечного излучения, падавшего на коллектор, и полезная энергия, полученная в этот день, ниже в сравнении с другими типичными днями. Пик термического КПД солнечного коллектора за все месяцы приходился на 13:00, кроме октября, в котором пик пришелся на 12:00.





Рисунок 4.14 – Изменение полезной энергии на единицу площади солнечного коллектора воды, интенсивности солнечного излучения и термического КПД в течение пяти типичных дней: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа, (4) 15 сентября, и (5) 2 октября 2019 г., в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.

4.3. Результаты теоретической модели

Теоретическая модель была построена в соответствии со схемой на Рисунке 2.5. Было выполнено большое количество численных моделирований при различных температурах окружающего воздуха, скорости ветра и других начальных условиях (температура облицовки емкости, температура воды в емкости, температура крышки из оргстекла и температура полого цилиндра). В качестве начальных условий для запуска модели взяты данные экспериментальных работ.

Для представления теоретического изменения температуры, интенсивности солнечного излучения, производительности и эффективности солнечного дистиллятора использовалась программа Tecplot 9.0. В соответствии с климатическими условиями города Екатеринбург, Россия, теоретически были рассчитаны переменные за четыре месяца с июня по сентябрь 2019 года. Наиболее важной характеристикой использования программы Tecplot 9.0 является автоматическая работа с программой Fortran для анализа теоретических данных. Таким образом, она обеспечивает большую достоверность при построении и анализе теоретических данных. На Рисунках 4.15 (1, 2, 3 и 4) показана зависимость температуры облицовки емкости, воды в емкости, крышки из оргстекла, окружающего воздуха и интенсивности солнечного излучения от времени для традиционного солнечного дистиллятора для типичных дней июня, июля, августа и сентября 2019 года. Все типичные дни демонстрируются схожие тренды изменений, температура поднимается днем до максимального значения в 14:00, а затем снижается. Данные результаты аналогичны результатам многих исследований [52], [58], [59], [120]. Все температуры повышаются со временем до максимального значения в 14:00, что представляет собой одно- или двухчасовую задержку по времени до максимума интенсивности солнечного излучения в полдень. Это происходит из-за продолжительной термической инерции после максимума солнечной активности. Кроме того, из этого Рисунка видно, что самые высокие температуры были зарегистрированы в июле, а самые низкие – в сентябре 2019 года из-за отличающихся погодных условий.

На Рисунках 4.16 (1, 2, 3 и 4) показано изменение температуры в различных точках модифицированного солнечного дистиллятора. Из данного Рисунка видно, что максимальное значение температуры поверхности полого цилиндра находилось между 14:00 и 15:00 в июне, июле, августе и сентябре в связи с высокой интенсивностью солнечного излучения и эффектом предварительного нагрева воды в емкости плоским солнечным коллектором воды с раннего утра до полудня.

Кроме того, было отмечено, что модифицированный солнечный дистиллятор работал при более высокой температуре, чем традиционный солнечный дистиллятор из-за влияния вращающегося внутри него полого цилиндра и применения плоского солнечного коллектора воды, увеличивающего поступление тепловой энергии в модифицированный солнечный дистиллятор.



Рисунок 4.15 – Изменение интенсивности солнечного излучения и температуры в различных точках традиционного солнечного дистиллятора за четыре типичных дня: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа, (4) и 15 сентября 2019 г., в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.



132



Рисунок 4.16 – Изменение интенсивности солнечного излучения и температуры в различных точках модифицированного солнечного дистиллятора за четыре типичных дня: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа, (4) и 15 сентября 2019 г., в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.

На Рисунках 4.17 (1, 2, 3 и 4) показано изменение теоретической интенсивности солнечного излучения и совокупной производительности дистиллированной воды в июне, июле, августе и сентябре 2019 года соответственно, как для традиционного, так и для модифицированного солнечного дистиллятора. Из этого Рисунка видно, что совокупная производительность дистиллированной воды увеличивается со временем как для традиционного, так и для модифицированного солнечного дистиллятора. Также следует отметить, что максимальная совокупная производительность дистиллированной воды наблюдалась ближе к вечеру из-за высокой температуры воды в емкости (потенциальная тепловая энергия) и низкой температуры окружающего воздуха. Производительность модифицированного солнечного дистиллятора в течение четырех месяцев всегда была выше, чем у традиционного солнечного дистиллятора, из-за применения в дистилляторе с цилиндром плоского солнечного коллектора воды. Кроме того, вращающийся полый цилиндр представляет собой дополнительную поверхность для поглощения солнечного излучения, нагревающего воду в емкости (увеличение площади поверхности для испарения), таким образом, производительность дистилляции воды в модифицированном солнечном дистилляторе значительно увеличивается. Данные результаты согласуются с экспериментальными данными и результатами других исследований [80], [121]–[123].



Рисунок 4.17 – Изменение интенсивности солнечного излучения и совокупной производительности дистиллированной воды в традиционном и модифицированном солнечных дистилляторах за четыре типичных дня: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа и (4) 15 сентября 2019 г., в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.

На Рисунках 4.18 (1, 2, 3 и 4) представлены почасовые изменения термического КПД традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов в июне, июле, августе и сентябре 2019 года соответственно. Из этого Рисунка видно, что термический КПД увеличивается со временем, пока не достигнет пикового значения ближе к вечеру, поскольку интенсивность солнечного излучения, падающего на солнечный дистиллятор, была низкой при высокой производительности дистилляции воды, связанной с теплотой воды в бассейне (тепловая потенциальная энергия) и низкой температурой окружающего воздуха. Таким образом, потеря тепла от крышки из оргстекла в окружающий воздух была больше (повышенная интенсивность конденсации на внутренней поверхности крышки из оргстекла).



Рисунок 4.18 – Изменение термического КПД традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов в течение четырех типичных дней: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа и (4) 15 сентября 2019 г., в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.

Также можно наблюдать, что максимальный почасовой КПД традиционного солнечного дистиллятора составлял около 48%, 42,2%, 49,6% и 52,84%, что ниже, чем термический КПД модифицированного солнечного дистиллятора за четыре месяца, который составлял около 73,89%, 67%, 77,94 и 84,97% 19 июня, 17 июля, 22 августа и 15 сентября 2019 года соответственно. Это связано с тем, что эффективная площадь испарения модифицированного солнечного дистиллятора больше, чем у традиционного солнечного дистиллятора, а также разница температур между стеклом и водой в емкости выше в модифицированном солнечном дистилляторе.



Рисунок 4.19 – Изменение интенсивности солнечного излучения на горизонтальной и наклонной поверхностях, полезной энергии, получаемой в солнечном коллекторе, и термического КПД для четырех типичных дней: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа и (4) 15 сентября 2019 г., в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.

На Рисунках 4.19 (1, 2, 3 и 4) показано изменение полезной энергии, получаемой от солнечного коллектора воды, интенсивности солнечного излучения на горизонтальной поверхности, наклонной поверхности под углом 35° (плоский солнечный коллектор воды), в типичные дни (19 июня, 17 июля и 22 сентября). Из этого Рисунка следует отметить, что термический КПД плоского солнечного коллектора воды для всех месяцев составляет от 33 до 66%, а оптимальный термический КПД был зарегистрирован 17.07.2019 из-за более высоких интенсивности солнечного излучения и полученной полезной энергии в сравнении с другими тремя типичными днями. Кроме того, максимальный термический КПД был зарегистрирован в 13:00 часов, а самый низкий – в 16:00, поскольку интенсивность солнечного излучения достигала своего пикового значения с 13:00 до 14:00, а затем после 14:00 снижалась, приводя к тому, что значение тепловой энергии, получаемой плоским солнечным коллектором воды, также уменьшалась.

4.4. Сравнение экспериментальных и теоретических результатов

Работоспособность теоретической модели была подтверждена путем сравнения ее результатов с соответствующими экспериментальными данными, полученными в рамках данного исследования. Для теоретического моделирования использовались экспериментально определенные конструкционные, эксплуатационные и метрологические параметры. На Рисунках 4.20, 4.21 и 4.22 показано сравнение теоретических и экспериментальных температуры в различных точках, производительностей дистилляции воды и термического КПД для традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов при 0,5 об/мин. Результаты теоретической модели хорошо совпадали с данными экспериментальных исследований. Относительное расхождение между экспериментальными результатами и теоретической моделью составляет 3,9% для температур и 8,39% для производительности. Таким образом, среднее общее отклонение составляет 6,14% и соответствует погрешности измерений экспериментальных данных. Эти расхождения между экспериментальными и теоретическими результатами могут быть связаны с тем, что погодные условия в теоретической модели считались постоянными в каждый час. Кроме того, в экспериментальных испытаниях в первые часы светового дня во время испытаний, особенно в традиционном солнечном дистилляторе, для повышения температуры воды в емкости до требуемого уровня требуется от двух до трех часов, то есть к 10:00 или 11:00, в то время как в математической модели процесс идеален, и в зависимости от погодных условий для повышения температуры воды в бассейне требуется около 1 часа, то есть к 9:00 утра.

На Рисунках 4.20 и 4.21 (1,2,3 и 4) показано сравнение теоретической модели и экспериментальных результатов почасовых изменений температуры традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов.

Из этих Рисунков можно заметить, что результаты теоретической модели близко сходятся с экспериментальными данными. Они показывает ту же тенденцию со средним отклонением 3,9%, которое связано с измерением экспериментальных данных. Результаты теоретической модели не учитывали накопление тепла в воде емкости в ходе экспериментальных испытаний. Температура воды в емкости выше, чем температура оргстекла из-за падающего солнечного излучения, поглощаемого черной пластиной емкости и водой в ней в солнечный день. Таким образом, аккумулированная тепловая энергия будет передаваться воде в емкости за счет конвекции от нагретой облицовки емкости.





Рисунок 4.20 – Сравнение теоретической модели и экспериментальных результатов почасовых изменений температуры традиционного солнечного дистиллятора для четырех типичных дней: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа, и (4) 15 сентября 2019 г. в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.

На Рисунках (4.22 и 4.23) показано изменение совокупной производительности дистиллированной воды для теоретической модели и экспериментальных результатов модифицированного солнечного дистиллятора за четыре типичных дня (19 июня, 17 июля, 22 августа и 15 сентября 2019 г.). Из этих цифр можно наблюдать увеличение производительности дистиллированной воды в модифицированном и традиционном солнечных дистилляторах со временем (с увеличением интенсивности солнечного излучения и температуры окружающего воздуха) до тех пор, пока оно не достигает максимального значения во второй половине дня. Кроме того, результат теоретической модели показывает ту же тенденцию и характер зависимости, как и у экспериментальных результатов, но с более высокими значениями, это из-за менее адекватного учета потерь, в отличии от фактической производительности дистиллированной воды, взятой из экспериментальных результатов. Эти Рисунки показывают, что результаты теоретической модели близко сходятся с данными экспериментальной работы. Они показывают аналогичную тенденцию со средним отклонением 8,39%, которое связано с измерением экспериментальных данных.



Рисунок 4.21 – Сравнение теоретической модели и экспериментальных результатов почасовых изменений температуры модифицированного солнечного дистиллятора для четырех типичных дней: (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 августа, и (4) 15 сентября 2019 г. в климатических условиях Екатеринбурга, Россия.

17.07.2019, 22.08.2019 и 15.09.2019.

На Рисунках 4.24 и 4.25 (1, 2, 3 и 4) иллюстрированы почасовые изменения теоретического и экспериментального термического КПД для традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов для типичных дней (1) 19 июня, (2) 17 июля, (3) 22 Августа и (4) 15 сентября 2019 года. Из этих цифр видно, что термический КПД постоянно растет, что связано с теплотой воды в емкости и снижением температуры окружающего воздуха. Также следует от-

метить, что экспериментальные значения КПД немного меньше, чем в теоретической модели для всех тестовых дней и обоих типов солнечных дистилляторов (СДПЦСК и ТСД), и это указывает на хорошее согласование между экспериментальными и теоретическими результатами.



Рисунок 4.22 – Изменение количества совокупной производительности дистиллированной воды в традиционном солнечном дистилляторе по теоретической модели и экспериментальным результатам для типичных дней 19.06.2019, 17.07.2019, 22.08.2019 и 15.09.2019.



Рисунок 4.23 – Изменение совокупной производительности дистиллированной воды в модифицированном солнечном дистилляторе по теоретической модели и экспериментальным результатам для типичных дней 19.06.2019.

Отклонение между экспериментальными результатами и теоретической моделью может быть связано с утечкой водяного пара из конструкции солнечного дистиллятора воды и потерями тепла в окружающий воздух при экспериментальном исследовании, в то время как теоретическая модель предполагала, что утечек и тепловых потерь нет.



Рисунок 4.24 – Сравнение теоретической модели и экспериментальных результатов термического КПД традиционного солнечного дистиллятора воды в типичные дни 19.06.2019, 17.07.2019, 22.08.2019 и 15.09.2019.



Рисунок 4.25 – Сравнение теоретической модели и экспериментальных результатов термического КПД модифицированного солнечного дистиллятора воды в типичные дни 19.06.2019, 17.07.2019, 22.08.2019 и 15.09.2019.

4.5. Солнечный дистиллятор с фотоэлектрическим диффузионно-абсорбционным холодильником (СДДАХ).

Все экспериментальные испытания проводились в течение 10 дней, 27 и 28 июля 2019 г. выбранных в качестве типичных дней. Интенсивность солнечного излучения и температура окружающего воздуха являются важными климатическими параметрами, влияющими на работу солнечных дистилляторов. В типичный день 27.07.2019 действие солнечного излучения началось после 8:00 утра, а максимальная интенсивность солнечного излучения, зарегистрированная в 13:00, составляла примерно, 805 Вт/м², затем постепенно уменьшалась до заката солнца в 20:00 до 23 Вт/м², как показано на Рисунке (4.26). После 20:00 интенсивность излучения была практически нулевой до следующего

143

утра 28.07.2019, когда достигла значения 237 Вт/м² к 08:00. После того, как солнечные лучи падают на поверхность Земли, температура окружающего воздуха со временем повышается. Из данного Рисунка видно, что максимальная температура окружающего воздуха была зафиксирована в 16:00 и была равна 28,4 °C, после чего постепенно снижалась с уменьшением интенсивности солнечного излучения до 24,2 °C в 20:00, продолжала снижаться ночью, а на следующее утро была равна 20,1 °C в 08:00.



Рисунок 4.26 – Почасовое изменение интенсивности солнечного излучения и температуры окружающего воздуха.

Для оценки продуктивности двух моделей солнечных дистилляторов (ТСД и СДДАХ) температура регистрировалась в разных точках двух моделей солнечных дистилляторов в течение 24 часов. На Рисунке 4.27 показано почасовое изменение температур в различных точках традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов. Из данного Рисунка можно заметить, что ранним утром в 8:00 температуры в разных точках солнечного дистиллятора были близки к 25 °С, такая температура для воды в емкости слишком низкая, и для ее повышения требуется время. Следовательно, чтобы интенсифицировать испарение воды из ёмкости, необходимо было повысить ее температуру за счет утилизации тепла от конденсатора абсорбционного холодильника. Таким образом, после 09:00 температура воды в емкости ТСД была равна 33,1
°C, а в СДДАХ 39 °C, иными словами, температуры воды в емкости увеличилась на 18%, что крайне важно для интенсификации процесса испарения. В модели СДДАХ температура воды в емкости была выше, чем у облицовки емкости до 11:00, и составляли 47,8 °C и 47,6 °C соответственно из-за эффекта раннего нагрева воды в емкости.



Рисунок 4.27 – Почасовое изменение температуры в различных точках традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов, (1) в дневное время (2) в ночное время.

Максимальная температура воды в емкости была зафиксирована в 14:00 и была равна около 57,1 °C в модифицированном солнечном дистилляторе и 53,8 °C в 15:00 в традиционном солнечном дистилляторе. Таким образом, температура воды в емкости в модели СДДАХ была выше, чем у модели ТСД, на 0,5-8,3 °C в дневное время и на 4,9-20,1 °C в ночное время за счет эффекта раннего нагрева воды в емкости конденсатором холодильника. Кроме того, температура крышки из оргстекла была ниже, чем температура воды в емкости для обеих моделей, из-за того, что общая теплоемкость оргстекла ниже, чем у воды в емкости. Поэтому крышка из оргстекла нагревается в ранние утренние часы, после чего ее температура становится меньше температуры воды в емкости. Самая высокая температура крышки из оргстекла была достигнута в 15:00 и равнялась 48,7 °C в модифицированном солнечном дистилляторе и 46,1 °C в традиционном солнечном дистилляторе в 15:00. Из этого Рисунка также было замечено, что температура крышки из оргстекла в модели СДДАХ

была выше, чем у модели ТСД, на 0,5-5,2 °С в дневное время и на 4,8-14,9 °С в ночное время из-за высокой интенсивности испарения в модели СДДАХ в результате постоянного нагрева воды в емкости.

На Рисунках 4.28 (1 и 2) показана производительность дистилляции воды в модели СДДАХ (за счет испарителя, крышки из оргстекла и общая производительность) за 24 часа (с 8:00 27 июля 2019 до 8:00 следующего дня). Из этих цифр можно отметить, что на испарителе конденсируется большая часть водяного пара, около 76% от общего количества конденсата (из-за низкой температуры испарителя). Таким образом, производительность дистилляции воды в СДДАХ в течение дня с 8:00 до 20:00 27 июня 2019 (за счет испарителя, и за счет крышки из оргстекла) составила 5940 мл/м² и 1800 мл/м², соответственно, тогда как в ночное время (с 20:00 до 8:00 следующего дня) она составила 1960 мл/м² и 660 мл/м² соответственно.



Рисунок 4.28 – Почасовая совокупная производительность дистилляции воды модифицированного солнечного дистиллятора, (1) в дневное время (2) в ночное время.

На Рисунках 4.29 (1 и 2) показана совокупная производительность дистилляции воды в модифицированном солнечном дистилляторе (СДДАХ) и традиционном солнечном дистилляторе (ТСД) в течение 24 часов. Из этого Рисунка видно, что совокупная производительность дистилляции воды в модифицированном солнечном дистилляторе (СДДАХ) всегда была выше, чем у традиционного солнечного дистиллятора (ТСД). Совокупная производительность дистилляции воды из СДДАХ и ТСД в дневное время (с 8:00 до 20:00) составила около 7740 мл/м² и 2200 мл/м² соответственно, таким образом, улучшив ее примерно на 251%, в то время как в течение ночного времени (с 20:00 до 8:00) она составила 2620 мл/м² и 460 мл/м² соответственно, улучшив ее на 469%.



Рисунок 4.29 – Совокупная производительность дистилляции воды традиционного и модифицированного солнечного дистилляторов, (1) в дневное время (2) в ночное время.

4.6. Солнечный дистиллятор с применением ультразвуковых увлажнителей (СДУУ)

Наиболее важными параметрами окружающей среды, влияющими на производительность и эффективность солнечного дистиллятора, являются солнечное излучение, температура окружающего воздуха и скорость ветра. На Рисунке 4.30 показаны значения температуры окружающего воздуха и скорости ветра с 8:00 до 20:00 для типичного дня 24 июля 2020 года. Интенсивность солнечного излучения постепенно увеличивается после 8:00. и продолжает увеличиваться, достигая максимального значения между 12:00 и 13:00 в диапазоне от 1110 до 1160 Вт/м². После 13:00 она постепенно уменьшается до захода солнца в 20:00. Утром после восхода солнца солнечные лучи передают тепловую энергию поверхности земли и окружающему воздуху, при этом самая высокая температура окружающего воздуха была зафиксирована в 17:00 и была равна 24,9 °C. Скорость ветра в день испытаний была умеренной, ее значения составляли от 0,4 до 2 м/с. Это оказало положительное влияние на температуру крышки из оргстекла, поскольку ее температура растёт с падением скорости ветра в летний сезон, но дало отрицательный эффект с точки зрения теплопередачи от пластины солнечного дистиллятора к окружающему воздуху в соответствии с Уравнением (3-51) в главе 3.

На Рисунке 4.31 показано изменение температуры воды в емкости (T_{bw}) , температуры крышки из оргстекла (T_g), и температуры хлопчатобумажной ткани (Т_{ткань}) двух типов солнечных дистилляторов (традиционного солнечного дистиллятора (ТСД) и предлагаемого солнечного дистиллятора (СДУУ)). Из этого Рисунка видно, что температура воды в емкости, крышки из оргстекла и ткани зависела от погодных условий, таких как интенсивность солнечного излучения и температура окружающей среды. Кроме того, было замечено, что разница температур между поверхностью хлопчатобумажной ткани и крышки из оргстекла в предлагаемом солнечном дистилляторе намного выше, чем между водой в емкости и крышкой из оргстекла в традиционном солнечном дистилляторе, что связано с характером использования хлопчатобумажной ткани в модели СДУУ. Расстояние между водной поверхностью в емкости и поверхностью крышки из оргстекла было уменьшено, что привело к интенсификации тепломассообмена внутри солнечного дистиллятора. Непрерывное смачивание хлопчатобумажной ткани ультразвуковыми увлажнителями из-за капиллярных свойств ткани интенсифицирует процесс испарения воды (более интенсивное испарение при меньшей толщине слоя воды) в сравнении с глубоким слоем воды в емкости при традиционной солнечной дистилляции (ТСД) с большой общей теплоемкостью. В модели ТСД температура крышки из оргстекла (T_g) была выше температуры воды в емкости до 10:00, поскольку теплоемкость крышки из оргстекла меньше, чем у воды. После этого температура воды в емкости до конца дня превышала температуру крышки из оргстекла.

При рассмотрении предлагаемого солнечного дистиллятора было замечено, что температура хлопчатобумажной ткани начинает повышаться с раннего утра в 08:00 из-за смачивания покрытия из хлопчатобумажной ткани ультразвуковыми увлажнителями. Из Рисунка 4.31 можно заметить, что температура хлопчатобумажной ткани в 8:00 была 31,9 °C, в то время как температура воды в емкости (T_{bw}) в традиционном солнечном дистилляторе составляла 19,6 °C. Максимальная температура хлопчатобумажной ткани была зафиксирована в 14:00 и была равна 70,5 °C, в то время как температура воды в емкости традиционном дистилляторе составляла 54 °C. После 14:00 температура ткани ($T_{ткань}$) в СДУУ и воды в емкости в ТСД снижалась из-за уменьшения интенсивности солнечного излучения. Около 20:00 температура ткани СДУУ была ниже, чем температура воды в емкости в ТСД, и составила 33,8 °C и 39,3 °C соответственно.

На Рисунке 4.32 показано, что самая высокая часовая производительность опреснения воды в течение 12 часов наблюдалась в СДУУ. Было замечено, что в предлагаемом солнечном дистилляторе опреснение начиналось рано в 09:00 и производительность равнялась 50 мл/м²·ч, тогда как в традиционном солнечном дистилляторе опреснение начиналось в 11:00 и производительность равнялась 40 мл/м²·ч. Это связано с тем, что воде в емкости в традиционном солнечном дистилляторе глубиной 5 см требуется время для увеличения температуры из-за ее высокой теплоемкости, в сравнении со слоем водяной пленки в предлагаемом солнечном дистилляторе, который быстро испаряется и обновляется на хлопчатобумажной ткани за счет воздействия ультразвуковых увлажнителей воздуха. Максимальная производительность дистилляции воды в СДУУ была зарегистрирована в 14:00 и равнялась 610 $mn/m^2 \cdot y$, в то время как в ТСД в 16:00 она была равна 343,6 $mn/m^2 \cdot y$, но в конце дня в 20:00 часовая производительность СДУУ была ниже, чем у ТСД (150 мл/м²·ч и 141,8 мл/м²·ч соответственно) из-за того, что благодаря потенциальной тепловой энергии слоя воды глубиной 5 см в емкости ТСД она продолжала испаряться. При этом, с уменьшением интенсивности солнечного излучения в

конце дня интенсивность испарения водной пленки с поверхности хлопчатобумажной ткани уменьшалась, несмотря на постоянное ее смачивание ультразвуковым увлажнителем.



Рисунок 4.30 – Изменение интенсивности солнечного излучения, температуры окружающего воздуха и скорости ветра для типичного дня 24 июля 2020



Рисунок 4.31 – Изменение температуры ткани, воды в емкости и крышки из оргстекла для типичного дня 24 июля 2020 г.



Рисунок 4.32 – Изменение часовой производительности дистилляции воды СДУУ и ТСД для типичного дня 24 июля 2020.

На Рисунке 4.33 показана совокупная производительность дистилляции воды за 12 часов двух солнечных дистилляторов (ТСД и СДУУ). Исходя из этого Рисунка, совокупная производительность дистилляции воды составила 4200 мл/м² для СДУУ и 2500 мл/м² для ТСД. Это свидетельствует об эффективности использования технологии, предлагаемой в текущей работе, для повышения продуктивности опреснения воды.

Почасовой термический КПД предлагаемого солнечного дистиллятора, η_{hs} , был оценен путем перемножения совокупного количества дистиллированной воды m_w на среднюю теплоту фазового перехода h_{fg} при средней температуре воды в емкости, T_w (°C), и деления на произведение суммы среднесуточной интенсивности солнечного излучения I(t) (Вт/м²) на площади A (м²) и потребляемой ультразвуковыми увлажнителями мощности P_{hu} (42 Вт) на период Δt (3600 с) для модифицированного солнечного дистиллятора.



Рисунок 4.33 – Совокупная производительность дистилляции воды СДУУ и ТСД для типичного дня 24 июля 2020.

На Рисунке 4.34 показан часовой термический КПД для обеих моделей, СДУУ и ТСД, за 6 часов с 11:00 до 16:00, являющиеся часами активной работы. Из этого Рисунка видно, что в 11:00 эффективность СДУУ выше, чем у ТСД, примерно в десять раз, затем преимущество снижается до 14:00 до значения в 2,67 раз, так как воде в емкости традиционного солнечного дистиллятора в это время поступает достаточно энергии для испарения. В 16:00 термический КПД СДУУ больше в 2,1 раза по сравнению с ТСД, а это означает, что производительность дистилляции воды на единицу солнечной энергии, полученной солнечным дистиллятором модели СДУУ, была больше, модели ТСД счет эффекта непрерывного чем y за смачивания хлопчатобумажной несмотря пониженную ткани, на интенсивность солнечного излучения. Из этого Рисунка видно, что термический КПД СДУУ в течение 6 часов испытаний был выше, чем у ТСД из-за влияния технологии ультразвукового увлажнения, которая постоянно держит хлопчатобумажную ткань влажной даже в ходе процесса испарения и которая уменьшает характеристическое расстояние между поверхностью испарения и поверхностью крышки из оргстекла.



Рисунок 4.34 – Почасовой термический КПД СДУУ и ТСД для типичного дня 24 июля 2020.

4.7. Пленочный солнечный дистиллятор с алюминиевой конденсационной пластиной (ПСДАКП)

На Рисунке (4.35) показано почасовое изменение интенсивности солнечного излучения, температуры окружающего воздуха и скорости ветра с 8:00 до 20:00 для типичного дня 29 июля 2020 года. После 8:00 утра наблюдалось постепенное увеличение интенсивности солнечного излучения, которая в 13:00 достигла максимального значения 989,9 Вт/м², затем она постепенно уменьшалась до конца дня в 20:00. После восхода солнца солнечный свет передает тепловую энергию к поверхности земли и в окружающий воздух, в результате чего он со временем нагревается, а самая высокая температура окружающего воздуха была зарегистрирована в 15:00 и была равна 30,5 °C. В течение дня испытаний скорость ветра была умеренной и варьировалась от 2,1 до 4,1 м/с.



Рисунок 4.35 – Изменение интенсивности солнечного излучения, температуры окружающего воздуха и скорости ветра для типичного дня 29 июля 2020.

На Рисунке 4.36 показано почасовое изменение температуры абсорбирующей пластины (T_{A-p}) ; температуры воды на входе и выходе $(T_{wi} and T_{wo})$, температуры стеклянной крышки (T_g), температуры алюминиевой пластины (T_{Al-p}) и температуры окружающего воздуха (T_a) для предлагаемого солнечного дистиллятора. На данном Рисунке можно видеть, что температуры абсорбирующей пластины, воды на входе и выходе, стеклянной крышки были низкими в ранние часы (с 8:00 до 10:00) из-за того, что этого времени недостаточно для нагрева абсорбирующей пластины солнечным излучением (из-за ее толщины), кроме того, циркулирующей воде также требуется время, чтобы нагреться при протекании по абсорбирующей пластине. Кроме того, стеклянной крышке требуется еще больше времени для повышения температуры, так как общая теплоемкость стекла выше теплоемкости воды и абсорбирующей пластины. Таким образом, температуры в разных точках солнечного дистиллятора продолжали расти вместе с увеличением интенсивности солнечного излучения, поэтому самые высокие температуры были зарегистрированы в 13:00 и были равны 58,1 °C для абсорбирующей пластины, 54,8 °C для воды на входе в солнечный дистиллятор, 57,37 °C для воды на выходе из солнечного дистиллятора и 50,24 °C для стеклянного крышки. Кроме того, из этого Рисунка видно, что на температуру алюминиевой пластины напрямую влияют температура окружающего воздуха и скорость ветра. Самая высокая температура алюминиевой пластины была зарегистрирована в 15:00 и была равна 33,5 °C, когда температура окружающего воздуха достигла максимального значения в 30,5 °C.



Рисунок 4.36 – Изменение температуры в абсорбирующей пластине; воды на входе и выходе, стеклянной крышки, алюминиевой пластины и окружающего воздуха за типичный день 29 июля 2020.

На Рисунке (4.37) показана почасовая производительность алюминиевой пластины и стеклянной крышки для типичного дня, 29 июля 2020 года. Из этого Рисунка видно, что на алюминиевой пластине сконденсировалось большее количество водяного пара, около 59%, остаток конденсируется на стеклянной крышке. Это связано с тем, что температура алюминиевой пластины была ниже, чем у стеклянной крышки. Максимальная производительность алюминиевой пластины и стеклянной крышки были зарегистрированы в полдень и равнялись 140 и 100 мл/м², соответственно, когда интенсивность солнечного излучения была на максимальной и была равна 989,9 Вт/м² (интенсивность испарения выше), температура окружающего воздуха была равна 29,3 °C, скорость ветра – 4,1 м/с.



Рисунок 4.37 – Изменение интенсивности солнечного излучения и производительности дистилляции алюминиевой пластины и стеклянной крышки для типичного дня 29 июля 2020.

На Рисунке 4.38 показана совокупная производительность дистилляции воды алюминиевой пластины, стеклянной крышки и общая производительность за 12 часов с 8:00 до 20:00 для типичного дня 29 июля 2020 года. Производительность алюминиевой пластины была выше по сравнению со стеклянной крышкой и составила 805 мл/м², стеклянной крышки – 555 мл/м². Это означает, что алюминиевая пластина оказывает значительное влияние на повышение производительности за счет естественного потока влажного воздуха (свободная конвекция) через алюминиевую пластину.



Рисунок 4.38 – Совокупная производительность опреснения воды на алюминиевой пластине и стеклянной крышке за типичный день 29 июля 2020.

На Рисунке 4.39 показан термический КПД предлагаемого солнечного дистиллятора в течение 8 часов (с 9:00 до 16:00), соответствующим часам активной работы. Почасовой КПД предлагаемого солнечного дистиллятора был рассчитан путем умножения часовой совокупной производительности дистилляции воды на среднюю теплоту фазового перехода, затем результат был разделен на произведение суммы часового солнечного излучения, поглощенное площадью А (0,5 м²) и потребляемой мощности водяного насоса (6 Вт) на период (3600 с). Из данного Рисунка видно, что термический КПД системы в целом была низкой (максимальное значение было около 9,3% в 14:00) из-за более низкой производительности относительно солнечной энергии, поглощенной абсорбером.



Рисунок 4.39 – Почасовой термический КПД солнечного дистиллятора для типичного дня 29 июля 2020.

4.8. Пленочный солнечный дистиллятор с тканевой испарительной поверхностью и термоэлектрическим алюминиевым каналом. (ПСДТАК).

На Рисунке (4.40) показано почасовое изменение интенсивности солнечного излучения, температуры окружающего воздуха и скорости ветра с 8:00 до 20:00 для типичного дня 16 июня 2021 года. После 8:00 утра наблюдалось постепенное увеличение интенсивности солнечного излучения, которая в 13:00 достигла максимального значения 1145 Вт/м², затем она постепенно уменьшалась до конца дня в 20:00. После восхода солнца солнечный свет передает тепловую энергию к поверхности земли и в окружающий воздух, в результате чего он со временем нагревается, а самая высокая температура окружающего воздуха была зарегистрирована в 15:00 и была равна 33,46 °C. В течение дня испытаний скорость ветра была умеренной и варьировалась от 1,1 до 3,2 м/с.



Рисунок 4.40 – Изменение интенсивности солнечного излучения, температуры окружающего воздуха и скорости ветра для типичного дня 16 июня 2021.

На Рисунке 4.41 показано почасовое изменение температуры абсорбирующей пластины (T_{A-p}); температуры воды на входе и выходе (T_{wi} and T_{wo}), температуры стеклянной крышки (T_g), температуры алюминиевой пластины (T_{Al-p}) и температуры окружающего воздуха (T_a) для предлагаемого солнечного дистиллятора. На данном Рисунке можно видеть, что температуры абсорбирующей пластины, воды на входе и выходе, стеклянной крышки были низкими в ранние часы (с 8:00 до 10:00. Таким образом, температуры в разных точках солнечного дистиллятора продолжали расти вместе с увеличением интенсивности солнечного излучения, поэтому самые высокие температуры

были зарегистрированы в 13:00 и были равны 59,9 °C для абсорбирующей пластины, 57,7 °C для воды на входе в солнечный дистиллятор, 59,68 °C для воды на выходе из солнечного дистиллятора и 54,98 °C для стеклянного крышки. Кроме того, из этого рисунка видно, что температура алюминиевой пластины была относительно низкой из-за охлаждающего эффекта термоэлектрических элементов. Самая высокая температура алюминиевой пластины была зафиксирована в 13:00 и составляла 40,1 °C при температуре окружающей среды около 32,16 °C.



Рисунок 4.41 – Изменение температуры в абсорбирующей пластине; воды на входе и выходе, стеклянной крышки, алюминиевой пластины и окружающего воздуха в типичный день 16 июня 2021.

На Рисунке (4.42) показана почасовая производительность алюминиевой пластины и стеклянной крышки для типичного дня, 16 июня 2021 года. Из этого Рисунка видно, что на алюминиевой пластине сконденсировалось большее количество водяного пара, около 68%, остаток конденсируется на стеклянной крышке. Это связано с тем, что температура алюминиевой пластины была ниже, чем у стеклянной крышки. Максимальная производительность алюминиевой пластины и стеклянной крышки были зарегистрированы в полдень и равнялись 235 и 120 мл/м², соответственно, когда интенсивность солнечного излучения была на максимальной и была равна 1145 Вт/м². В общем,

скорость испарения воды была высокой из-за непрерывного смачивания поверхности абсорбирующей пластины (хлопковая ткань предотвращала высыхание поверхности абсорбирующей пластины).



Рисунок 4.42 – Изменение интенсивности солнечного излучения и производительности дистилляции алюминиевой пластины и стеклянной крышки для типичного дня 16 июня 2021.

На Рисунке 4.43 показана совокупная производительность дистилляции воды алюминиевой пластины, стеклянной крышки и общая производительность за 12 часов с 8:00 до 20:00 для типичного дня 16 июня 2021 года. Производительность алюминиевой пластины была выше по сравнению со стеклянной крышкой и составила 1290 мл/м², стеклянной крышки – 615 мл/м². Это означает, что алюминиевая пластина оказывает значительное влияние на повышение производительности за счет естественного потока влажного воздуха (свободная конвекция) через алюминиевую пластину.

На Рис. 4.44 показан термический КПД предлагаемого солнечного дистиллятора в течение 8 часов (с 9:00 до 16:00), соответствующим часам активной работы. Из данного рисунка видно, что термический КПД в целом была низкой (максимальное значение было около 12,9% в 14:00) из-за более низкой производительности относительно солнечной энергии, поглощенной абсорбирующей пластиной, что, однако, выше, чем плененный солнечный дистиллятор без улучшений (хлопковой ткани и термоэлектрического охлаждения), рассмотренный в разделе 4.7.



Рисунок 4.43 – Совокупная производительность опреснения воды на алюминиевой пластине и стеклянной крышке за типичный день 16 июня 2021.



Рисунок 4.44 – Почасовой термический КПД солнечного дистиллятора для типичного дня 16 июня 2021.

4.9. Сравнение результатов данной диссертационной работы с предыдущими исследованиями

Данное диссертационное исследование включает в себя разработку о солнечной дистилляционной установки с использованием различных методов, конструкций и эксплуатационных параметров, как показано на Рисунке 4.45. Первая базовая модификация представляла собой солнечный дистиллятор с цилиндром и внешним солнечным коллектором воды (СДПЦСК), для которой в качестве типичного дня было выбрано 17 июля 2019 г., вторая модификация включала в себя фотоэлектрический диффузионно-абсорбционный холодильник (СДДАХ), для которой в качестве типичного дня было выбрано 27 июля 2019 г., третья модификация представляла собой солнечный дистиллятор с ультразвуковыми увлажнителями (СДУУ), для которой в качестве типичного дня было выбрано 24 июля 2020 г., четвертая модификация представляла собой солнечный дистиллятор с применением алюминиевой конденсирующей пластины (ОСДАКП), для которого в качестве типичного дня было выбрано 29 июля 2020 г, а пятая модификация представляла собой солнечный дистиллятор с тканевой испарительной поверхностью и термоэлектрическим алюминиевым каналом (ОСДТАК), для которого в качестве типичного дня было выбрано 16 июня 2021 г. Данные экспериментальные исследования проводились в различных эксплуатационных и погодных условиях. Для проверки эффективности каждой модификации в каждом экспериментальном исследовании использовался традиционный солнечный дистиллятор (базовый солнечный дистиллятор) при одинаковых эксплуатационных условиях и идентичных размерах солнечного дистиллятора и модифицированного солнечного дистиллятора. Из данного Рисунка видно, что самая высокая производительность была зафиксирована у дистиллятора с полым цилиндром и внешним солнечном коллектором воды (СДПЦСК), суточная производительность которого составляла около 12,5 л/м²·сут, при производительности традиционного солнечного дистиллятора примерно 3,1 л/м²·сут, а значит производительность была улучшена на 300% при тех же эксплуатационных условиях. В рамках второй модификации производительность достигла 10,36 л/м²·сут в модифицированном солнечном дистилляторе при 2,66 л/м²·сут в традиционном солнечном дистилляторе с улучшением на 289% при тех же эксплуатационных условиях. В третьей модификации она достигла 4,2 л/м²·сут в модифицированном солнечном дистилляторе при 2,5 л/м²·сут в традиционном солнечном дистилляторе с улучшением на 68% при тех же эксплуатационных условиях. Производительность предлагаемого солнечного дистиллятора (четвертая модификация) составила 1,36 л/м²·сут. При этом производительность предложенного солнечного дистиллятора (пятая модификация) составила 1,905 л/м²·сут. Таким образом, первая модификация (солнечный дистиллятор с цилиндром и внешним солнечным коллектором воды) является наилучшей в результате совместного влияния вращающегося полого цилиндра и внешнего солнечного коллектора воды за счет образования водяной пленки на поверхностях вращающегося полого цилиндра, которая непрерывно обновлялась с каждым оборотом, и предварительного нагрева воды в емкости внешним солнечным коллектором, который в значительной степени способствовал увеличению ее температуры и интенсивности испарения.

На Рисунке 4.46 показано изменение суточной совокупной производительности дистилляции воды для различных типов солнечных дистилляторов. Этот Рисунок показывает, что модифицированный солнечный дистиллятор с солнечным коллектором воды (СДПЦСК) в рамках данной работы дает большую производительность в сравнении с результатами Аюб [20] и других. Это связано с эффективным влиянием солнечного коллектора воды в предлагаемой конструкции для предварительного нагрева воды, подаваемой в воду емкости в модифицированном солнечном дистилляторе. Погодные условия в Екатеринбурге (относительно высокая интенсивность солнечного излучения и низкая температура окружающего воздуха) также эффективно способствовали повышению производительности дистилляции воды в сравнении с Аюбом [20]. В сравнении предлагаемой конструкции с Купером [21], Ахмедом [22] и Шехатой [23] она дает лучший результат за счет увеличенной площади поверхности испарения и повышения температуры воды в емкости.



Рисунок 4.45 – Суточная совокупная производительность дистилляции воды для различных модифицированных и базовых солнечных дистилляторов, (2019-2021), Екатеринбург, Россия.



Рисунок 4.46 – Изменение суточной совокупной производительности дистилляции воды в различных модифицированных и базовых солнечных дистилляторах.

ГЛАВА 5. ЭКОНОМИКА МОДИФИЦИРОВАННЫХ СОЛНЕЧ-НЫХ ДИСТИЛЛЯТОВ И КАЧЕСТВО ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ.

5.1. Оценка стоимости производства дистиллированной воды.

Основная причина применения солнечной дистилляции – не только увеличение объема производства пресной воды за их счет, но и снижение стоимости опреснения. Ряд исследований включают в себя подробный экономический анализ основных факторов, влияющих на стоимость опреснения одного литра воды [124], таких как капитальные затраты (CS) на изготовление и установку, фактор возврата капитала (CRF), фактор фонда возмещения (SFF), первые годовые затраты (FAC), годовая остаточная стоимость (ASV), годовая стоимость обслуживания (AMC), годовая стоимость (AC), и среднегодовая стоимость производства одного литра дистиллированной воды (ACP). Фактор возврата капитала (CRF), фактор фонда возмещения (SFF) и первые годовые затраты (FAC) можно рассчитать следующим образом:

$$CRF = \frac{i \cdot (1+i)^n}{[(1+i)^n - 1]}$$
(5-1)

$$SFF = \frac{i}{[(1+i)^n - 1]}$$
(5-2)

$$FAC = CS \cdot CRF \tag{5-3}$$

Где n- это предполагаемый срок службы солнечного дистиллятора, лет, i- это годовая доходность, %.

Остаточная стоимость солнечного опреснения воды (S) составляла 0.2 от капитальных затрат на изготовление и установку (CS) [125], таким образом, годовая остаточная стоимость (ASV) рассчитывается как:

$$ASV = S \cdot SFF \tag{5-4}$$

Годовая стоимость обслуживания (AMC) составляла 15% от первых годовых затрат. Таким образом, годовая стоимость (AC) рассчитывалась как [126]:

$$AC = FAC + AMC - ASV \tag{5-5}$$

Таким образом, годовая стоимость производства одного литра дистиллированной воды (ACP) равняется:

$$ACP = \frac{AC}{m_y} \tag{5-6}$$

Где m_y – это среднегодовая производительность солнечной дистилляционной системы (л/м² · г),

$$m_y = \sum_{j=1}^{j=180} m_d \tag{5-7}$$

5.1.1. Модифицированный солнечный дистиллятор с внешним солнечным коллектором (СДПЦСК)

В Таблице 5.1 указаны цены на все компоненты как для традиционного, так и для модифицированного солнечного дистиллятора на местном рынке России. Из этой таблицы следует отметить, что общая стоимость традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов составила 82 и 315 \$ соответственно.

В Таблице 5.6 показан анализ стоимости производства одного литра в традиционном и модифицированном солнечных дистилляторах с использованием подробного экономического анализа основных факторов, влияющих на стоимость производства одного литра дистиллированной воды, которые подробно рассмотрены в главе 3. Суточная производительность на 17 июля 2019 года (лучшего типичного дня) для ТСД на единицу площади 1 м² составила 3,1 л/м², а для СДПЦСК – 12,5 л/м², при условии эксплуатации обеих моделей солнечного дистиллятора на протяжении 180 дней в году (среднее количество солнечных дней в году в Екатеринбурге, Россия). Результаты анализа показали, что ориентировочная стоимость производства одного литра дистиллированной воды в традиционном и модифицированном солнечных дистилляторах составила 0,0282 \$ и 0,0268 \$ соответственно, то есть предлагаемая модификация снизила стоимость производства одного литра дистиллированной воды.

Материал	Количе-	ТСД (\$)	СДПЦСК (\$)
Деревянный лист МДФ толщиной 1,8 см	2 м ²	14	14
Крышка из оргстекла толщиной 0,3 см	1.2 м ²	15	15
Оцинкованный лист железа толщиной 0,1 см	1.2 м ²	11	11
Оцинкованный лист железа толщиной 0,1 см	1 м ²	-	9
Фотоэлектрическая панель (110 Вт) + оборудова-	1 шт.	-	125
Аккумулятор	1 шт.	-	25
Двигатель постоянного тока 12 В + регулятор	1 шт.	-	14
Плоский солнечный коллектор воды	1 шт.	-	50
Водяной насос постоянного тока	1 шт.	-	10
Механический поплавок	1 шт.	1	1
Термостойкая краска	2 шт.	3	3
Термостойкий силиконовый клей	2 шт.	3	3
Система питательной воды	-	15	15
Дополнительные рабочие принадлежности	-	20	20
Общая стоимость		82	315

Таблица 5.1 – Капитальные затраты на производство и установку солнечных дистилляторов, \$

5.1.2. Солнечный дистиллятор с фотоэлектрическим диффузионно-абсорбционным холодильником (СДДАХ)

В Таблицу 5.2 включены цены на все компоненты как традиционного, так и модифицированного солнечных дистилляторов на местном рынке России. Из этой таблицы следует отметить, что общая стоимость традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов составила 82 \$ и 302 \$ соответственно.

В Таблице 5.6 показан анализ стоимости производства одного литра воды в традиционном и модифицированном солнечных дистилляторах с использованием подробного экономического анализа основных факторов, влияющих на стоимость производства одного литра дистиллированной воды, подробно рассмотренных в главе 3. Суточная производительность на 27 июля 2019 в ТСД на единицу площади 1 м² составила 2,66 л/м², а В СДДАХ – 10,36 л/м², при условии, что обе модели солнечного дистиллятора работают около 180 дней в году (среднее количество солнечных дней в году в Екатеринбурге, Россия). Результаты анализа показали, что ориентировочная стоимость производства одного литра дистиллированной воды в традиционном и модифицированном солнечных дистилляторах составила 0,033 \$ и 0,031 \$ соответственно.

Таблица 5.2 – Капитальные зат	оаты (CS) на	производство	и установку
солнечных дистилляторов, \$			

Материал	Количество	ТСД (\$)	СДДАХ (\$)
Деревяный лист МДФ толщиной 1.8 см	2 м ²	14	14
Крышка из оргстекла толщиной 0,3 см	1.2 м ²	15	15
Лист оцинкованного железа толщиной 0,1 см	1.2 м ²	11	11
Фотоэлектрическая панель (110 Вт) + обору-	1 шт.	-	120
дование			
Инвертор	1 шт.	-	30
Аккумулятор	1 шт.	-	25
Диффузионно-абсорбционная охладительная	1 шт.	-	45
установка			
Механический поплавок	1 шт.	1	1
Термостойкая краска	2 шт.	3	3
Термостойкий силиконовый клей	2 шт.	3	3
Система питательной воды	-	15	15
Дополнительные рабочие принадлежности	-	20	20
Общая стоимость		82	302

5.1.3.Солнечный дистиллятор с применением ультразвуковых увлажнителей (СДУУ)

В Таблицу 5.3 включены цены на все компоненты как традиционного, так и предлагаемого солнечных дистилляторов на местном рынке России. Из этой таблицы следует отметить, что общая стоимость традиционного и модифицированного солнечных дистилляторов составила 82 \$ и 130 \$ соответственно.

В Таблице 5.6 показан анализ стоимости производства одного литра воды в традиционном и модифицированном солнечных дистилляторах. Результаты анализа показали, что стоимость производства одного литра дистиллированной воды в традиционном и предлагаемом солнечных дистилляторах составила 0,0349 \$ и 0,0259 \$ соответственно. Следовательно, предлагаемое улучшение снизило стоимость производства литра дистиллированной воды по сравнению с ТСД.

Материал	Количество	ТСД (\$)	СДУУ (\$)
Ультразвуковой увлажнитель	3	-	15
Хлопчатобумажная ткань	1 м	-	4
Рама из поликарбоната	0.5 м ²	-	4
Деревянный лист МДФ толщиной 1,8 см	2 м ²	14	14
Крышка из оргстекла толщиной 0,3 см	1.2 м ²	15	15
Оцинкованное железо толщиной 0,1 см	1.2 м ²	11	11
Фотоэлектрическая панель (30 Вт)	1 шт.	-	25
Механический поплавок	1 шт.	1	1
Термостойкая краска	2 шт.	3	3
Термостойкий силиконовый клей	2 шт.	3	3
Система питательной воды	-	15	15
Дополнительные рабочие принадлежности	-	20	20
Общая стоимость		82	130

Таблица 5.3 – Капитальные затраты (CS) на производство и установку солнечного дистиллятора, \$

5.1.4. Пленочный солнечный дистиллятор с алюминиевой конденсационной пластиной (ПСДАКП)

В Таблице 5.4 включена подробная информация о капитальных затратах на предлагаемый солнечный дистиллятор в условиях местного российского рынка, из этой таблицы видно, что общая стоимость предлагаемого солнечного дистиллятора составила 83 \$. В Таблице 5.6 влючен анализ годовой стоимости производства одного литра дистиллированной воды. Аналитические расчеты затрат показали, что годовая стоимость производства одного литра дистиллированной воды в предлагаемом солнечном дистилляторе составляет 0,065 \$ США.

Таблица 5.3 – Капитальные затраты на производство и установку солнечного дистиллятора, \$

Материал	Количество	ПСДАКП (\$)
Деревянный лист МДФ толщиной 1,8 см	2 м ²	14
Стеклянная крышка толщиной 0,4 см	0.5 м ²	1.5
Лис оцинкованного железа толщиной 0,1 см	0.5 м ²	4.5
Алюминиевая пластина	0.2 м ²	5
Фотоэлектрическая панель и оборудование	1 шт.	50
Микро-водяной насос	1 шт.	2
Термостойкая краска	2 шт.	3
Термостойкий силиконовый клей	2 шт.	3
Общая стоимость	-	83

5.1.5. Пленочный солнечный дистиллятор с тканевой испарительной поверхностью и термоэлектрическим алюминиевым каналом. (ПСДТАК)

В Таблице 5.5 включена подробная информация о капитальных затратах на предлагаемый солнечный дистиллятор в условиях местного российского рынка, из этой таблицы видно, что общая стоимость предлагаемого солнечного дистиллятора составила 103,5 \$. В Таблице 5.6 влючен анализ годовой стоимости производства одного литра дистиллированной воды. Аналитические расчеты затрат показали, что годовая стоимость производства одного литра дистиллированной воды в предлагаемом солнечном дистилляторе составляет 0,057 \$ США.

Таблица 5.4 – Капитальные затраты на производство и установку солнечного дистиллятора, \$

Материал	Количество	ПСДТАК (\$)
Деревянный лист МДФ толщиной 1,8 см	2 м ²	14
Стеклянная крышка толщиной 0,4 см	0.5 м ²	1.5
Лис оцинкованного железа толщиной 0,1 см	0.5 м ²	4.5
Алюминиевая пластина	0.2 м ²	5
Фотоэлектрическая панель и оборудование	1 шт.	50
Элемент Пельтье с вентилятором	4 шт	22
фитиль из хлопковой сетки	0.5 м ²	1
Микро-водяной насос	1 шт.	2
Термостойкая краска	2 шт.	3
Термостойкий силиконовый клей	2 шт.	3
Общая стоимость	-	103,5

В Таблице 5.6 показан анализ стоимости производства литра воды в пяти типах [А, Б, В, Г и Д] модифицированных солнечных дистилляторов в данной работе. Результаты показали, что стоимость производства одного литра дистиллированной воды в данных типах СДПЦСК, СДДАХ, СДУУ, ПСДАКП, и ПСДТАК, составляет около 0,0268 \$, 0,031 \$, 0,033 \$, 0,065 \$ и 0.057 \$ соответственно, при условии, что пять типов солнечных дистилляторов работают около 180 дней в году (среднее количество солнечных дней в году в Екатеринбурге, Россия).

1		1	
н	1		
-	'		

Таблица 5.6 – Анализ стоимости производства воды в долларах.

Пункт	17 июля	2019 г.[А]	27 - 28 июля 2019 г.[Б] 24 июля 2020 г.[В] 29 июля 2020 г.[Г] 16 и		24 июля 2020 г.[B]		0 г.[Г] 16 июня 2021 г.[Д]	
	ТСД	СДПЦСК	ТСД	СДДАХ	ТСД	СДУУ	ПСДАКП	ПСДТАК
(п), лет	10	10	10	10	10	10	10	10
(i), %	12	12	12	12	12	12	12	12
(CS), \$	82	315	82	302	82	130	83	103.5
CRF	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769	0.1769
SFF	0.0569	0.0569	0.0569	0.0569	0.0569	0.0569	0.0569	0.0569
FAC (\$)	14.505	55.72	14.505	55.192	14.505	18.043	14.682	18.309
S (\$)	16.4	63	16.4	62.4	16.4	20.4	16.6	16.6
ASV (\$)	0.933	3.58	0.933	3.550	0.933	1.16	0.944	1.177
AMC (\$)	2.175	8.35	2.175	8.278	2.175	2.706	2.202	2.746
AC (\$)	15.748	60.49	15.748	59.92	15.748	19.589	15.940	19.878
<i>m_y</i> , (л/м ² · год)	558	2250	478.8	1864.8	450	756	244.8	342.9
ACP(\$)	0.0282	0.0268	0.033	0.031	0.0349	0.0330	0.065	0.057

Было проведено сравнение стоимости производства с предыдущими исследованиями, приведенными в Таблице 5.7 и на Рисунке 5.1. Видно, что стоимость производства литра дистиллированной воды в модифицированных солнечных дистилляторах в текущей работе сопоставима с полученной в предыдущих исследованиях. Кроме того, полученные результаты показывают, что наилучшая стоимость производства воды в солнечном дистилляторе при производительности 12,5 л/м² составляет около 0,0268 \$ при использовании солнечного дистиллятора с вращающимся полым цилиндром и внешним солнечным коллектором воды.



ных типах солнечных дистилляторе.

Таблица 5.7 – Сравнение стоимости производства дистиллированной воды в данной работе и предыдущих исследованиях.

Исследон	следование Тип исследования Тип солнечного дистиллятора		Местопо-	Суточная	Стоимость	
				ложение	производи-	производства
					тельность,	
					л/м ²	
[124]		Теоретическое	Одноемкостной односкатный	Египет	8,39	0,035
[127]		Экспериментальное	Одноемкостной односкатный	Пакистан	3,25	0,063
[128]		Экспериментальное	Одноемкостной односкатный с солнечным коллектором	Индия	6,08	0,14
[129]		Экспериментальное	Одноемкостной односкатный с солнечным коллектором	Иордан	4,78	0,115
[130]		Экспериментальное	Одноемкостной односкатный оребренный	Индия	2,771	0,054
[131]		Экспериментальное	Одноемкостной односкатный оребренный с фитилем	Индия	4,07	0,065
		и Теоретическое				
[132]		Экспериментальное	Одноемкостной односкатный с отделенным конденсатором	Турция	6	0,06
		и Теоретическое				
[133]		Экспериментальное	Ступенчатый оребренный с губчатым материалом	Индия	4	0,064
		и Теоретическое				
[125]		Теоретическое	Одноемкостной односкатный солнечный дистиллятор с сол-	Египет	7,45	0.037
			нечным водонагревателем и ультразвуковыми увлажнителями			
[123]		Экспериментальное	Одноемкостной односкатный солнечный дистиллятор с вра-		11	0,039
		и Теоретическое	щающимся закрытым цилиндром и спиральным солнечным			
			водонагревателем	ВИЯ		
		Экспериментальное	Солнечный дистиллятор на основе применения вращающегося	Россия	12,5	0,0268
	[A]	и Теоретическое	полого цилиндра и внешнего солнечного коллектора			
			(СДПЦСК)			
-	[Б]	Экспериментальное	Солнечный дистиллятор с фотоэлектрическим диффузионно-	Россия	10,36	0,031
Данная			абсорбционным холодильником (СДДАХ)			
работа	[B]	Экспериментальное	Солнечный дистиллятор с ультразвуковыми увлажнителями	Россия	4,2	0,033
		~	(СДУУ)			
		Экспериментальное	Пленочный солнечный дистиллятор с алюминиевой конденса-	Россия	1,36	0,065
		2	ционной пластиной (ПСДАКП).		1.005	0.057
	(Д)	Экспериментальное	Пленочный солнечный дистиллятор с тканевой испарительной	Россия	1,905	0,057
			поверхностью и термоэлектрическим алюминиевым каналом.			
			(ПСДТАК).			
		1		1	1	1

5.2. Физико-химические параметры производимой дистиллированной воды

Физические и химические свойства как пресной, так и питьевой воды, полученной в солнечном дистилляторе, важны для определения ее качества. Физические и химические параметры воды особенно важны при определении пригодности для использования ее человеком. Каждая характеристика сравнивалась с утвержденной спецификаций в Таблице (5.8) следующим образом:

1. Общая минерализация (TDS): на Рисунке 5.2 (1) показаны следующие результаты проб на общую минерализацию:

Эначения концентрации TDS всех проб воды находились в диапазоне от 13 до 230 миллионных долей.

> Дистиллированная вода, произведенная в солнечном дистилляторе, показывает лучший результат (13 миллионных долей) среди остальных проб.

2. Измеритель pH: значения pH находились в диапазоне от 6 до 8,5, как показано на Рисунке 5.2 (2). Результаты соответствуют стандартным спецификациям, регламентирующим все характеристики воды, такие как плотность, вязкость и т. д. При этом дистиллированная вода показала наилучший результат.

3. Электропроводность (ЕС). Электропроводность определяется как выражение способности водного раствора проводить электричество и зависит от концентрации и качества ионов в воде. На Рисунке 5.2 (3) показано, что электрическая проводимость воды из солнечных дистилляторов составляла 8,7 мкСм/см. Это связано с более совершенным процессом очищения воды.

Nº.	Параметр	Единица из-	Стандарт	
		мерения	Мировой [95],	Российский
			[96]	[97], [98]
1	Общая минерализация,	ppm	500	1000
	TDS			
2	pН	-	6.5-8.5	6-9
3	Электропроводимость, ЕС	μs/cm	1000	1000

Таблица 5.8 – Максимально допустимые значения по стандартам ВОЗ и России.



Рисунок 5.2 – 1- Общая минерализация (TDS), 2- значение (pH), и 3значения электропроводимости (EC) в различных пробах воды в Екатеринбурге, 2019.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Общий результат данной диссертационной работы представляет собой научно обоснованные технические решения, которые улучшают суточную производительность солнечного дистиллятора за счет использования усовершенствованных методов испарения и конденсации. Для улучшения характеристик и производительности солнечного дистиллятора были применены пять различных метода посредством проектирования и конструирования пять экспериментальных установок в дополнение к традиционному солнечному дистиллятору. Предлагаемые технические решения по обеспечению питьевой водой могут быть использованы в промышленных и бытовых целях, особенно в отдаленных и сельских районах, страдающих от нехватки воды. На основании экспериментальных и теоретических исследований, проведенных в данной работе, можно сделать следующие выводы:

- Экспериментально и теоретически доказано, что комбинированные солнечные опреснительные установки с дополнительным нагревом воды в солнечном коллекторе и фотоэлектрическим энергоснабжением активных элементов системы (насос, барабан, термоэлектрические охладители) позволяют повысить производительность установок по пресной воде до 2-4 раз при минимальной стоимости одного литра воды.
- 2. Глубина воды в емкости 1 см дает наилучшую суточную производительность (2700 мл/м²·сут) для традиционного солнечного дистиллятора, а для дистиллятора с полым цилиндром (модифицированный солнечный дистиллятор) более высокая суточная производительность реализуется при глубине воды в емкости 3 см и равняется 4500 мл/м² · сут с коэффициентом повышения 73% по сравнению с традиционным солнечным дистиллятором. При этом глубина воды в емкости 5 см для мо-дифицированного солнечного дистиллятора с внешним солнечным кол-

лектором воды (СДПЦСК) дает более высокую суточную производительность (9450 мл/м² · сут) с коэффициентом повышения 285% по сравнению с традиционным солнечным дистиллятором при тех же глубине воды и эксплуатационных параметрах.

- 3. Уменьшение числа оборотов в минуту вращающегося полого цилиндра для модифицированного солнечного дистиллятора (дистиллятора с цилиндром) приводит к интенсификации процесса испарения и увеличению производительности дистилляции воды, которая составила примерно 4700 мл/м² · сут при 0,5 об/мин и 2800 мл/м² · сут при 6 об/мин. Кроме того, 0,5 об/мин была принята типичной скоростью вращения полого цилиндра для модифицированного дистиллятора с внешним солнечным коллектором воды (СДПЦСК), а суточная производительность была равна примерно 9900 мл/м² · сут при 0,5 об/мин и 7200 мл/м² · сут при 6 об/мин.
- 4. Коэффициент повышения производительности модифицированного солнечного дистиллятора (СДПЦСК) в сравнении с традиционным солнечным дистиллятором составил не менее 280% в относительно жаркие месяцы (июнь, июль и август) и не менее 300% и 400% в более прохладные месяцы (сентябрь и октябрь), при этом совокупная производительность дистилляции воды летом достигала 12500 мл/м² · сут, а зимой 3500 мл/м² · сут.
- 5. Все тесты (TDS, pH и электропроводность) для дистиллированной воды, полученной в солнечных дистилляторах, показали наилучшие результаты.
- Максимальный термический КПД традиционного солнечного дистиллятора (ТСД) составлял около 52% 17 июля и 72% 2 октября 2019 года, что ниже, чем термический КПД модифицированного солнечного дистиллятора (СДПЦСК), составлявший около 72% и 99%, соответственно.
- 7. Численный анализ с использованием FORTRAN 90 может быть использован для изучения возникающих сложных явлений без использования

дорогих прототипов и сложных экспериментальных испытаний, а получаемые данные сопоставимы с результатами реальных солнечных дистилляторов.

- Совокупная производительность дистилляции воды солнечного дистиллятора с фотоэлектрическим диффузионным абсорбционным холодильником (СДДАХ) всегда была выше, чем у традиционного солнечного дистиллятора (ТСД). В дневное время (с 8:00 до 20:00) коэффициент повышения составил около 251%, а в ночное время (с 20:00 до 8:00) около 469%.
- Суточная производительность солнечный дистиллятор с ультразвуковым увлажнителем (СДУУ), составила 4200 мл/м² · сут с коэффициентом повышения на 68% по сравнению с ТСД, в котором равнялась около 2500 мл/м² · сут.
- 10. Плененный солнечный дистиллятор с алюминиевой конденсационной пластиной (ПСДАКП), считается инновационной попыткой опреснения воды с простой конструкцией и низкой стоимостью для отдаленных и сельских районов путем преобразования соленой воды в питьевую воду (в районах, где соленая вода является доступной) или извлечения влаги из влажного воздуха (для помещений с относительно высокой влажностью). Совокупная производительность опреснения на алюминиевой пластине была выше по сравнению со стеклянной крышкой, составляя 805 мл/м² · сут и 555 мл/м² · сут соответственно.
- 11. В эту систему было внесено усовершенствование за счет покрытия абсорбирующей пластины черной сетчатой хлопковой тканью и установки электротермических охлаждающих элементов на поверхности алюминиевой пластины (ПСДТАК). Хлопковая ткань сохраняла поверхность абсорбирующей пластины влажной, а не сухой (интенсифицируя испарение), в то время как электротермические охлаждающие элементы снижали температуру алюминиевой пластины (интенсифицируя конденса-

цию пара). Это улучшение привело к увеличению как производительности дистиллированной воды, так и термической эффективности солнечной системы дистилляции.

- 12. Самая высокая производительность, зарегистрированная во всех модификациях солнечного дистиллятора в данном исследовании, была зафиксирована в дистилляторе с полым цилиндром и внешним солнечным коллектором (СДПЦСК), а суточная производительность составила около 12500 мл/м² · сут.
- 13. Анализ стоимости производства одного литра воды в пяти типах модифицированных солнечных дистилляторов в данной работе показал, что минимальная стоимость производства одного литра дистиллированной воды была зафиксирована при использовании дистиллятора с полым цилиндром и внешним солнечным коллектором воды (СДПЦСК) и равнялась 0,0268 \$, и 0,028 \$ от традиционного солнечного дистиллятора (ТСД).

Направление дальнейшей разработки темы исследования:

1. Изучение эффекта увеличения площади поверхности абсорбционной и испарительной части (вращающегося полого цилиндра) за счет добавления ребер или гофрирования его поверхности.

2. Исследование эффекта применения фитиля на поверхности полого цилиндра при сохранении влажности его поверхности.

3. Оценка эффекта применения материала с фазовым переходом, такого как парафин, на внутренней поверхности полого цилиндра при сохранении повышенной температуры его поверхности.

4. Рекомендуется провести исследование, объединив пять модификаций системы солнечного дистиллятора, исследованных в данной работе.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Буквы латинского алфавита					
Символ	Описание	Единицы			
		измерения			
A	Площадь	M ²			
Cp	Удельная теплоемкость	Дж/кг.К			
F'	КПД коллектора	-			
F _R	Коэффициент отвода тепло солнечного коллектора	-			
G _{sc}	Солнечная постоянная	BT/M^2			
g	Ускорение свободного падения на Земле	м/с ²			
h	Коэффициент конвективной теплопередачи	Вт/м ² . К			
I(t)	Интенсивность солнечного излучения	В т/м ²			
K	Теплопроводность	Вт/м.К			
K _T	Индекс ясности	-			
n	Количество дней в году	-			
Р	Давление	Па			
R	Термическое сопротивление	м ² .К/Вт			
t	Время	с			
Т	Температура	°C			
V	Скорость	м/с			
U	Общий коэффициент теплопередачи	BT/M^2 . K			
V	Объем	Литр			
W	Ширина	М			
H	Высота	М			
L	Длина	М			
m	Macca	КГ			
d	Диаметр	М			
r	Радиус	М			
th	Толщина	М			
a	Воздух	-			
	Совокупная производительность дистилляции воды	л/м². сутки			
<u>m</u>	Массовыи расход	кг/с			
1	І одовая доходность	%			
<u>S</u>	Остаточная стоимость солнечного опреснения воды	-			
<u>Nu</u>	Число Нуссельта	-			
P_r	Число Прандтля	-			
R_a	Число Рэлея	-			
<u> </u>	Standard deviation	- Пала /			
n _{fg}	Скрытая теплота испарения воды	Дж/кг			
my	І одовая производительность дистилляции воды	Л/М² • Г			
	Буквы греческого алфавита				
a	Частично поглощенное солнечное излучение				
8	Излучательная способность поверхности	0			
δ	Угол наклона	0			
τα	Произведение проницаемости и абсорбции.	-			
φ	Широта угловая	0			
θ	Зенитный угол	0			
ω	Часовой угол	0			
--------	--	-------------------			
α'	Температуропроводность	м ² /с			
β	Угол наклона	0			
β'	Коэффициент термического расширения	1/K			
γ	Азимутальный угол	0			
ρ	Плотность	кг/м ³			
μ	Динамическая вязкость	кг/м.с			
v	Кинематическая вязкость	м ² /с			
α	Постоянная Стефана-Больцмана	BT/M^2 . K^4			
η	Термический КПД	%			
	Аббревиатуры				
hc	Полый цилиндр	-			
bp	Облицовка емкости	-			
bw	Вода в емкости	-			
sh	Тень полого цилиндра	-			
su	Погруженная в воду емкости площадь полого цилиндра	-			
II	Солнечное излучение на горизонтальной поверхности	0			
IT	Солнечное излучение на наклонной поверхности	0			
Qu	Полезная энергия	Ватт			
rpm	Обороты в минуту	Об/мин			
TDS	Общее количество растворенных твердых веществ	промилле			
EC	Электропроводимость	мкс/см			
S.E	Standard error	%			
CS	Капитальные затраты	\$			
CRF	фактор возврата капитала	-			
SFF	фактор фонда возмещения	-			
FAC	Первые годовые затраты	\$			
ASV	Годовая остаточная стоимость	-			
AMC	Годовая стоимость обслуживания	\$			
AC	Годовая стоимость	\$			
АСР	Среднегодовая стоимость дистиллированной воды	\$			
СВПЦ	Скорость вращения полого цилиндра	Об/мин			
ТСД	Традиционный солнечный дистиллятор	-			
МСД	Модифицированный солнечный дистиллятор	-			
ПЦСК	Полый цилиндр и солнечный коллектор	-			
СДПЦСК	Солнечный дистиллятор с вращающимся полым цилиндром	-			
	и внешним солнечным коллектором воды				
СДДАХ	Солнечный дистиллятор с фотоэлектрическим диффузионно-	-			
	абсорбционным холодильником				
СДУУ	Солнечный дистиллятор с применением ультразвуковых	-			
	увлажнителей				
педаки	пленочныи солнечный дистиллятор с алюминиевой конден-	-			
ПСЛТАК	Сационной пластиной				
	ной поверхностью и термоэлектрическим алюминиевым ка-				
	налом.				

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- L. Swatuk, M. McMorris, C. Leung, and Y. Zu, "Seeing 'invisible water': Challenging conceptions of water for agriculture, food and human security," *Can. J. Dev. Stud.*, vol. 36, no. 1, pp. 24–37, 2015, doi: 10.1080/02255189.2015.1011609.
- [2] S. Senevirathna, S. Ramzan, and J. Morgan, "A sustainable and fully automated process to treat stored rainwater to meet drinking water quality guidelines," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 130, pp. 190–196, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.psep.2019.08.005.
- [3] M. T. Chaibi, "An overview of solar desalination for domestic and agriculture water needs in remote arid areas," 2000.
- [4] R. Dev and G. N. Tiwari, "Characteristic equation of a passive solar still," *Desalination*, vol. 245, no. 1–3, pp. 246–265, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.07.011.
- [5] Y. Sayato, "WHO Guidelines for Drinking-Water Quality," *Eisei kagaku*, vol. 35, no. 5. pp. 307–312, 1989, doi: 10.1248/jhs1956.35.307.
- [6] H. G. Gorchev and G. Ozolins, "Guidelines for Drinking-water Quality, 3rd Edition," *Who*, vol. 1, p. 564, 2004, doi: 10.1016/S1462-0758(00)00006-6.
- [7] I. Policies, I. Action, C. Change, and T. Waters, "ABOUT UN-WATER," pp. 9–10, 2020.
- [8] G. N. Tiwari, H. N. Singh, and R. Tripathi, "Present status of solar distillation," *Sol. Energy*, vol. 75, no. 5, pp. 367–373, 2003, doi: 10.1016/j.solener.2003.07.005.
- [9] A. D. Khawaji, I. K. Kutubkhanah, and J. M. Wie, "Advances in seawater desalination technologies," *Desalination*, vol. 221, no. 1–3, pp. 47–69, 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.01.067.
- [10] L. García-Rodríguez, "Seawater desalination driven by renewable energies: A review," *Desalination*, vol. 143, no. 2, pp. 103–113, 2002, doi: 10.1016/S0011-9164(02)00232-1.
- [11] F. Muhammad-Sukki et al., "Solar photovoltaic in Malaysia: The way forward," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 7, pp. 5232–5244, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.05.002.
- [12] REN21, Renewables 2016 Global Status Report. 2016.
- [13] M. Tyagunov, "Distributed energysystem's is the future of the world's power industry," in 2017 2nd International Conference on the Applications of Information Technology in Developing Renewable Energy Processes & Systems (IT-DREPS), 2017, pp. 1–4.
- [14] V. V. Elistratov and E. S. Aronova, "Solar photo energy technologies for electric power consumers," *Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika)*, vol. 45, no. 3. pp. 143–147, 2009, doi: 10.3103/S0003701X09030025.
- [15] H. Manchanda and M. Kumar, "A comprehensive decade review and analysis on designs and performance parameters of passive solar still," *Renewables*

Wind. Water, Sol., vol. 2, no. 1, 2015, doi: 10.1186/s40807-015-0019-8.

- [16] A. Kaushal and Varun, "Solar stills: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 446–453, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.05.011.
- [17] J. K. Choi and J. Fisher, *Global issues*. 2016.
- [18] H. Z. Hassan, A. Mohamad, and R. Bennacer, "Simulation of an adsorption solar cooling system," *Energy*, vol. 36, no. 1, pp. 530–537, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.10.011.
- [19] W. Ocean, "Удк 338:639.2 перспективные возможности хозяйственного освоения ресурсов мирового океана," pp. 8–17.
- [20] С. И. Нанотехнологий, "В. К. Бразновский," 2013.
- [21] F. Trieb and H. Müller-Steinhagen, "Concentrating solar power for seawater desalination in the Middle East and North Africa," *Desalination*, vol. 220, no. 1–3, pp. 165–183, 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.01.030.
- [22] A. Agrawal, R. S. Rana, P. K. Shrivastava, and R. P. Singh, "a Short Review on Solar Water Distillation for," no. 1, pp. 27–36, 2016.
- [23] B. Moshfegh, "World Renewable Energy Congress Sweden Editor," World Renew. Energy Congr. -Sweden, 2011.
- [24] H. Sharon and K. S. Reddy, "A review of solar energy driven desalination technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, pp. 1080–1118, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.002.
- [25] K. Sampathkumar, T. V. Arjunan, P. Pitchandi, and P. Senthilkumar, "Active solar distillation-A detailed review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 6. pp. 1503–1526, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2010.01.023.
- [26] A. F. Muftah, M. A. Alghoul, A. Fudholi, M. M. Abdul-Majeed, and K. Sopian, "Factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 430–447, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.052.
- [27] M. Sharma, A. K. Tiwari, and D. R. Mishra, "A review on desalination of water using single slope passive solar still," *Int. J. Dev. Res.*, vol. 06, no. 11, pp. 10002–10012, 2016.
- [28] A. F. Muftah, M. A. Alghoul, A. Fudholi, M. M. Abdul-Majeed, and K. Sopian, "Factors affecting basin type solar still productivity: A detailed review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 430–447, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.052.
- [29] M. Q. Khairuzzaman, "No Title血清及尿液特定蛋白检测在糖尿病肾病早期诊断中的意义," vol. 4, no. 1, pp. 64–75, 2016.
- [30] O. O. B. Æ. M. M. Abu-khader, "Evaluating thermal performance of a single slope solar still," pp. 985–995, 2007, doi: 10.1007/s00231-006-0180-0.
- [31] E. A. Almuhanna, "Evaluation of Single Slop Solar Still Integrated With Evaporative Cooling System for Brackish Water Desalination," *J. Agric. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 48–58, 2013, doi: 10.5539/jas.v6n1p48.
- [32] A. K. Singh, G. N. Tiwari, P. B. Sharma, and E. Khan, "Optimization of orientation for higher yield of solar still for a given location," *Energy Convers.*

Manag., vol. 36, no. 3, pp. 175–181, 1995, doi: 10.1016/0196-8904(94)00045-2.

- [33] B. A. B. Jubran, H. Al-Hinai, M. S. M. Al-Nassri, and B. A. B. Jubran, "Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still," *Fuel Energy Abstr.*, vol. 44, no. 2, p. 87, 2003, doi: 10.1016/s0140-6701(03)90659-x.
- [34] G. Xiao *et al.*, "A review on solar stills for brine desalination," *Appl. Energy*, vol. 103, pp. 642–652, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.10.029.
- [35] K. Voropoulos, E. Mathioulakis, and V. Belessiotis, "Experimental investigation of the behavior of a solar still coupled with hot water storage tank," *Desalination*, vol. 156, no. 1–3, pp. 315–322, 2003, doi: 10.1016/S0011-9164(03)00362-X.
- [36] O. O. Badran, "Experimental study of the enhancement parameters on a single slope solar still productivity," *Desalination*, vol. 209, no. 1-3 SPEC. ISS., pp. 136–143, 2007, doi: 10.1016/j.desal.2007.04.022.
- [37] A. A. El-Sebaii, "Effect of wind speed on some designs of solar stills," *Energy Convers. Manag.*, vol. 41, no. 6, pp. 523–538, 2000, doi: 10.1016/S0196-8904(99)00119-3.
- [38] Y. H. Zurigat and M. K. Abu-Arabi, "Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 24, no. 7, pp. 1061–1072, 2004, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2003.11.010.
- [39] A. A. El-Sebaii, "Effect of wind speed on active and passive solar stills," *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 7–8, pp. 1187–1204, 2004, doi: 10.1016/j.enconman.2003.09.036.
- [40] S. H. Soliman, "Effect of wind on solar distillation," *Sol. Energy*, vol. 13, no. 4, pp. 403–415, 1972, doi: 10.1016/0038-092X(72)90006-0.
- [41] R. M. Reddy and K. H. Reddy, "Upward heat flow analysis in basin type solar still," *J. Min. Metall. Sect. B Metall.*, vol. 45, no. 1, pp. 121–126, 2009.
- [42] H. C. Hottel, "Performance of flat-plate solar heat collectors.," *Trans. ASME* 64, vol. 91, 1942.
- [43] A. A. Hegazy, "Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors," *Renew. energy*, vol. 22, no. 4, pp. 525– 540, 2001, doi: 10.1016/S0960-1481(00)00093-8.
- [44] E. Zamfir, C. Oancea, and V. Badescu, "Cloud cover influence on long-term performances of flat plate solar collectors," *Renew. Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 339–347, 1994, doi: 10.1016/0960-1481(94)90038-8.
- [45] A. M. El-Nashar, "The effect of dust accumulation on the performance of evacuated tube collectors," *Sol. Energy*, vol. 53, no. 1, pp. 105–115, 1994, doi: 10.1016/S0038-092X(94)90610-6.
- [46] A. M. El-Nashar, "Seasonal effect of dust deposition on a field of evacuated tube collectors on the performance of a solar desalination plant," *Desalination*, vol. 239, no. 1–3, pp. 66–81, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.03.007.
- [47] E. Rubio, M. A. Porta, and J. L. Fernández, "Cavity geometry influence on mass flow rate for single and double slope solar stills," *Appl. Therm. Eng.*, vol.

20, no. 12, pp. 1105–1111, 2000, doi: 10.1016/S1359-4311(99)00085-X.

- [48] H. P. Garg and H. S. Mann, "Effect of climatic, operational and design parameters on the year round performance of single-sloped and double-sloped solar still under Indian arid zone conditionst," Pergamon Press, 1976.
- [49] P. Hitesh N Panchal, "Performance Analysis of Solar Still Having Different Plates," *Int. J. Energy Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 26–29, 2012.
- [50] R. Bhardwaj, M. V. ten Kortenaar, and R. F. Mudde, "Inflatable plastic solar still with passive condenser for single family use," *Desalination*, vol. 398. pp. 151–156, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.07.011.
- [51] H. N. Singh and G. N. Tiwari, "Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions," *Desalination*, vol. 168, no. 1–3, pp. 145–150, 2004, doi: 10.1016/j.desal.2004.06.180.
- [52] B. A. Akash, M. S. Mohsen, and W. Nayfeh, "00/01458 Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions," *Fuel Energy Abstr.*, vol. 41, no. 3, p. 163, 2000, doi: 10.1016/s0140-6701(00)93188-6.
- [53] A. A. Aljubouri, "Design and Manufacturing of Single Sloped Solar Still: Study the Effect of Inclination Angle and Water Depth on Still Performance," *J. Al-Nahrain Univ.*, vol. 20, no. 2, pp. 60–70, 2017, doi: 10.22401/juns.20.2.08.
- [54] A. Y. Hashim and W. A. T. Alramdhan, "An attempt to solar still productivity optimization; solar still shape, glass cover inclination and inner surface area of a single basin solar still, optimization," *Basrah J. Scienec*, vol. 28, no. 1, pp. 39–48, 2010.
- [55] M. K. Phadatare and S. K. Verma, "Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still," *Desalination*, vol. 217, no. 1–3, pp. 267–275, Nov. 2007, doi: 10.1016/j.desal.2007.03.006.
- [56] S. Balamurugan, N. S. Sundaram, K. P. Marimuthu, and J. Devaraj, "A Comparative Analysis and Effect of Water Depth on the Performance of Single Slope Basin Type Passive Solar Still Coupled with Flat Plate Collector and Evacuated Tube Collector," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 867, no. July, pp. 195– 202, 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.867.195.
- [57] S. M. Younis, M. H. El-Shakweer, M. M. El-danasary, A. A. Gharieb, and R. I. Mourad, "Effect of Some Factors on Water Distillation By Solar Energy," *Misr J. Agric. Eng.*, vol. 27, no. 2, pp. 586–599, 2010, doi: 10.21608/mjae.2010.105848.
- [58] K. Tarawneh and S. Muafag, "Effect of Water Depth on the Performance Evaluation of Solar Still," *Jordan J. Mech. Ind. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 23–29, 2007.
- [59] O. K. Ahmed, A. H. Ahmed, and K. I. Mohammad, "Experimental Investigation for the Performance of Simple Solar Still in Iraqi North," *Int. J. Eng. Adv. Technol.*, vol. 3, no. 2, pp. 193–198, 2013.
- [60] H. M. Ahmed and G. Ibrahim, "Thermal Performance of a Conventional Solar Still with a Built-in Passive Condenser: Experimental studies," J. Adv. Sci. Eng. Res., vol. 7, no. 3, pp. 1–12, 2017.

- [61] N. Pandey and A. K. Rai, "Performance study of solar still with separate condenser," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 4, pp. 125–130, 2016.
- [62] W. H. Alawee, "Improving the productivity of single effect double slope solar still by modification simple," *J. Eng.*, vol. 21, no. 8, pp. 50–60, 2015.
- [63] S. T. Ahm, "S T U D Y of S I N G L E E F F E C T Solar Still With a N Internal Condenser," vol. 5, no. 6, pp. 637–643, 1988.
- [64] P. I. Cooper, "Some factors affecting the absorption of solar radiation in solar stills," *Sol. Energy*, vol. 13, no. 4, pp. 373–381, 1972, doi: 10.1016/0038-092X(72)90003-5.
- [65] S. Abdallah, M. M. Abu-Khader, and O. Badran, "Effect of various absorbing materials on the thermal performance of solar stills," *Desalination*, vol. 242, no. 1–3, pp. 128–137, 2009, doi: 10.1016/j.desal.2008.03.036.
- [66] K. Kalidasa Murugavel and K. Srithar, "Performance study on basin type double slope solar still with different wick materials and minimum mass of water," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 2, pp. 612–620, 2011, doi: 10.1016/j.renene.2010.08.009.
- [67] K. Kalidasa Murugavel, K. K. S. K. Chockalingam, and K. Srithar, "An experimental study on single basin double slope simulation solar still with thin layer of water in the basin," *Desalination*, vol. 220, no. 1–3, pp. 687–693, 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.01.063.
- [68] H. H. Al-Kayiem and S. C. Lin, "Performance evaluation of a solar water heater integrated with a PCM nanocomposite TES at various inclinations," *Sol. Energy*, vol. 109, no. 1, pp. 82–92, 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.08.021.
- [69] M. Asbik, O. Ansari, A. Bah, N. Zari, A. Mimet, and H. El-Ghetany, "Exergy analysis of solar desalination still combined with heat storage system using phase change material (PCM)," *Desalination*, vol. 381, pp. 26–37, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2015.11.031.
- [70] A. M. Radhwan, "Transient performance of a stepped solar still with built-in latent heat thermal energy storage," *Desalination*, vol. 171, no. 1, pp. 61–76, 2005, doi: 10.1016/j.desa1.2003.12.010.
- [71] A. A. El-Sebaii, A. A. Al-Ghamdi, F. S. Al-Hazmi, and A. S. Faidah, "Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 7–8, pp. 1187–1195, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.10.014.
- [72] T. T. Chow, Z. Dong, L. S. Chan, K. F. Fong, and Y. Bai, "Performance evaluation of evacuated tube solar domestic hot water systems in Hong Kong," *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3467–3474, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.009.
- [73] S. Krauter *et al.*, "Solar Cell Cooling and Heat Recovery in a Concentrated Photovoltaic System," *2012 COMSOL Conference in Milan*, vol. 82, no. 4. pp. 8–13, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2005.12.012.
- [74] K. Sampathkumar, T. V. Arjunan, and P. Senthilkumar, "Single basin solar still coupled with evacuated tubes Thermal modeling and experimental validation," *Int. Energy J.*, vol. 12, no. 1, pp. 53–66, 2011.

- [75] K. Shanmugasundaram and B. Janarthanan, "Experimental Analysis of Double Slope Single Basin Solar Still Coupled With Shallow Solar Pond," 2014.
- [76] S. Selimli, Z. Recebli, and S. Ulker, "Solar vacuum tube integrated seawater distillation An experimental study," *Facta Univ. Ser. Mech. Eng.*, vol. 14, no. 1, pp. 113–120, 2016, doi: 10.22190/fume1601113s.
- [77] M. Farahat, M. Mousa, and N. Mahmoud, "Solar Distiller With Flat Plate Collector and Thermal Storage," *Int. Conf. Appl. Mech. Mech. Eng.*, vol. 17, no. 17, pp. 1–11, 2016, doi: 10.21608/amme.2016.35260.
- [78] C. Paper and S. Fawad, "Desalination of Water: Design, Fabrication and Performance Evaluation of Active Solar Still Coupled with Solar Collector," no. June, 2017.
- [79] B. P. Singh, "Performance Evaluation of a Integrated Single Slope Solar Still With Solar Water Heater," vol. 1, no. 1, pp. 67–70, 2011.
- [80] O. Badran, "Theoretical Analysis of Solar Distillation Using Active Solar Still," *Int. J. Therm. Environ. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 113–120, 2010, doi: 10.5383/ijtee.03.02.009.
- [81] A. K. Sethi and V. K. Dwivedi, "Exergy analysis of double slope active solar still under forced circulation mode," vol. 3994, 2013, doi: 10.1080/19443994.2013.777945.
- [82] H. Mousa, M. Abu-Arabi, M. Al-Naerat, R. Al-Bakkar, Y. Ammera, and A. Khattab, "Solar Desalination Indirect Heating," *Int. J. Sustain. Water Environ. Syst.*, vol. 1, no. 1, pp. 29–32, 2010, doi: 10.5383/swes.0101.007.
- [83] И. Р. Рахматулин, "Разработка комплексной энергоэффективной солнечной опреснительной установки с системой слежения за Солнцем." Челябинск, 2015.
- [84] F. A. Essa, A. S. Abdullah, and Z. M. Omara, "Rotating discs solar still: New mechanism of desalination," *J. Clean. Prod.*, vol. 275, p. 123200, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123200.
- [85] A. S. Abdullah, A. Alarjani, M. M. Abou Al-sood, Z. M. Omara, A. E. Kabeel, and F. A. Essa, "Rotating-wick solar still with mended evaporation technics: Experimental approach," *Alexandria Eng. J.*, vol. 58, no. 4, pp. 1449–1459, 2019, doi: 10.1016/j.aej.2019.11.018.
- [86] Z. S. Abdel-rehim and A. Lasheen, "Improving the performance of solar desalination systems," vol. 30, pp. 1955–1971, 2005, doi: 10.1016/j.renene.2005.01.008.
- [87] L. Malaeb, K. Aboughali, and G. M. Ayoub, "ScienceDirect Modeling of a modified solar still system with enhanced productivity," *Sol. Energy*, vol. 125, pp. 360–372, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.12.025.
- [88] G. M. Ayoub, L. Malaeb, and P. E. Saikaly, "ScienceDirect Critical variables in the performance of a productivity-enhanced solar still," *Sol. Energy*, vol. 98, pp. 472–484, 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.09.030.
- [89] G. M. Ayoub, M. Al-Hindi, and L. Malaeb, "A solar still desalination system with enhanced productivity," *Desalin. Water Treat.*, vol. 53, no. 12, pp. 3179– 3186, 2015, doi: 10.1080/19443994.2014.933040.

- [90] G. M. Ayoub and L. Malaeb, "Economic feasibility of a solar still desalination system with enhanced productivity," *DES*, vol. 335, no. 1, pp. 27–32, 2014, doi: 10.1016/j.desal.2013.12.010.
- [91] R. Mansouri, M. Bourouis, and A. Bellagi, "Steady state investigations of a commercial diffusion-absorption refrigerator: Experimental study and numerical simulations," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 129, pp. 725–734, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.010.
- [92] A. Zohar, M. Jelinek, A. Levy, and I. Borde, "The influence of diffusion absorption refrigeration cycle configuration on the performance," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 27, no. 13, pp. 2213–2219, 2007, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2005.07.025.
- [93] "The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. II," *Proc. R. Soc. London. Ser. A. Math. Phys. Sci.*, vol. 202, no. 1068, pp. 81–96, 1950, doi: 10.1098/rspa.1950.0086.
- [94] B. Avvaru, M. N. Patil, P. R. Gogate, and A. B. Pandit, "Ultrasonic atomization: Effect of liquid phase properties," *Ultrasonics*, vol. 44, no. 2, pp. 146–158, 2006, doi: 10.1016/j.ultras.2005.09.003.
- [95] E. M. Region, "quality standards in the Eastern Mediterranean."
- [96] RS2, Potable water specification,2nd Ed, Rwanda Bureau of standard,kigali. 2012.
- [97] "Ac ce d M detailed study on regional surface water acidification in European Russia and Western Siberia based on a us pt," 2018.
- [98] Z. Govorova, N. Podlesnov, and V. Govorov, "Devices for cleaning tap water," *E3S Web Conf.*, vol. 97, pp. 1–8, 2019, doi: 10.1051/e3sconf/20199701027.
- [99] J. P. Holman, J.P. Holman.
- [100] K. Srithar, "Studies on solar augmented evaporation systems for tannery effluent (Soak liquor)." PhD thesis, Indian Institute of Technology, Madras, 2003.
- [101] J. A. D. Deceased and W. A. Beckman, of Thermal Processes Solar Engineering.
- [102] A. Bejan, "Heat transfer, second edition," 1995.
- [103] D. W. Medugu and L. Ndatuwong, "Theoretical analysis of water distillation using solar still," no. December 2009, 2018.
- [104] metode penelitian Nursalam, 2016 and A. . Fallis, "済無No Title No Title," J. Chem. Inf. Model., vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2013.
- [105] S. Ahmed, Q. Abdul-Ghafour, and L. Ismael, "Study of Transient Simulation for Solar Heating System," *Uotechnology.Edu.Iq*, vol. 29, no. 4, pp. 677–697, 2011.
- [106] S. E. Frid, O. S. Popel, N. V. Lisitskaya, and S. V. Kiseleva, "Generalized clearness index frequency curves for the Russian Federation," *Dokl. Phys.*, vol. 62, no. 5, pp. 278–280, 2017, doi: 10.1134/S102833581705010X.
- [107] S. E. Frid, N. V. Lisitskaya, and O. S. Popel, "Cumulative Clearness Index Frequency Distributions on the Territory of the Russian Federation," *Dokl.*

Phys., vol. 63, no. 2, pp. 89–92, 2018, doi: 10.1134/S1028335818020040.

- [108] M. Benghanem, "Optimization of tilt angle for solar panel: Case study for Madinah, Saudi Arabia," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1427–1433, 2011, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.10.001.
- [109] R. R. Al-Ani, A. Hameed, M. Jawad, A. Obaidy, and R. M. Badri, "Assessment of Water Quality in the Selected Sites on the Tigris River, Baghdad-Iraq," *Int. J. Adv. Res. Journalwww.journalijar.com Int. J. Adv. Res.*, vol. 2, no. 5, pp. 1125–1131, 2014.
- [110] S. Edition, Free convection, vol. 112. 2015.
- [111]P. T. Tsilingiris, "Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100 ° C," vol. 49, pp. 1098–1110, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2007.09.015.
- [112] S. Tharmalingam and W. L. Wilkinson, "The coating of Newtonian liquids onto a rotating roll," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 33, no. 11, pp. 1481–1487, 1978.
- [113] A. E. Kabeel and M. Abdelgaied, "Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions," *Desalination*, vol. 383, pp. 22–28, 2016, doi: 10.1016/j.desal.2016.01.006.
- [114] S. Nazari, H. Safarzadeh, and M. Bahiraei, "Experimental and analytical investigations of productivity, energy and exergy ef fi ciency of a single slope solar still enhanced with thermoelectric channel and nano fl uid," vol. 135, 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.12.059.
- [115] D. G. Harris Samuel, P. K. Nagarajan, R. Sathyamurthy, S. A. El-Agouz, and E. Kannan, "Improving the yield of fresh water in conventional solar still using low cost energy storage material," *Energy Convers. Manag.*, vol. 112, pp. 125– 134, 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2015.12.074.
- [116] H. Yan, B. Hu, and T. Xu, "Study on the supporting and repairing technologies for difficult roadways with large deformation in coal mines," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 1653–1658, 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2011.12.1155.
- [117] S. Balamurugan, N. S. Sundaram, K. P. Marimuthu, and J. Devaraj, "A Comparative Analysis and Effect of Water Depth on the Performance of Single Slope Basin Type Passive Solar Still Coupled with Flat Plate Collector and Evacuated Tube Collector," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 867, no. March 2018, pp. 195–202, 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/amm.867.195.
- [118] S. A. Abdul-Wahab and Y. Y. Al-Hatmi, "Study of the performance of the inverted solar still integrated with a refrigeration cycle," *Procedia Eng.*, vol. 33, pp. 424–434, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.01.1222.
- [119] B. Gupta, P. Shankar, R. Sharma, and P. Baredar, "Performance Enhancement Using Nano Particles in Modified Passive Solar Still," *Procedia Technol.*, vol. 25, no. Raerest, pp. 1209–1216, 2016, doi: 10.1016/j.protcy.2016.08.208.
- [120] S. Kandasamy, M. Vellingiri, S. Sengottain, and J. Balasundaram, "Performance correlation for single-basin double-slope solar still," 2013.
- [121] L. Malaeb, K. Aboughali, and G. M. Ayoub, "Modeling of a modified solar still system with enhanced productivity," *Sol. Energy*, vol. 125, pp. 360–372, 2016, doi: 10.1016/j.solener.2015.12.025.

- [122] P. K. Nithin and R. Hraiharan, "Experimental Analysis of Double Effect Type Solar Still Integrated with Liquid Flat Plate Collector," vol. 2, no. 7, pp. 240– 247, 2014.
- [123] A. S. Abdullah *et al.*, "Rotating-drum solar still with enhanced evaporation and condensation techniques: Comprehensive study," *Energy Convers. Manag.*, vol. 199, no. September, p. 112024, 2019, doi: 10.1016/j.enconman.2019.112024.
- [124] H. E. S. Fath, M. El-Samanoudy, K. Fahmy, and A. Hassabou, "Thermaleconomic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations," *Desalination*, vol. 159, no. 1, pp. 69–79, 2003, doi: 10.1016/S0011-9164(03)90046-4.
- [125] A. I. Shehata *et al.*, "Enhancement of the productivity for single solar still with ultrasonic humidifier combined with evacuated solar collector: An experimental study," *Energy Convers. Manag.*, vol. 208, no. February, p. 112592, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112592.
- [126] A. E. Kabeel, A. M. Hamed, and S. A. El-Agouz, "Cost analysis of different solar still configurations," *Energy*, vol. 35, no. 7, pp. 2901–2908, 2010, doi: 10.1016/j.energy.2010.03.021.
- [127] M. Ali Samee, U. K. Mirza, T. Majeed, and N. Ahmad, "Design and performance of a simple single basin solar still," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 11, no. 3, pp. 543–549, 2007, doi: 10.1016/j.rser.2005.03.003.
- [128] S. Kumar and G. N. Tiwari, "Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 10, pp. 1995–2004, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.03.005.
- [129] O. O. Badran and H. A. Al-Tahaineh, "The effect of coupling a flat-plate collector on the solar still productivity," *Desalination*, vol. 183, no. 1–3, pp. 137–142, 2005, doi: 10.1016/j.desal.2005.02.046.
- [130] V. Velmurugan, C. K. Deenadayalan, H. Vinod, and K. Srithar, "Desalination of effluent using fin type solar still," *Energy*, vol. 33, no. 11, pp. 1719–1727, 2008, doi: 10.1016/j.energy.2008.07.001.
- [131] V. Velmurugan, M. Gopalakrishnan, R. Raghu, and K. Srithar, "Single basin solar still with fin for enhancing productivity," *Energy Convers. Manag.*, vol. 49, no. 10, pp. 2602–2608, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.05.010.
- [132] A. El-Bahi and D. Inan, "Analysis of a parallel double glass solar still with separate condenser," *Renew. Energy*, vol. 17, no. 4, pp. 509–521, 1999, doi: 10.1016/S0960-1481(98)00768-X.
- [133] V. Velmurugan, S. Senthil Kumaran, V. Niranjan Prabhu, and K. Srithar, "Productivity enhancement of stepped solar still - Performance analysis," *Therm. Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 153–163, 2008, doi: 10.2298/TSCI0803153V.
- [134] S. H. Chue, "Pressure probes for fluid measurement," *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 16, no. 2, pp. 147–223, 1975, doi: 10.1016/0376-0421(75)90014-7.

Приложение А.

А. 1. Калибровка устройств

Калибровка настоятельно рекомендуется для обеспечения точного сбора данных во время экспериментальной работы. Обычной практикой является сравнение данных, полученных при помощи надежных эталонных показаний, чтобы определить взаимосвязь между двумя измерениями и рассчитать получившуюся точность.

А. 1.1. Калибровка 4-канального регистратора данных с SD-картой термопарами К-типа

Термопара К-типа с 4-канальным регистратором данных с SD-картой откалиброваны путем помещения чувствительного элемента устройства в резервуары с чистыми веществами (ледяная вода, фреон-R11, ацетон и дистиллированная вода), и регистр показаний в таблице А.1 при атмосферном давлении давление, как показано на Рисунке А.1.

Обозначение	Вещество	Температура фазо перехода (°С)	вого	Температура на регистраторе данных (°С)	Погрешность %
А	Ацетон	Точка кипения	56	55.5	0.9
Д	Дистиллированная вода	Точка кипения	99.9	99.3	0.6
Φ	Фреон-R11	Точка кипения	23.7	23.3	1.69
Л	Ледяная вода	Точка замерзания	0	0	0

Таблица А.1–Результаты калибровки термопар.



Рисунок А.1 – Результаты калибровки 4-канального регистратора данных с SD-картой термопарами К-типа.

А. 1.2. Калибровка измерителя солнечного излучения

Данное устройство модели TENMARS TM-207 калибровано в лаборатории кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии», Уральского Федерального университета. Процентная погрешность средней интенсивности солнечного излучения дан в Таблице А.2 и проиллюстрирован на Рисунке А.2.

Показания измерителя солнеч- ного излучения ТМ-207 (Вт/м ²)	Калибровочный измеритель сол- нечного излучения (Вт/м ²)	Погрешность%
133	130	2.31
289	284	1.76
326	315	3.5
389	375	3.7
456	435	4.8
652	636	2.5
746	734	1.63
832	814	2.2
1008	995	1.3

Таблица А.2 – Калибровка измерителя солнечного излучения ТМ-207.



Рисунок А.2 – Калибровка измерителя солнечного излучения

А. 1.3. Калибровка анемометра

Данное устройство модели UT363 откалибровано при помощи трубки Пито. Поправка для показаний скорости воздуха трубки Пито определяется по стандартам [134].

$$P_{total} = P_{dynamic} + P_{ststic} \tag{A-1}$$

$$P_{dynamic} = P_{total} - P_{ststic} = \Delta P_{velocity} = \Delta H_w. \rho_w. g = \frac{1}{2}. C. \rho_a. V_a^2$$
(A-2)

$$V_a = \sqrt{\frac{2.\Delta H_w.\rho_w.g}{c.\rho_a}} \tag{A-3}$$

$$C = C_o + \tau + \Omega \tag{A-4}$$

Где: C_o – параметр расстояния между трубкой и статичным отверстием, в данной работе параметр равен 0.9975. τ – параметр вязкости, (полностью развившийся поток ($\tau = 0$)).

 Ω – это параметр расстояния трубки от стенки, который можно определить по Рисунку А.3.



Рисунок А.3 – Поправка на статичную трубку Пито

Процентная средняя погрешность дана в Таблице А.3 и проиллюстрирована на Рисунке А4.

Показания анемометра	Показания трубки	Погрешность
UT363 (м/с)	Пито (м/с)	%
0	0	0
5	4.8	4.17
7.5	7.3	2.74
10	9.8	2.04
15	15	0
20	20	0
25	24.9	0.4
30	29.8	0.67

Таблица А.3 – Калибровка анемометра UT363.



Рисунок А.4 – Калибровка анемометра

А. 1.4. Калибровка расходомера

Расходомер откалиброван при помощи лабораторных резервуаров с жидкостью, данные калибровки представлены в Таблице А.4, как показано на Рисунке А.5.

	Замер (1) Замер (2)						
Показания расходомера (л/мин)	Градуиро- ванный цилиндр [<i>V_m</i>] (мл)	Время калибровки [t] (c)	Расход [\dot{V}_m] (л/мин)	Градуирован- ный цилиндр [<i>V_m</i>] (мл)	Время калибровки [t] (c)	Расход [\dot{V}_m] (л/мин)	Погрешн ость %
0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	205	60	0.205	210	60	0.21	0.37
0.4	405	60	0.405	408	60	0.408	1.6
0.6	610	60	0.61	610	60	0.61	1.6
0.8	805	60	0.805	802	60	0.802	0.43
1	750	45	1	748	45	1	0
1.2	905	45	1.206	905	45	1.21	0.66
1.4	1055	45	1.406	1055	45	1.41	0.57
1.6	1210	45	1.613	1210	45	1.61	0.71
1.8	1370	45	1.83	1365	45	1.82	1.38
2	1500	45	2	1503	45	2	0

Таблица А.4 – Калибровка расходомера.

Из Таблицы А.4, когда показания расходометра составили 0,2 л/мин Замер (1)

Объем прошедшей воды составил 205 мл за 60 секунд

Таким образом, расход воды $\dot{V}_{m-1} = 0.205$ л/мин

Замер (2)

Объем прошедшей воды составил 210 мл за 60 секунд

Таким образом, расход воды $\dot{V}_{m-2} = 0.21$ л/мин

Средний $\dot{V}_m = rac{\dot{V}_{m-1} + \dot{V}_{m-2}}{2} = 0.2075$ л/мин

Погрешность % = $\frac{0.2075 - 0.2}{0.2}$ = 3.7 %





А. 1.5. Калибровка тахометра:

Для калибровки тахометра модели DT-2236В были проведены несколько замеров, а процентная погрешность представлена в Таблице А.5 ниже, как показано на Рисунке А.6.

		Замер (1)					
Показания тахометра (об/мин)	Оборот (об)	Время оборота (с)	Количество оборотов (об/мин)	Оборот (об)	Время оборота (с)	Количество оборотов (об/мин)	Погреш ность %
0.5	1	121	0.5	1	122	0.49	
1	1	60.8	0.99	1	61	0.98	
2	1	30.5	1.97	1	30.4	1.97	
4	1	15.3	3.92	1	15.4	3.90	
6	1	10.3	5.83	1	10.2	5.88	
8	1	7.6	7.89	1	7.6	7.89	
10	1	6.1	9.84	1	6	10	

Таблица А.5 – Калибровка тахометра

Из таблицы А.5, когда показания тахометра составляли 0.5 об/мин

Замер (1)

Оборот полого цилиндра = 1 оборот за 121 с

Таким образом, количество оборотов = 0.5 об/мин

Замер (2)

Оборот полого цилиндра = 1 оборот за 122 с

Таким образом, количество оборотов = 0.49 об/мин

Среднее количество оборотов $=\frac{K_{O,1}-K_{O,1}-K_{O,1}-K_{O,2}-K_{O,2}}{2}=0.495 \ of/muh$

Погрешность $\% = \frac{0.5 - 0.495}{0.495} \times 100 = 2.5 \%$



Рисунок А.6 – Калибровка тахометра

А.1.6. Калибровка электронных весов

Данное устройство модели 14192-722Е калибровано калибровочных грузов. Процентная средняя погрешность дана в Таблице А.6 и проиллюстрирована на Рисунке А.7.

Показания электронных весов (грамм)	Масса (грамм)	Погрешность
		%
0	0	0
10	10	0
50	50	0
100	100	0
150	150	0
200	200	0
250	250	0
500	500	0
1000	1000	0
1500	1500	0
2000	2000	0

Таблица А.6 – Электронные весы 14192-722Е.



Рисунок А.7 – Калибр

Приложение Б. Б.1. Анализ неопределенности

Во время любого экспериментального измерения истинное значение отличается от измеренного из-за неопределенности, сопровождающей сбор данных. Отклонение обычно невелико для определенной переменной, но, когда измеряемая переменная требуется для вычисления ряда производных параметров, ситуация усугубляется, и совокупная погрешность увеличивается.

Желательно оценить эту неопределенность для любого результата эксперимента W_R , являющегося функцией независимых переменных W_1 , W_2 , $W_3,..., W_n$ следующим образом: $W_R(W_1, W_2, W_3,..., W_n)$, таким образом, неопределенность при вычислении, **R**, определяется Холманом [99] следующим образом:

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_2} W_2 \right)^2 + \cdots \left(\frac{\partial R}{\partial X_n} W_n \right)^2 \right]^{0.5}$$
(Б-1)

При анализе модифицированного солнечного дистиллятора воды расчетным параметром обычно является полезная энергия, переданная от плоского солнечного коллектора воды к модификационному солнечному дистиллятору воды, как показано в формуле:

$$Q_u = \dot{m}_w \cdot C_P \Delta T \tag{B-2}$$

Таким образом, Q_u – это функция независимых переменных, $Q_u(\dot{m}_w, C_P, \Delta T)$, следовательно:

$$W_{Q_u} = \left[\left(\frac{\partial Q_u}{\partial \dot{m}_w} W_{\dot{m}_w} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_u}{\partial C_P} W_{C_P} \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_u}{\partial T} W_T \right)^2 \right]^{0.5}$$
(Б-3)

Теперь, в ходе вычисления этой неопределенности, желательно определить неопределенность каждой переменной на основе ее основных измеряемых значений, т. е. $\dot{m}_w(\rho, \dot{V}_w, T)$, и $C_P(T)$;

Таким образом, следует учитывать следующие заранее известные неопределенности.

$$W_{\dot{V}_{w}} = \pm 5.510^{-3} \text{ m}^{3}/\text{c}$$
(Б-4)

$$W_{C_P} = \pm 7.6210^{-3} \,\mathrm{кДж/кr \cdot K}$$
 (Б-5)

$$W_T = \pm 4.610^{-1} \text{K} \tag{B-6}$$

$$W_{\rho_w} = \pm 5.5610^{-4} \,\,\mathrm{kr/m^3} \tag{B-7}$$

$$W_{\dot{m}_W} = \pm 9.6210^{-3} \,\mathrm{\kappar/c} \tag{B-8}$$

В качестве примера рассмотрим полезную энергию, подводимую к модифицированной системе следующим образом:

 $Q_u = \dot{m}_w C_P \Delta T$

затем подставляем определенные экспериментальные данные следующим образом:

$$\frac{\partial Q_u}{\partial \dot{m}_w} = C_P \cdot \Delta T = 5.442 \text{ кBt/кг} \cdot \text{с}$$

 $\frac{\partial Q_u}{\partial C_P} = \dot{m}_w \cdot \Delta T = 0.027 \text{ кBt/кДж/кг} \cdot \text{K}$
 $\frac{\partial Q_u}{\partial T} = \dot{m}_w \cdot C_P = 0.091 \text{ кBt/K}$

Следовательно:

 $W_{Q_u} = [(5.4429.6210^{-3})^2 + (0.0277.6210^{-3})^2 + (0.0914.610^{-1})^2]^{0.5} =$

 $\pm 6.0510^{-3}$ кВт = ± 6.05 Вт

 $W_{Q_u} = \pm 2.02\%$

Приложение В. Рассчет теплофизических параметров

Теплофизические параметры, встречающиеся в расчетах, подробно перечислены в таблицах ниже.

Среда	Параметр	Формула	Единица из-	Ссылка
			мерения	
	Теплоемкость	$Cp_a = 1.06071 - 4.27 \times 10^{-4} \text{ T} + 9.506 \times 10^{-7} \text{T}^2 - 4.45 \times 10^{-10} \text{T}^3$	кДж∕кг∙К	[76]
Воздух	Теплопроводность	$K_a = 2.367 * 10^{-2} + 6.865 * 10^{-5} (T-273)$	Вт/м•К	[76]
	Динамическая вязкость	$\mu_a = 1.4963 * 10^{-6} [T^{1.5} / (T + 150)]$	кг/с•м	[76]
	Теплоемкость	$Cp_L = 2.8204 + 11.82*10^{-3} \text{ T} - 35*10^{-6} \text{ T}^2 + 36*10^{-9} \text{ T}^3$	кДж∕кг∙К	[76]
Вода	Динамическая вязкость	$P_L=0.1032 - 8.75*10^4 T + 2.494*10^{-6}T^2 - 2.3794*10^{-9}T^3$	кг/с•м	[76]
(жидкая)	Плотность	$\rho_L = 747 + 1.929 T - 3.6610^{-3} T T^2$	кг/м ³	[76]
	Теплота фазового перехода	$h_{fg} = 2501.9 - 2.40706T + 1.192217 * 10^{-3}T^2 - 1.5863 * 10^{-5}T^3$	кДж/кг	[73]
	Теплоемкость	$Cp_v = 1.8828 - 1.6736^{*}10^{-4} T + 8.438^{*}10^{-7} T^2 - 2.6964^{*}10^{-10} T^3$	кДж∕кг∙К	[76]
Вода	Теплопроводность	$K_v = 7.3346*10^{-3} - 1.0125*10^{-5} T + 1.8*10^{-7} T^2 - 9.1*10^{-11} T^3$	Вт/м•К	[76]
(пар)	Динамическая вязкость	μ_v =-3.19*10 $^{-6}$ + 4.145*10 $^{-8}$ T - 8.272*10 $^{-13}T^2$	кг∕с∙м	[76]
	Давление	Pv = exp [25.317-5144/T]	Па	[73]

Таблица В1-Формулы рассчета теплофизический свойств.

Приложение Г.

Список экспериментальных данных

КАРТА ДАННЫХ (19)

Традиционный солнечный дистиллятор (ТСД)

Местоположение: Екатеринбург, Россия			Глубина воды: 5 см						Дата: 19.06.2019			
Время, ч	Интенсивность солнечного излучения, Вт/м ²		Интенсивность солнечного излучения, Вт/м ²		<i>Т</i> _а , °С	<i>V</i> _a , м/с	T _{bp} ,℃	<i>T_{bw}</i> , °C	<i>T_{gi}</i> , ℃	<i>T_{go}</i> , °C	Среднечасовая производитель- ность дистилля- ции воды,	Совокупная про- изводительность дистилляции воды,
	I _H	I _T							мл/м ² · ч	мл/м ²		
8:00	520.88	547	17.1	0.4	17.9	16.9	18.47	17.67	0	0		
9:00	651.44	724	17.8	2.7	27.6	26.1	25	23.8	0	0		
10:00	720.10	854	18.9	2.2	36.6	34.4	27.1	25.1	15	15		
11:00	750.04	930	19.9	1.8	44.9	42.5	34.19	31.19	65	80		
12:00	765.25	940	21.2	3.1	49.63	47.2	38.2	36.2	120	200		
13:00	800.15	957	22.1	3.1	51.6	49.3	39.9	36.9	150	350		
14:00	715.46	810	22.9	1.8	52.2	50.1	40.5	37.1	160	510		
15:00	600.09	646	23.3	2.2	51.6	49.7	40.3	39.7	165	675		
16:00	482.22	466	23.7	5.8	49.4	48	39.4	34.3	170	845		
17:00	359.00	255	23.9	1.3	48.1	47	38.01	37.91	155	1000		
18:00	250.23	160	23.5	2.7	44.8	44.1	35.7	30	130	1130		
19:00	125.81	34	22.6	0.9	40.42	40.1	33.4	28.1	100	1230		
20:00	21.744	0	22.1	2.7	39	38.7	31.15	17.67	70	1300		

 I_{H} = Общее солнечное излучение на горизонтальной поверхности; I_T = Общее солнечное излучение на наклонной поверхности; T_{a} : Температура окружающего воздуха; $T_{g_{o}}$: Температура внешней поверхности крышки из оргстекла; $T_{g_{i}}$: Температура внутренней поверхности крышки из оргстекла; T_{bp} : Температура пластины емкости; T_{bw} : Температура воды в емкости.

КАРТА ДАННЫХ (20)

Модифицированный солнечный дистиллятор с вращающимся полым цилиндром и внешним солнечным коллектором воды (СДПЦСК)

Местоположение: Екатеринбург, Россия			Γ	лубина в	оды: 5 см		Скорость вращения полого цилиндра: 0,5 об/мин					Дата: 19	0.06.2019	
Время, ч	Интенс солне излуч Вт,	ивность чного чения, /м ²	<i>Т</i> _{<i>a</i>} , °С	<i>V_a,</i> м/с	<i>T_{bp}</i> ,℃	<i>T_{bw},</i> ℃	<i>T_{gi}</i> , °C	<i>T_{go}</i> , °C	<i>T_{hci},</i> ℃	<i>T_{hco}, ℃</i>	<i>T_{sci},</i> ℃	<i>T_{sco}</i> , °C	Среднечасо-вая произво-ди- тельность ди- стилляции воды,	Совокупная производитель- ность дистил- ляции воды, мл/м ²
	I _H	I_T											мл/м ² · ч	
8:00	520.88	547	17.1	0.4	18.1	17.1	18.5	17.6	19.07	19.06	17.1	19.84	0	0
9:00	651.44	724	17.8	2.7	30.2	28.7	25.6	24.3	33.08	33.08	28.7	32.50	5	5
10:00	720.10	854	18.9	2.2	39.9	38.5	29.8	27.7	42.34	42.33	38.5	43.37	45	50
11:00	750.04	930	19.9	1.8	51.8	50.1	36.1	33.3	53.62	53.61	45.1	55.44	255	305
12:00	765.25	940	21.2	3.1	56.7	55.4	40.7	37.7	59	58.99	52.5	60.90	420	725
13:00	800.15	957	22.1	3.1	57.5	56.4	42.7	39.5	60	60.49	55.6	61.71	520	1245
14:00	715.46	810	22.9	1.8	58.3	57.2	42.9	39.3	60.5	60.01	56.9	61.15	590	1835
15:00	600.09	646	23.3	2.2	56.5	55.4	42.4	40.6	58.16	58.15	55.4	58.36	620	2455
16:00	482.22	466	23.7	5.8	54.1	53.1	40.2	38.9	55.47	55.46	53.1	55.17	660	3115
17:00	359.00	255	23.9	1.3	51.2	50.4	38.7	37.9	52.59	52.58	50.4	51.36	630	3745
18:00	250.23	160	23.5	2.7	47.5	46.9	35.9	30	48.67	48.66	46.9	46.9	505	4250
19:00	125.81	34	22.6	0.9	43.52	43.2	33.6	27.6	44.06	44.05	43.2	42.9	400	4650
20:00	21.744	0	22.1	2.7	40.7	40.4	31.2	23.8	41.04	41.03	40.4	39.9	300	4950

 I_{H} = Общее солнечное излучение на горизонтальной поверхности; Iт = Общее солнечное излучение на наклонной поверхности; T_{a} : Температура окружающего воздуха; $T_{g_{o}}$: Температура внешней поверхности крышки из оргстекла; $T_{g_{i}}$: Температура внутренней поверхности крышки из оргстекла; T_{bp} : Температура пластины емкости; T_{bw} : Температура воды в емкости.; T_{hci} и T_{hco} : Температура внутренней и внешней поверхностей полого цилиндра; T_{sci} и T_{sco} : Температура воды на входе и выходе из плоского солнечного коллектора вод.

Приложение Д.

Примеры кода программы Fortran 90

Д.1. Производительность традиционного солнечного дистиллятора: рассчеты традиционного солнечного дистиллятора в FORTRAN 90 показаны на Рисунке ниже:



Рисунок Д.1 – Пример кода программы (Fortran 90) традиционного солнечного дистилля-

тора	(19/06/2019)).
------	--------------	----

🔀 Microsoft Developer Studio - [TEMP.DAT]		– 🗆 🗙
File Edit View Insert Build Tools Wind	low Help	_ 8 ×
Fortan PowerStation version 4.0 Getting Started with Fortan PowerStation MS Developer Studie User's Guide for Fortran Programmer's Guide Reference Samples Samples Fortan 30 (or Scientists and Engineers Copyright		
Heady	Ln 44, Col 62	I REU ICOL IOVR READ

Рисунок Д.2 – Изменение температур, результаты программы традиционного солнечного

дистиллятора (19/06/2019).

🔀 Microsoft Developer Studio - [CUM.DAT]				- 🗆 ×
File Edit View Insert Build Tools Windo	ow Help			_ & ×
🎦 🚅 🖬 🗿 🐰 🖻 💼 🖸 모델 오프 오프 💷	J) 🖵 🙀	12 94 4		
Entran PaularStation Journal A.0	8.0001390000	2461219.0000000000	.0309634500	
Calliar PowerStation Version 4.0	8.0002780000	2461217.0000000000	.0290064500	
Getting Started with Fortran PowerStation	8.00041/0000	2461215.0000000000	. U2/1230900	
MS Developer Studio User's Guide for Fortran	9 0006940000	2461213.00000000000	0255120000	
🗄 📎 Programmer's Guide	8 0008340000	2461208 0000000000	0219029700	
🛛 🕀 📎 Reference	8.0009720000	2461206.0000000000	.0203028700	
🖅 💎 Samples	8.0011110000	2461204.0000000000	.0187708900	
🕀 💎 Build Errors	8.0012500000	2461201.0000000000	.0173060900	
	8.0013890000	2461199.0000000000	.0159075700	
	8.0015280000	2461196.0000000000	. 0145742400	
🕀 💑 Convright	8.00166/0000	2461194.0000000000	. 0133051800	
- Copping	8 0019450000	2461189 0000000000	0109562900	
	8 0020840000	2461186 0000000000	0098747280	
	8.0022220000	2461183.0000000000	.0088538610	
	8.0023610000	2461181.0000000000	.0078929330	
	8.0025000000	2461178.0000000000	.0069912660	
	8.0026390000	2461175.0000000000	.0061479420	
	8.0027780000	2461172.0000000000	.0053521930	
	9 0020560000	24611/0.00000000000	0029601020	
	8 0031950000	2461164 0000000000	0033424170	
	8.0033330000	2461161.0000000000	.0027793190	
	8.0034720000	2461158.0000000000	.0022701630	
	8.0036120000	2461155.0000000000	.0018142070	
	8.0037500000	2461152.0000000000	.0014107820	
	8.0038890000	2461149.0000000000	.0010592380	
	8.00402/0000	2461146.0000000000	.0005091469	
	8.0041670000	2461143.00000000000	.0005071466	
	8 0044440000	2461137 00000000000	0001588524	
	8.0045830000	2461134.0000000000	.0000570933	
	8.0047230000	2461131.0000000000	.0000034558	
	8.0048610000	2461128.0000000000	0000026548	
	8.005000000	2461125.0000000000	.0000381939	
	8.0051390000	2461121.0000000000	.0001254216	
< >	8.0052780000	2461115 00000000000	.000/26848/5	
	8 0055550000	2461112 0000000000	0004388121	-
* Infoview				•
Ready				Ln 42, Col 64 REC COL OVR READ

Рисунок Д.3 – Среднечасовая производительность дистилляции воды и средняя теплота фазового перехода, результаты программы Fortran 90 для традиционного солнечного дистиллятора (19/06/2019).



Рисунок Д.4 – Среднечасовой термический КПД, результаты программы Fortran 90 для

традиционного солнечного дистиллятора (19/06/2019).



Рисунок Д.5 – Пример кода программы (Fortran 90) модифицированного солнечного ди-

стиллятора (19/06/2019).

									_
🎇 Microsoft Developer Studio - [TEMP_m.DAT]								– 🗆 🗙	1
File Edit View Insert Build Tools Wind	ow Help							- 5	×
🆀 🚅 🖬 🌒 🐰 陶 🛍 🖾 ୬ ୦ ୬ 💷	J)	- A	8 94 44	1					
		84							
Free Fortran PowerStation version 4.0	8.0000	24.7191	21.1340	20.6186	19.5000	23.3000 558.2836		1	
Getting Started with Fortran PowerStation	8 0278	26.6674	20.0075	20.7050	20 0069	17 1000 558 2836			
H MS Developer Studio User's Guide for Fortran	8.0417	26.7960	21.0288	20.8784	20.2266	17.1000 558.2836			
Programmer's Guide	8.0556	26.9125	21.1131	20.9627	20.4269	17.1000 558.2836			
	8.0694	27.0181	21.1975	21.0472	20.6096	17.1000 558.2836			
E Samples	8.0833	27.1139	21.2820	21.1317	20.7764	17.1000 558.2836			
Build Errors	8 1111	27 2803	21 4510	21 3008	21 0686	17 1000 558 2836			
Entran 90 for Scientists and Engineers	8.1250	27.3524	21.5355	21.3854	21.1965	17.1000 558.2836			
BeadMe	8.1389	27.4182	21.6200	21.4699	21.3136	17.1000 558.2836			
	8.1528	27.4782	21.7045	21.5545	21.4210	17.1000 558.2836			
E 😻 copyrigin	8.1667	27.5329	21.7890	21.6390	21.5195	17 1000 558.2836			
	8,1944	27.6287	21.9581	21,8081	21.6929	17,1000 558,2836			
	8.2083	27.6705	22.0426	21.8927	21.7691	17.1000 558.2836			
	8.2222	27.7088	22.1271	21.9772	21.8392	17.1000 558.2836			
	8.2361	27.7439	22.2116	22.0618	21.9037	17.1000 558.2836			
	8.2500	27.8056	22.2961	22.1463	21.9630	17 1000 558.2836			
	8,2778	27,8328	22.4651	22.3154	22.0680	17.1000 558.2836			
	8.2917	27.8578	22.5496	22.4000	22.1145	17.1000 558.2836			
	8.3056	27.8808	22.6341	22.4846	22.1575	17.1000 558.2836			
	8.3194	27.9021	22.7186	22.5690	22.1973	17.1000 558.2836			
	8.3333	27.9217	22.8030	22.6534	22.2342	17 1000 558.2836			
	8 3611	27 9570	22 9716	22 8221	22 3005	17 1000 558 2836			
	8.3750	27.9728	23.0559	22.9065	22.3304	17.1000 558.2836			
	8.3889	27.9876	23.1402	22.9908	22.3584	17.1000 558.2836			
	8.4028	28.0015	23.2245	23.0752	22.3848	17.1000 558.2836			
	8.416/	28.0146	23.3089	23.1595	22.4097	17.1000 558.2836			
	8 4444	28 0387	23 4773	23 3280	22.4552	17 1000 558 2836			
	8,4583	28,0500	23.5614	23.4121	22.4771	17.1000 558.2836			
	8.4722	28.0607	23.6455	23.4963	22.4977	17.1000 558.2836			
	8.4861	28.0711	23.7296	23.5804	22.5176	17.1000 558.2836			
	8.5000	28.0811	23.8137	23.6645	22.5369	17 1000 558.2836			
< >	8 5278	28 1004	23.9815	23.8324	22.5557	17 1000 558 2836			
2 InfoView	8 5417	28 1098	24 0655	23 9164	22 5921	17 1000 558 2836			-
•									
Ready							Ln 42, Col 72	IEC [COL OVR READ	1

Рисунок Д.6 – Изменение температур, результаты программы модифицированного солнечного дистиллятора (19/06/2019).

🔀 Microsoft Developer Studio - [CUM_m.DAT]				– 🗆 ×
File Edit View Insert Build Tools Wind	ow Help			_ <i>&</i> ×
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	J) 🔹 🙀	121 94 64 😨		
🖅 🐟 Fortran PowerStation version 4.0	8.0001390000	2453756.0000000000	.4711027000 5507219000	-
🕢 🕀 🛇 Getting Started with Fortran PowerStation	8.0004170000	2453751.0000000000	.6178524000	
MS Developer Studio Liser's Guide for Fortran	8,0005560000	2453749.0000000000	.6716946000	
Programmer's Guide	8.0006940000	2453746.0000000000	.7133012000	
Bafaranaa	8.0008340000	2453744.0000000000	.7445426000	
H Preference	8.0009720000	2453741.0000000000	.7674577000	
E Samples	8.0011110000	2453739.0000000000	.7839236000	
🗄 🕀 🚱 Build Errors	8.0012500000	2453736.0000000000	.7955144000	
😥 🕀 🗫 Fortran 90 for Scientists and Engineers	8.0013890000	2453734.0000000000	.8034834000	
🛨 🥎 ReadMe	8.0015280000	2453732.00000000000	.000/746000	
🖅 🔆 Copyright	8 0018050000	2453727 00000000000	81/1531000	
- •	8 0019450000	2453724 0000000000	8151273000	
	8.0020840000	2453722.0000000000	8153785000	
	8.0022220000	2453720.0000000000	8151157000	
	8.0023610000	2453718.0000000000	.8144830000	
	8.0025000000	2453715.0000000000	.8135875000	
	8.0026390000	2453713.0000000000	.8125062000	
	8.0027780000	2453711.0000000000	.8112937000	
	8.0029160000	2453708.0000000000	.8099866000	
	8.0030560000	2453706.0000000000	.8086144000	
	8.0031950000	2453704.0000000000	.80/1959000	
	0.0033330000	2453702.00000000000	.005/4/4000	
	0.0034720000	2453700.00000000000	0042770000	
	8 0037500000	2453695 0000000000	8013016000	
	8 0038890000	2453693 0000000000	7998052000	
	8.0040270000	2453691.0000000000	7983051000	
	8.0041670000	2453689.0000000000	.7968044000	
	8.0043060000	2453686.0000000000	.7953057000	
	8.0044440000	2453684.0000000000	.7938078000	
	8.0045830000	2453682.0000000000	.7923141000	
	8.0047230000	2453680.0000000000	.7908230000	
	8.0048610000	2453678.0000000000	.7893366000	
	8.0050000000	2453575.0000000000	./8/8541000	
	8.0051390000	24536/4.00000000000	./863/54000	
< >	8 0054170000	2453672.000000000	7834327000	
	8 0055550000	2453667 000000000	7819683000	•
3 111041644				•
Ready				Ln 44, Col 63 REC COL OVR READ

Рисунок Д.7 – Среднечасовая производительность дистилляции воды и средняя теплота фазового перехода, результаты программы Fortran 90 для модифицированного солнечного дистиллятора (19/06/2019).



Рисунок Д.8 – Среднечасовой термический КПД, результаты программы Fortran 90 для модифицированного солнечного дистиллятора (19/06/2019).