

Казахский национальный университет им. аль-Фараби

УДК 536.7

На правах рукописи

**БАИМБЕТОВ ДИНМУХАМБЕТ БАИМБЕТОВИЧ**

**Экспериментальные и численные исследования регенеративного  
солнечного опреснителя с тепловым насосом**

диссертация на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности  
6D060300 – Механика

Отечественный научный консультант:  
к.ф.-м.н, доцент Калтаев А.

Отечественный научный со-руководитель  
PhD, ассоциированный профессор  
Беляев Е.К.

Зарубежный научный консультант:  
PhD, профессор M.Mohanraj

Республика Казахстан Алматы, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ .....</b>	<b>3</b>
<b>ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ .....</b>	<b>4</b>
<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>7</b>
<b>ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ...</b>	<b>12</b>
<b>ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ .....</b>	<b>30</b>
2.1 Описание экспериментальной установки .....	30
2.2 Экспериментальный метод .....	39
<b>ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ .....</b>	<b>43</b>
3.1 Модель экономического анализа .....	50
3.2 Численная модель .....	52
3.3 Анализ экологического воздействия .....	56
<b>ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ .....</b>	<b>57</b>
4.1 Результаты для Каспийского региона .....	62
4.2 Анализ Продуктивности .....	70
4.3 Валидация Модели .....	78
4.4 Экономический Анализ .....	80
4.5 Анализ Качества Воды.....	81
<b>ГЛАВА 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>86</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>88</b>

## **НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ**

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:  
ГОСО РК 5.04.034-2011: государственный общеобязательный стандарт образования Республики Казахстан. Послевузовское образование. Докторантура. Основные положения (изменения от 23 августа 2012 г. №1080);

ГОСТ 7.32-2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления;

ГОСТ 7.1-2003. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.

## ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

- $\alpha$  - Коэффициент поглощения (Absorption Coefficient)  
 $a$  - Окружающий воздух (Ambient Air)  
 $AC$  - Годовая стоимость (Annual Cost)  
 $AMC$  - Ежегодная стоимость обслуживания, Annual Maintenance Cost  
 $ASV$  - Ежегодная ликвидационная стоимость, Annual Salvage Value  
 $i$  - Среднее, Average  
 $b$  - Бассейн, Basin  
 $CC$  - Капитальные затраты, Capital Cost  
 $CRF$  - Фактор восстановления капитала, Capital Recovery Factor  
 $CCE$  - Заработанные углеродные кредиты, Carbon Credit Earned  
 $COP$  - Коэффициент производительности (COP), Coefficient of Performance  
 $W$  - Мощность компрессора, Compressor Power, W  
 $con$  - Конденсатор, Condenser  
 $c$  - Конвекция, Convection  
 $CSS$  - Обыкновенный солнечный дистиллятор, Conventional Solar Still  
 $CPL$  - Цена за литр, Cost per Liter  
 $\rho$  - Плотность, Density, kg/m<sup>3</sup>  
 $d$  - Разрушение, Destruction  
 $D$  - Коэффициент диффузии Фазы, Diffusion Coefficient Phases, m/s<sup>2</sup>  
 $\varepsilon_{eff}$  - Эффективная излучательная способность, Effective Emissivity  
 $\eta$  - Эффективность, Efficiency  
 $E$  - Энергия, Energy, W  
 $q$  - Энтальпия, Enthalpy Flux, W/ m<sup>2</sup>  
 $eva$  - Испарение, Evaporation  
 $ep$  - Испаритель, Evaporator  
 $E_x$  - Эксергия, Exergy, W  
 $EXP$  - Экспериментально, Experimental  
 $FAC$  - Фиксированная годовая стоимость, Fixed Annual, Cost  
 $\mu$  - Вязкость, Fluid Viscosity, Ns/ m<sup>2</sup>  
 $ge$  - Полученная энергия, Gained Energy  
 $GOR$  - Коэффициент полученного выхода, Gained Output Ratio  
 $G$  - Газ, Gas  
 $GL$  - из газа в жидкость, Gas to Liquid  
 $g$  - Стекло, Glass  
 $gp$  - Графитовая пластина, Graphite Plate  
 $Gr$  - Число Грасхофа, Grashof Number  
 $gr$  - Гравитация, Gravity, m/s<sup>2</sup>  
 $Q$  - Тепловой перенос между компонентами, Heat Transfer between Phases, W/ m<sup>2</sup>  
 $h$  - Коэффициент теплопроводности, Heat Transfer Co-efficient, W/ m<sup>2</sup> . К  
 $m$  - Часовая производительность дистиллята, Hourly Distillate, kg  
 $I(t)$  - Солнечная энергия, Incident Solar Energy, W/ m<sup>2</sup>

- $\delta$  - Постепенный рост, Incremental Rise  
*in* - Вход (воплощение) Энергия, Input (embodiment) Energy  
*ins* - Изоляция, Insulation  
*L* - Латентное тепло испарения, Latent Heat of Evaporation, kJ/kg  
*L* - Жидкость, Liquid  
*LG* - из жидкости в газ, Liquid to Gas  
*R<sub>CO<sub>2</sub></sub>* - Market Price of CO<sub>2</sub> Mitigation  
*Y* - Массовая доля газовой фазы, Mass Fraction of Gas Phase  
*X* - Массовая доля жидкой фазы, Mass Fraction of Liquid Phase  
*N<sub>CO<sub>2</sub></sub>* - Net CO<sub>2</sub> Mitigation  
*N* - Количество дней, Number of Days  
*n* - Количество годов, Number of Years  
*Nu* - Число Нуссельта, Nusselt Number  
*out* - Выходная энергия Output Energy  
*o* - Общий, Overall  
*U* - Общий коэффициент теплопередачи, Overall Heat Transfer Co-efficient, W/m<sup>2</sup>.K  
*PBP* - Срок окупаемости (мес.), Payback Period (months)  
*PCM* - Phase Change Material  
 МФП – Материал фазового перехода  
*Pr* - Число Прандтля, Prandtl Number  
*P* - Давление Pressure, N/m<sup>2</sup>  
*r* - Радиация Radiation  
*S* - Скорость массопередачи, Rate of Mass Transfer, kg/m<sup>3</sup>.s  
*ref* - Хладагент, Refrigerant  
*S* - Ликвидационная стоимость, Salvage Value  
*SIM* - Моделирование, Simulation  
*SFF* - Фактор амортизационного фонда, Sinking Fund Factor  
*sky* - Окружающая среда, Sky  
*ss* - Солнечный опреснитель (дистиллятор), Solar Still  
*h* - Удельная энтальпия, Specific Enthalpy, J/kg  
*C<sub>p</sub>* - Удельная теплоемкость, Specific Heat, kJ/kg.K  
 $\sigma$  - Постоянная Стефана-Больцмана, Stefan Boltzman Constant ( $5.67 \times 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>)  
*st* - Сохраненная энергия, Stored Energy  
*s* - Солнце, Sun  
*A* - Площадь поверхности, Surface Area, m<sup>2</sup>  
*T* - Температура, Temperature, K  
*k* - Кондуктивная теплопроводность, Thermal Conductivity, W/m.K  
 $\beta$  - Коэффициент теплового расширения, Thermal Expansion Coefficient  
*x* - Толщина, Thickness, mm  
*t* - Общий, Total  
*wr* - Полная неопределенность, Total Uncertainty, %  
 $\tau$  - Коэффициент пропускания, Transmission Coefficient

*USD* - Доллар США, United States Dollar  
*r* - Объемная доля, безразмерная, Volume Fraction, Dimensionless  
*w* - Вода, Water  
*V* - Скорость ветра, Wind Velocity, m/s

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы исследования.**

Рост численности населения и индустриализация ведут к стремительному увеличению спроса на пресную воду. Однако в большинстве регионов мира доступная вода не может быть использована для питья из-за наличия различных загрязнителей. Вдобавок к этому, сточные воды, поступающие из бытового, промышленного и коммерческого секторов, требуют переработки и повторного использования. В современных условиях крайне необходимо разработать и внедрить такие методы очистки воды, которые бы соответствовали требованиям экологической безопасности и энергоэффективности для удовлетворения возрастающего спроса на пресную воду. В настоящее время наибольшее распространение получили два метода очистки воды: термический метод опреснения и мембранный метод опреснения. В рамках данного исследования предпринята попытка использования солнечной тепловой энергии для решения проблем, связанных с термическим методом опреснения.

По данным ООН о состоянии водных ресурсов мира, во всем мире 2 миллиарда человек (26% населения) не имеют доступа к безопасной питьевой воде, а 3,6 миллиарда человек (46%) не имеют доступа к безопасной санитарии.

Вопрос нехватки питьевой воды не прошел мимо регионов Казахстана. Южные, центральные и западные регионы испытывают дефицит питьевой воды. Где юго-западный регион (Мангистауская область) является единственным с выходом к Каспийскому морю и где можно применить методы опреснения морской воды. В регионе есть 2 основных источника питьевой воды, в которых используются методы термического и обратного осмоса.

В Мангистауской области действительно функционируют два основных источника питьевой воды, использующие различные методы опреснения:

1. **МАЭК Казатомпром:** Этот комплекс применяет термический метод опреснения, при котором морская вода нагревается до испарения, а затем конденсируется, превращаясь в пресную воду. Термическое опреснение позволяет получать значительные объемы питьевой воды, однако требует значительных энергетических затрат.
2. **Опреснительный завод "Каспий":** Здесь используется метод обратного осмоса, при котором морская вода проходит через полупроницаемые мембраны под высоким давлением, что позволяет удалить до 98-99% растворенных твердых веществ, микроорганизмов и химических соединений, делая воду чистой и безопасной для питья.

Оба метода имеют свои преимущества и недостатки. Термическое опреснение эффективно при больших объемах производства, но требует больше энергии. Обратный осмос более энергоэффективен, однако чувствителен к качеству исходной воды и требует регулярной замены мембран.

В регионе также реализуются проекты по увеличению мощностей опреснительных установок и строительству новых объектов для обеспечения населения качественной питьевой водой.

В этом регионе необходимо развитие автономных, мобильных установок с использованием возобновляемых источников энергии для отдаленных населенных пунктов и сельской местности, где нет доступа к центральным коммуникациям (электроэнергия, водоснабжение и т.д.).

Также в Мангистауской области имеется очень хороший потенциал солнечной энергетики. В связи с климатическими условиями региона эффективность теплового насоса по КПД очень высока. Направление данного проекта будет основано на создании экспериментальной установки солнечно-тепловой опреснительной системы на базе теплового насоса в условиях Мангистауской области Казахстана.

Использование солнечной энергии для термического опреснения привлекает внимание исследователей благодаря своей экологичности и доступности на протяжении всего года. Было проведено множество исследований, направленных на использование солнечных опреснителей и улучшение их эффективности с помощью солнечных воздухонагревателей и солнечных водонагревателей. Кроме того, фототермические коллекторы применялись для одновременного производства пресной воды и электричества. Для повышения эффективности солнечных опреснителей был интегрирован тепловой насос, который регенерирует скрытую теплоту, выделяемую во время конденсации водяного пара внутри солнечного опреснителя, для предварительного подогрева соленой воды перед ее поступлением в резервуар. Помимо этого, будет производиться горячая вода для бытового использования.

Энергия и вода являются двумя основными элементами, необходимыми для повседневной жизни. Опреснение соленой или солоноватой воды может быть осуществлено с помощью термического опреснения. Традиционно для этих целей использовалась тепловая энергия, получаемая при сжигании ископаемых видов топлива, таких как уголь, дизельное топливо, природный газ и сжиженный газ. Однако сжигание ископаемого топлива сопровождается выбросами вредных парниковых газов, таких как углекислый газ, оксид углерода и оксиды азота, что негативно сказывается на состоянии атмосферы. В последние годы для нужд отопления все чаще используются возобновляемые источники энергии, такие как солнечная, геотермальная энергия и биомасса. В Казахстане южные и западные регионы получают достаточное количество солнечной радиации, что делает возможным использование термических систем, работающих на солнечной энергии. В настоящее время системы солнечного термического опреснения, использующие солнечные опреснители, привлекают все большее внимание в связи с растущим спросом на пресную воду. Производство пресной воды с помощью солнечных опреснителей может быть увеличено за счет интеграции вспомогательного нагревательного оборудования, такого как солнечные воздухонагреватели, солнечные водонагреватели, тепловые насосы и т.д. Среди этих вариантов тепловой насос представляет собой энергосберегающее отопительное устройство, способное производить большее количество тепла за счет получения тепла во время конденсации водяного пара, образующегося внутри солнечного опреснителя. Однако количество тепла, выделяемого в конденсаторе, превышает количество тепла, полученного в испарителе. Таким

образом, избыточное тепло, выделяемое в конденсаторе, может быть использовано для предварительного подогрева соленой воды и для обеспечения бытовых нужд в горячей воде.

В рамках данного исследования была улучшена эффективность солнечных опреснителей за счет внедрения системы теплового насоса для нагрева воды. Повышение производительности солнечного опреснителя достигнуто за счет увеличения скорости испарения воды в бассейне. Энергетическая и эксергетическая эффективность солнечных опреснителей с различными конфигурациями была оценена на основе первого и второго законов термодинамики. Экономическая и экологическая целесообразность были проанализированы с помощью метода окупаемости и анализа воздействия на окружающую среду. Пробы воды, отобранные в ходе экспериментов, были оценены и сравнены с нормативами, установленными Министерством здравоохранения Республики Казахстан (Санитарно-эпидемиологические требования).

Термическое опреснение представляет собой процесс переработки сточных вод, промышленных выбросов и соленой воды путем их испарения с использованием тепловой энергии. На сегодняшний день существует множество исследований и разработок в области технологий термического опреснения. Особое внимание уделяется использованию возобновляемых источников энергии, таких как солнечная, геотермальная и энергия биомассы, для производства пресной воды. Однако использование солнечной энергии в солнечных опреснителях позволяет производить всего 2-5 литров воды на квадратный метр в день, что недостаточно для удовлетворения повседневных потребностей. Более 50% тепловой энергии, аккумулированной в солнечных опреснителях, а также тепловая энергия, выделяемая во время конденсации водяного пара внутри солнечных опреснителей, не используются эффективно. Важно эффективно использовать энергетические ресурсы. Применение теплоаккумулирующих материалов на внешней поверхности резервуара позволяет минимизировать потери тепловой энергии. Тепловые насосы интегрируются с солнечными опреснителями для эффективного восстановления и переработки тепла. В данной главе рассматриваются методы повышения производительности, связанные с использованием тепловых насосов, теплоаккумуляторов и вспомогательного оборудования.

**Цель работы.** Исследование интенсификации конденсации паров воды внутри солнечного дистиллятора путем интегрирования парокompрессионного теплового насоса.

**Задачи работы.**

- Сборка прототипа односкатного солнечного дистиллятора и теплового насоса, с дальнейшим их интегрированием;
- Сборка измерительных приборов, в том числе метеостанции и системы сбора данных;
- Разработка математической модели теплового баланса компонентов солнечного дистиллятора с тепловым насосом с учетом разных

конфигурации системы и создание компьютерной программы для расчета на языке Python;

- Обработка экспериментальных данных и валидация численной модели путем сравнения с полученными результатами.
- Анализ продуктивности чистой воды в климатических условиях города Актау.

**Объект и предмет исследования.** Разработка прототипа компактной опреснительной установки с использованием теплового насоса для производства питьевой воды в труднодоступных населенных пунктах Прикаспийского региона Казахстана, а также комплексное исследование её производительности в условиях данного региона.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

- экспериментальные и численные результаты анализа интенсификации конденсации паров воды путем интегрирования только испарителя теплового насоса в солнечный дистиллятор;
- численные результаты анализа интенсификации конденсации паров воды путем интегрирования как испарителя, так и конденсатора теплового насоса в солнечный дистиллятор.

**Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и результатов диссертационной работы.** Численные и экспериментальные методы исследования использовались для выполнения диссертационной работы. Экспериментальная часть была проведена на разработанной технологии, примененной в прототипе солнечно-тепловой системы. Математическая модель исследуемых процессов была построена на основе фундаментальных законов термодинамики и тепломассопереноса. Эти модели применялись для моделирования и исследования эффективных режимов работы теплонасосной опреснительной установки. Были использованы лицензированные программные продукты: EES, TRNSYS 18.0 и MATLAB. Для проведения экспериментов применялись современные сертифицированные измерительные приборы. Достоверность полученных результатов была обеспечена корректностью постановок рассматриваемых задач, использованием обоснованных методов решений, качественным анализом всех этапов исследования, сравнением численных результатов с полученными экспериментальными данными (как собственными, так и других авторов), а также применением надежных методик и средств измерений. Теоретические и численные исследования базировались на известных научных положениях и представлениях, разработке физических моделей и дополняли друг друга. Аналогично использовались надежные экспериментальные методы и измерительные устройства.

**Теоретическая и практическая значимость исследования** заключается в повышении доступности питьевой воды в сельских регионах, что приведет к улучшению условий жизни и качественного водоснабжения, непосредственно влияя на улучшение питания и здоровья населения. Исследование способствует внедрению научно-технических решений для обеспечения качественной питьевой водой, что окажет положительное воздействие на местные сообщества. Важно отметить, что это также стимулирует интерес молодежи к науке и

технологии. В 2015 году в Казахстане был принят указ №322, направленный на поддержку децентрализованного водоснабжения. Данное исследование ориентировано на восстановление ресурсов и повышение устойчивости инфраструктуры, что делает его актуальным для государственных органов различного уровня (центральных, местных и международных), которые нацелены на улучшение инфраструктурной доступности (энергии и водоснабжения) и поддержку устойчивого развития местных сообществ.

**Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами.** Данная работа выполнена в рамках следующих проектов:

- «Моделирование и разработка системы солнечного теплового насоса для опреснения морской воды в условиях Юго-Западного региона Казахстана» (2023-2025гг., AP19175769)

- «Разработка солнечного теплового опреснителя на основе теплового насоса» (2022-2024 гг., AP14871988).

**Апробация работы.**

Основные результаты работы докладывались:

- В 3-й конференции журнала "Journal of Thermal Analysis and Calorimetry" и 9-й совместной конференции V4 Чехии-Венгрии-Польши-Словакии по Тепловому анализу в городе Балатонфюред, Венгрия, 20-23 июня 2023 года.

- В 19-й конференции по устойчивому развитию энергетических, водных и экологических систем (SDEWES) в городе Рим, Италия, 8-12 сентября 2024 года.

**Публикации.** По материалам диссертационной работы опубликовано 3 статей, из них 2 публикации в зарубежных научных журналах, индексируемых в базе данных Scopus и Web of Science, 1 статья в журнале входящих в перечень рекомендованных КОКНВО МНВО РК.

**Личный вклад автора.** Основные результаты исследований, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из содержания, обозначений и сокращений, введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников. Работа изложена на 92 страницах, содержит 63 иллюстрации, 5 таблиц.

**Благодарность.** Автор выражает благодарность отечественному научному консультанту к.ф.-м.н., профессору Калтаеву Айдархану Жусипбековичу за научное руководство, неоценимую помощь и научному со-руководителю PhD, ассоциированному профессору Беляеву Ержану Келесовичу за научную поддержку на всех этапах выполнения диссертационной работы и зарубежному научному консультанту PhD, профессору Моханрадж Муругесан за поддержку и плодотворную работу.

## ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Солнечные опреснители представляют собой пассивные устройства, используемые для получения питьевой воды из соленой или сточной воды с использованием солнечной энергии. Принцип их работы заключается в том, что солнечная энергия используется для испарения воды, после чего водяной пар конденсируется на нижней поверхности стекла, образуя пресную воду. На рисунке 1 представлена схема работы солнечного опреснителя.

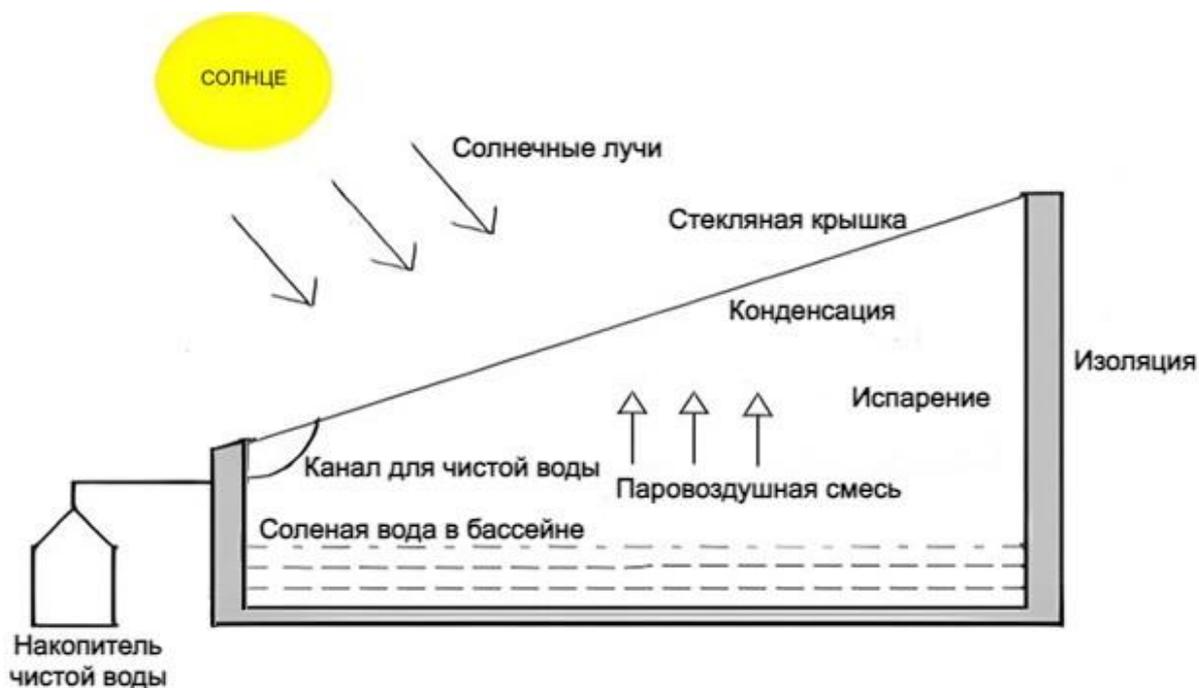


Рисунок 1 – Традиционный солнечный дистиллятор [1]

Солнечные опреснители представляют собой пассивные устройства, предназначенные для производства пресной воды из сточных или соленых вод. Соленая или сточная вода в резервуаре испаряется за счет поглощения солнечной энергии. Водяной пар, образующийся внутри солнечного опреснителя, конденсируется на нижней поверхности стекла и затем собирается. Для повышения абсорбционной способности в солнечном опреснителе применяются такие методы, как создание ребер, использование теплоаккумуляторов (как чувствительных, так и скрытых), а также интеграция с дополнительными нагревательными устройствами, такими как солнечные водонагреватели, солнечные воздухонагреватели, водонагреватели на биомассе, тепловые насосы и другие. Подробная классификация солнечных опреснителей представлена на рисунке 2.



Рисунок 2 – Классификация солнечных опреснителей [2]

Сравнительное исследование односкатного и двускатного пассивных солнечных опреснителей в климатических условиях Нью-Дели проведены в работе [3]. Производительность пресной воды была экспериментально подтверждена с использованием трех тепловых моделей: (i) модель Данкла, (ii) модель Кумара и Тивари и (iii) модель Чена. Согласно их результатам, модель Данкла показала наибольшую эффективность, с производительностью пресной воды для односкатного и двускатного солнечных опреснителей, составивших 500 л/м<sup>2</sup> и 465 л/м<sup>2</sup> соответственно [3].

Исследования производительности пассивного солнечного опреснителя с мелким бассейном. В ходе исследования было изучено влияние коэффициента поглощения и угла наклона стеклянного покрытия на работу пассивного солнечного опреснителя. Согласно их результатам, энергетическая и эксергетическая эффективность снизилась до 21,8% и 36,7% соответственно из-за низкого коэффициента поглощения стеклянного покрытия. Кроме того, энергетическая и эксергетическая эффективность пассивного солнечного опреснителя уменьшилась на 0,8% и 0,5% соответственно при увеличении угла наклона стеклянного покрытия. В то же время, повышение скорости ветра до 2 м/с способствовало увеличению энергетической эффективности пассивного солнечного опреснителя [4].

Численное исследование производительности односкатного солнечного опреснителя в условиях летнего и зимнего климата города Коимбатур. Производительность пресной воды оказалась зависимой от температуры воды в бассейне, угла наклона и угла наклона стеклянного покрытия. Согласно их результатам, угол наклона стекла в 11° повысил общую эффективность солнечного опреснителя на 40,6% в летний период и на 36,3% в зимний по сравнению с другими углами наклона [5].

Энергетическую и эксергетическую эффективность каскадного

солнечного опреснителя изучили в работе [6]. Схематическая диаграмма экспериментальной установки, использованной в их работе, представлена на рисунке 3. Согласно их результатам, было зафиксировано увеличение энергетической и эксергетической эффективности на 83,3% и 10,5% соответственно. Эксергетический анализ подтвердил, что наибольшее влияние на эффективность опреснителя оказала абсорберная пластина, доля которой составила 84,2%.



Рисунок 3 – Схематический обзор каскадного солнечного опреснителя [3]

Исследования производительности простого солнечного опреснителя в условиях летнего климата показали, что интеграция солнечного плоского коллектора с простым солнечным опреснителем привела к улучшению энергетической эффективности на 62% и увеличению производства пресной воды до 6 л/м<sup>2</sup>/день. Кроме того, эксергетическая эффективность повысилась на 8,5% по сравнению с традиционными солнечными опреснителями [7].

Производительность каскадного солнечного опреснителя в климатических условиях Ирана количество пресной воды увеличилась до 6,7 литров/день/м<sup>2</sup>, что на 26% выше по сравнению с традиционным солнечным опреснителем [8].

Сравнительные исследования проводились для активных и пассивных солнечных опреснителей с двумя различными конфигурациями: (i) односкатная и (ii) двускатная, с интеграцией и без интеграции с параболическим коллектором. Анализ производительности солнечных опреснителей был проведен в условиях летнего и зимнего климата Египта. Было установлено, что двускатный солнечный опреснитель с параболическим коллектором на 6% улучшил производство пресной воды по сравнению с односкатным солнечным опреснителем с тем же коллектором. Энергетическая эффективность системы увеличилась на 3,3% в летний и на 2,6% в зимний период по сравнению с односкатным опреснителем с параболическим коллектором [9].

Исследования энергетической и эксергетической эффективности солнечных опреснителей с тремя различными конфигурациями: (i) простой

солнечный опреснитель, (ii) опреснитель с пустотелыми цилиндрическими ребрами и (iii) опреснитель со стальными сетчатыми волокнами при одинаковых метеорологических условиях. Их результаты показали, что ежедневное производство пресной воды увеличилось на 16% и 25% во втором и третьем случаях по сравнению с первой конфигурацией. Энергетическая эффективность трех конфигураций составила 42%, 45,5% и 52,5% соответственно [10].

При экспериментальном исследовании производительности солнечного опреснителя в климатических условиях города Коимбатур производительность солнечного опреснителя была улучшена на 32% за счет использования гравия в качестве материала для накопления чувствительной тепловой энергии. Энергетическая эффективность повысилась до 4,7%. Производство пресной воды составило 4,2 кг/м<sup>2</sup>. Стоимость дистиллята составила 0,0618 USD/л, а срок окупаемости – 4,3 месяца [11].

При оценке производительности солнечного опреснителя, интегрированного с вакуумным плоским коллектором, в климатических условиях Нью-Дели, Индия, было установлено, что ежедневное производство пресной воды увеличилось на 175% по сравнению с простым солнечным опреснителем. Ежедневная энергетическая и эксергетическая эффективность увеличились до 45,9% и 8,2% соответственно для системы с двумя стеклянными покрытиями. Схема экспериментальной установки, использованной в их работе, представлена на рисунке 4 [12].

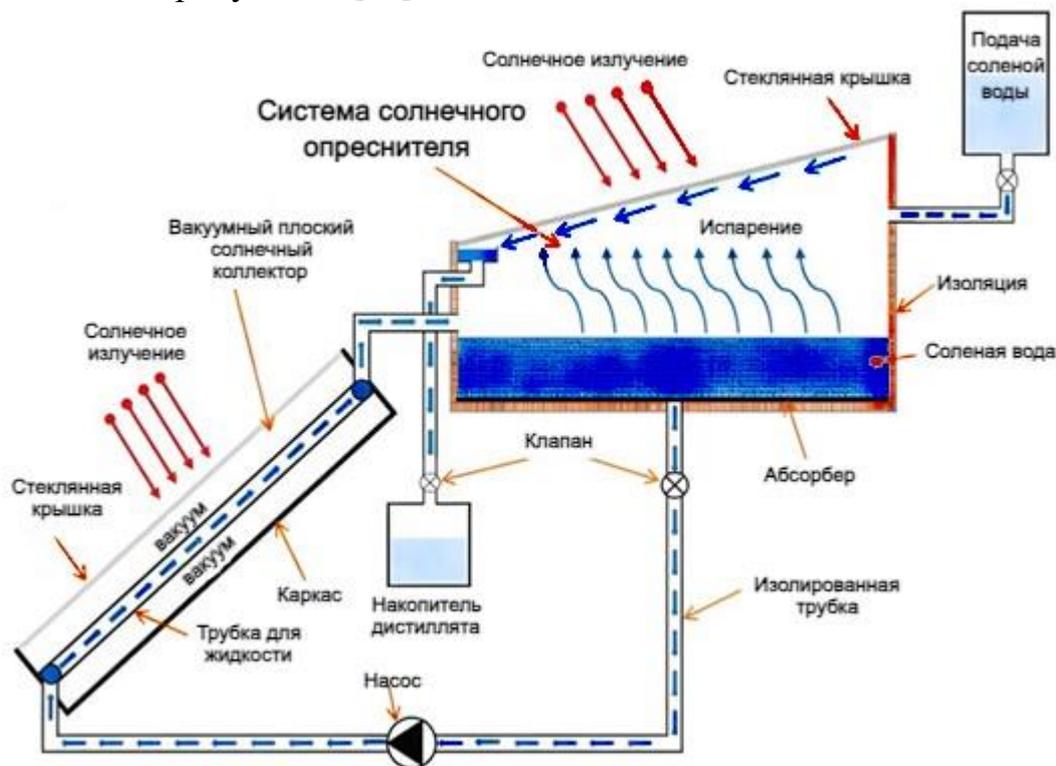


Рисунок 4 – Схематический вид активного солнечного опреснителя с вакуумным плоским коллектором [12]

Энергетическую эффективность и производство пресной воды простого солнечного опреснителя в условиях климата Малайзии, согласно результатам работы [13], 36-ваттная термоэлектрическая система охлаждения увеличила скорость производства пресной воды и энергетическую эффективность на 126% и 44% соответственно по сравнению с простым солнечным опреснителем. Кроме того, частично покрытое стекло солнечного опреснителя показало минимальное время окупаемости энергии в 6,6 лет и максимальный коэффициент производства энергии в 0,15.

Исследования простого солнечного опреснителя, учитывая эксергетические потери различных компонентов, таких как соленая вода, стеклянные покрытия и плоские коллекторы, показали улучшение эксергетической эффективности соленой воды, стеклянного покрытия и плоского коллектора солнечного опреснителя на 6%, 12,9% и 5% соответственно. Кроме того, было установлено, что плоский коллектор оказывает минимальное влияние на общую термодинамическую эффективность солнечного опреснителя [14].

Производительность двускатного солнечного опреснителя для увеличения производства пресной воды в условиях летнего климата была проанализирована, и результаты показали, что ежедневное производство пресной воды увеличилось на 29,7% при использовании модели Данкла, а эксергетическая эффективность возросла на 8,5% по сравнению с простым солнечным опреснителем [15].

Предложена новая гибридная система для концентрированного рассола, работающая на низкотемпературных источниках тепла. Результаты показали, что эксергетическая эффективность гибридной системы увеличилась до 40% при концентрации соли 35 г/кг с использованием источника тепла низкой температуры при 150 °С по сравнению с традиционными солнечными опреснителями [16].

Производительность двускатного солнечного опреснителя была исследована в климатических условиях города Нойда. Результаты показали, что энергетическая эффективность варьировалась от 13,5% до 31%. Аналогично, эксергетическая эффективность увеличилась с 0,3% до 1,4% [17].

Изучена производительность односкатного пассивного солнечного опреснителя в условиях Индии. Установлено, что производство пресной воды увеличилось до 4,2 л/м<sup>2</sup>, а энергетическая эффективность улучшилась до 30,4%. Эксергетическая эффективность пассивного солнечного опреснителя оказалась на 23,2% выше, чем у традиционного солнечного опреснителя [18].

Производительность пассивного солнечного опреснителя с использованием системы аккумуляирования тепла в бассейне была исследована в климатических условиях города Эр-Рашидия. Улучшение производительности системы было достигнуто за счет накопления тепла, что позволило снизить потери энергии из бассейна солнечного опреснителя и значительно уменьшить потери тепла в окружающую среду. Мгновенная эксергетическая эффективность системы составила менее 5% в утренние часы и увеличилась до 80% после захода солнца [19].

Производительность солнечного опреснителя, интегрированного с плоским коллектором, была оценена в замкнутом цикле. Результаты показали, что энергетическая эффективность увеличилась до 48,1%, а эксергетическая эффективность возросла до 2,8% при оптимальной скорости потока по сравнению с традиционным солнечным опреснителем [20].

Сравнительное исследование двух каскадных солнечных опреснителей типа "водослив" в условиях жарких и полу облачных дней показало, что производительность опреснителя была улучшена за счет использования материалов с фазовым переходом в бассейне опреснителя. Эксергетическая эффективность двух каскадных систем типа "водослив" увеличилась до 76,7% и 6,6% в солнечные и полу облачные дни соответственно по сравнению с традиционным солнечным опреснителем [21].

Производительность солнечного опреснителя с использованием регенеративного материала из хлопка была исследована в условиях жаркого и влажного климата в Индии. Установлено, что производство пресной воды, а также энергетическая и эксергетическая эффективность солнечного опреснителя увеличились на 24,1%, 23,8% и 2,6% соответственно по сравнению с традиционным солнечным опреснителем [22].

Производительность новой гибридной системы опреснения была изучена в климатических условиях города Ланьчжоу. Результаты показали улучшение производительности гибридной системы до 11,7% в летний период и до 10,6% в зимний период по сравнению с традиционным солнечным опреснителем [23].

Экономическая эффективность и экологические преимущества солнечных опреснителей оцениваются с использованием методов экономического анализа и анализа воздействия на окружающую среду. В данном разделе рассматриваются выбранные исследования.

Системы солнечного опреснения с увлажнением и осушением производят дистиллят в количестве 1117 г/ч, а энергетическая и эксергетическая эффективность системы улучшились до 31,6% и 1,9% соответственно по сравнению с традиционной системой опреснения. Стоимость дистиллята для предложенной системы была оценена в 0,0981 USD/л [24].

Эти результаты показывают, что предложенная система может быть экономически выгодной и экологически устойчивой альтернативой традиционным методам опреснения, особенно в условиях ограниченного доступа к пресной воде. Снижение стоимости производства дистиллята и повышение эффективности использования энергии делают эту систему привлекательной с точки зрения долгосрочных экономических и экологических преимуществ.

Существуют солнечные опреснительные установки с наклонной конструкцией типа фитильного и ступенчатого бассейна. Производительность пресной воды для опреснителя с наклонным бассейном и фитильного типа составила 5 литров/день и 4,5 литра/день соответственно в климатических условиях города Ченнаи, Индия. Сообщается, что производительность пресной воды в наклонном солнечном опреснителе с бассейном увеличилась на 19,8% по сравнению с фитильным типом. Выбросы углекислого газа были оценены в 17,7

тонн за 20 лет эксплуатации, а стоимость дистиллята составила 0,026 USD/л для бассейна и 0,046 USD/л для фитильного типа [25].

Сравнительное исследование солнечных опреснителей, работающих в трех различных конфигурациях: (i) частично покрытые фототермические плоские коллекторы, (ii) полностью покрытые фототермические плоские коллекторы и (iii) традиционные плоские коллекторы, показало, что минимальная стоимость производства пресной воды была зафиксирована для конфигураций (i) и (iii) и составила 0,0027 USD/кг и 0,0068 USD/кг при 2% ставке процента [26].

Производительность солнечного опреснителя с двойным бассейном на основе мультифитиля была оценена, а также проведен анализ воздействия на окружающую среду в климатических условиях штата Уттар-Прадеш. Сообщается, что выбросы CO<sub>2</sub> на основе энергии из джутовой и хлопковой одежды составили 7,82 и 8,69 тонн соответственно, а выбросы CO<sub>2</sub> на основе эксергии составили 0,16 и 0,19 за 365 дней работы [27].

Производительность простого солнечного опреснителя, интегрированного с фотоэлектрической панелью, была исследована в четырех конфигурациях: (i) традиционный солнечный опреснитель, (ii) солнечный опреснитель с фотоэлектрической панелью, (iii) солнечный опреснитель с фотоэлектрической панелью и теплоаккумулятором в бассейне, и (iv) солнечный опреснитель с фотоэлектрическим отражателем. Экспериментальные наблюдения проводились в климатических условиях Египта. Результаты показали, что для конфигурации (iv) улучшение энергетической и эксергетической эффективности составило 43,6% и 680,7% соответственно по сравнению с простым солнечным опреснителем. Годовые выбросы углекислого газа для конфигурации (iv) составили 27,4 тонны по сравнению с другими конфигурациями [28].

Производительность каскадного солнечного опреснителя была исследована с использованием парафинового воска в качестве материала с фазовым переходом и фенольной пены и стекловолокна в качестве теплоизоляционных материалов, что способствовало повышению производительности пресной воды. Результаты показали, что производительность пресной воды при использовании парафинового воска с фенольной пеной увеличилась до 1848 кг/год по сравнению с парафиновым воском со стекловолокном. Кроме того, выбросы CO<sub>2</sub> были снижены до 0,139 тонн в год по сравнению с использованием материала с фазовым переходом со стекловолокном [29].

Экспериментально исследована производительность солнечного опреснителя, интегрированного с параболическим коллектором, в климатических условиях Египта. Сообщается, что производство пресной воды в летний период увеличилось на 1,2% для традиционного солнечного опреснителя с песчаным слоем, интегрированного с параболическим коллектором [30].

Было проведено множество численных исследований и разработок, направленных на повышение тепловой эффективности солнечных опреснителей.

Численное исследование производительности ступенчатого солнечного опреснителя с использованием парафинового воска в качестве материала для

хранения скрытой тепловой энергии было проведено. Переходная производительность модифицированного опреснителя была сравнена с традиционным солнечным опреснителем в климатических условиях Саудовской Аравии. Установлено, что производство пресной воды увеличилось до  $4,6 \text{ л/м}^2$ , а энергетическая эффективность повысилась до 57% по сравнению с традиционным солнечным опреснителем без использования материалов для хранения скрытой тепловой энергии [31].

Численное исследование производительности солнечного опреснителя показало, что скорость и температура снизились из-за изменения расстояния между вертикальными пластинами. Концентрация воздушного потока улучшилась в часы пикового солнечного освещения [32].

Производительность односкатного солнечного опреснителя была исследована с помощью компьютерного моделирования, используя стеариновую кислоту в качестве материала с фазовым переходом в климатических условиях Джидды, Саудовская Аравия. Установлено, что производство пресной воды для простого солнечного опреснителя без материала с фазовым переходом составило  $5,0 \text{ кг/м}^2/\text{день}$ , в то время как для модифицированного солнечного опреснителя оно увеличилось до  $9,0 \text{ кг/м}^2/\text{день}$ , при этом эффективность возросла до 85,3% [33].

Модель объема жидкости была разработана для оценки производительности односкатного солнечного опреснителя с использованием наножидкости на основе  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в климатических условиях Ирана. Результаты показали, что производство пресной воды увеличилось на 25% при увеличении объема твердых частиц до 5%. Повышение объема твердых частиц также привело к увеличению объема и тепловой энтропии до 95% и 25% соответственно [34].

Исследования производительности каскадного солнечного опреснителя с использованием наножидкости для повышения производства пресной воды показали улучшение производства пресной воды на 22% при изменении концентрации наножидкости от 0% до 5%. Экспериментальные наблюдения и численные результаты продемонстрировали отклонение результатов примерно на 2,1% [35].

Сравнительное исследование солнечных опреснителей с использованием микрочастиц оксида меди и графита показало, что наночастицы, добавленные в соленую воду для улучшения теплообмена, привели к улучшению производства пресной воды и энергетической эффективности на 41,18% и 4,32% соответственно для солнечного опреснителя с графитовым порошком по сравнению с концентрацией оксида меди [36].

Исследование производительности солнечного опреснителя в трех конфигурациях: (i) простой солнечный опреснитель, (ii) солнечный опреснитель с наноструктурированной пластиной из оксида меди, (iii) солнечный опреснитель с губками из поливинилового спирта и (iv) солнечный опреснитель с пластиной, покрытой оксидом меди, и губками из поливинилового спирта, показало, что производство пресной воды и эффективность конфигурации (ii)

были улучшены до 2995 мл/м<sup>2</sup>/день, что на 53% выше, чем у других конфигураций [37].

Изучение производительности пирамидального солнечного опреснителя в климатических условиях Египта показало, что поверхность пластины поглотителя, покрытая наночастицами TiO<sub>2</sub> и черной краской, улучшила производство пресной воды до 6,6 кг/м<sup>2</sup>/день при поддержании глубины соленой воды на уровне 1 см. Производство пресной воды увеличилось на 6,1% по сравнению с простым пирамидальным солнечным опреснителем [38].

В дальнейшем [39] было исследовано производство солнечного опреснителя с гибридными накопителями тепла. Концентрация парафинового воска и графита варьировалась от 0% до 20%. Результаты показали, что производство пресной воды и эффективность достигли 8,5 л/м<sup>2</sup>/день и 65,2% соответственно при концентрации гибридного материала в 20%. Производство пресной воды увеличилось на 94,6% по сравнению с простым солнечным опреснителем.

Термодинамическая производительность солнечных опреснителей значительно улучшается при добавлении теплоаккумулирующих материалов. Теплообменные ребра, песок и гравий являются примерами материалов, аккумулирующих чувствительное тепло, тогда как джутовая ткань и хлопчатобумажная ткань используются в солнечных опреснителях в качестве регенеративных сред. Парафиновый воск является наиболее часто используемым материалом для накопления скрытой тепловой энергии. В этом разделе приводится обзор выбранных исследований, опубликованных в открытой литературе.

Материалы, аккумулирующие чувствительное тепло, используются для накопления тепла за счет повышения их температуры, а не изменения их физического состояния (например, плавления или кипения). В солнечных опреснителях эти материалы используются для улучшения производительности за счет увеличения теплоемкости и обеспечения эффективного использования тепловой энергии для испарения воды. Теплообменные ребра, песок и гравий являются примерами материалов для накопления чувствительного тепла.

Рёбристые теплообменники обычно используются для улучшения теплообмена в солнечных опреснителях путем увеличения площади поверхности для теплообмена. Песок широко используется в качестве материала для накопления тепла из-за его высокой тепловой массы и доступности. Более мелкие песчинки обладают более высоким соотношением поверхности к объему и могут более эффективно передавать тепло, тогда как более крупные частицы песка имеют большую тепловую массу и могут накапливать больше тепловой энергии. Гравий может поглощать и накапливать тепловую энергию, что способствует улучшению производительности опреснителя.

Экспериментальное исследование производительности солнечного опреснителя с использованием материалов, аккумулирующих чувствительное тепло, показало, что использование черного гравия размером 20-30 мм в бассейне увеличило производство пресной воды до 19 л/м<sup>2</sup> в климатических

условиях Египта. Черная резина оказалась менее эффективной по сравнению с черным гравием [40].

Оценка производительности солнечного опреснителя с использованием черного базальтового камня в качестве теплоаккумулирующего материала показала, что камень размером 2 см увеличил производство пресной воды до 1,1 л/м<sup>2</sup>, что на 33,4% выше по сравнению с другими размерами камней, использованными в опреснителе. Энергетическая эффективность повысилась до 32,1%, а стоимость дистиллята составила 0,020 USD/л. Экспериментальные наблюдения проводились в климатических условиях Египта [41].

Сравнительное исследование односкатного солнечного опреснителя и модифицированного солнечного опреснителя в климатических условиях города Рагхогарха показало, что использование мешков, заполненных песком, в модифицированном опреснителе увеличило производство пресной воды на 28,6% и 31% при весе песка 30 кг и 40 кг соответственно. Энергетическая эффективность улучшилась на 31,3% и 29% по сравнению с традиционным солнечным опреснителем [42].

Сравнительное исследование простого солнечного опреснителя в двух различных конфигурациях (с внутренним отражателем и с черным гравием) показало, что использование черного гравия увеличило производство пресной воды до 3,3 л/м<sup>2</sup>/день, что на 37,6% больше по сравнению с опреснителем с внутренним отражателем. Энергетическая и эксергетическая эффективность солнечного опреснителя с черным гравием составили 38% и 37% соответственно [43]. В дальнейшем [44] изучение производительности солнечного опреснителя с использованием цементированных красных кирпичей в бассейне показало, что при массе воды в бассейне 20 кг производство пресной воды увеличилось до 5,6 кг/м<sup>2</sup>/день. Солнечный опреснитель с цементированными красными кирпичами повысил производство воды на 45% по сравнению с простым солнечным опреснителем.

Исследование производительности солнечного опреснителя квадратной пирамидальной формы показало, что метод принудительного испарения улучшил производство пресной воды до 2254 мл/м<sup>2</sup>, что на 61,5% выше по сравнению с двумя другими методами (материалами для накопления тепловой энергии и принудительной конвекцией). Кроме того, энергетическая эффективность повысилась до 27,1%, что на 61,6% выше, чем у других методов [45].

Производительность солнечного опреснителя была исследована в климатических условиях Рева, Мадхья-Прадеш. Экспериментальная установка использовала джутовую ткань в качестве инертного пористого поглотителя, которая плавала в бассейне с водой с помощью термокольной изоляции. Результаты показали, что производство пресной воды увеличилось на 68% в часы пикового солнечного освещения и на 35% в облачные дни. Кроме того, производство пресной воды возросло на 79% при интеграции солнечного опреснителя с системой двойного отражателя [46].

Использование квадратных ребер в бассейне солнечного опреснителя увеличило дневное производство пресной воды на 4,6 кг/м<sup>2</sup> по сравнению с

круглыми ребрами. Было установлено, что солнечный опреснитель с квадратными ребрами увеличил дневное производство пресной воды на 45,8% по сравнению с опреснителем с круглыми ребрами. Более того, экономический анализ показал, что снижение стоимости литра дистиллята составило 0,024 USD/кг для 350 рабочих дней и 30-летнего срока службы солнечного опреснителя с квадратными ребрами [47].

Исследование производительности солнечного опреснителя с различными материалами для накопления чувствительной энергии показало, что использование черных шаров, черного гранита и мрамора улучшило энергетическую эффективность на 72,6% и увеличило производство пресной воды на 44% по сравнению с традиционным солнечным опреснителем [48].

Материалы для накопления скрытой тепловой энергии сохраняют тепло во время фазового перехода. Эти материалы способны накапливать больше тепла, чем материалы для накопления чувствительного тепла. Материалы для накопления скрытой тепловой энергии позволяют поддерживать температуру воды в бассейне дольше по сравнению с материалами для накопления чувствительного тепла. Парафиновый воск является наиболее часто используемым материалом для накопления скрытой тепловой энергии в солнечных опреснителях благодаря своим хорошим термодинамическим свойствам.

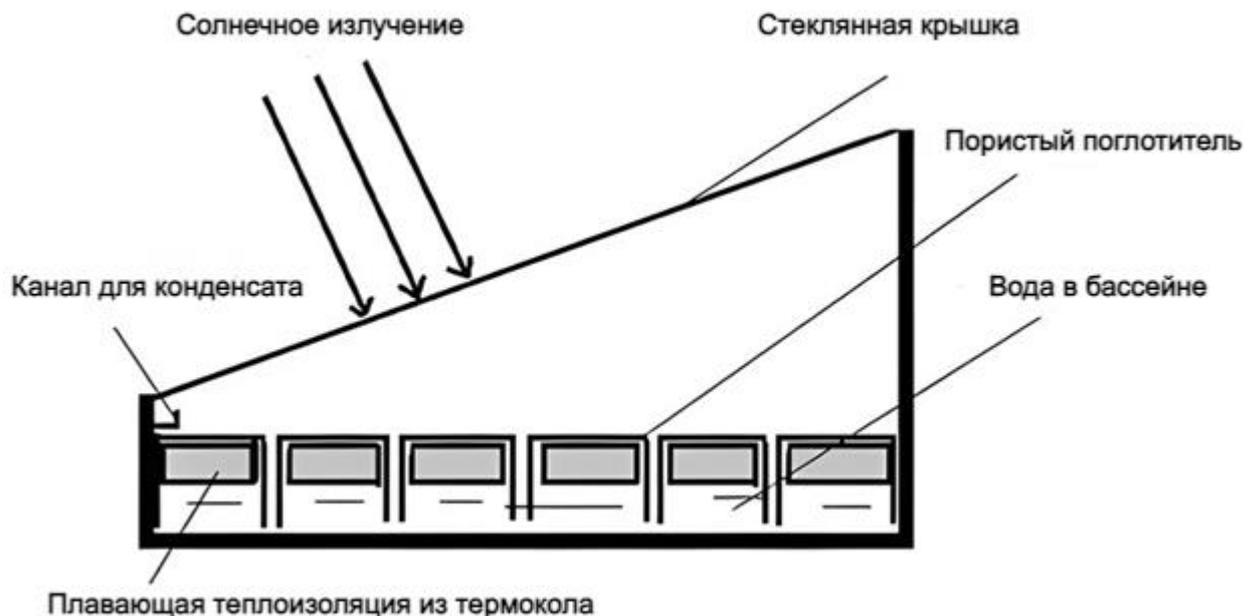


Рисунок 5 – Схематическое изображение модифицированного солнечного опреснителя с плавающей изоляцией [46]

Экспериментальное исследование производительности солнечного опреснителя с использованием материала с фазовым переходом показало, что

производство пресной воды увеличилось до 7,54 л/м<sup>2</sup>/день, что на 67,2% больше по сравнению с традиционным солнечным опреснителем. Экспериментальные наблюдения проводились в июне и июле 2015 года. Стоимость литра дистиллята при использовании материала с фазовым переходом составила 0,032 USD [49].

Исследование производительности солнечного опреснителя с использованием материала с фазовым переходом показало, что энергетическая эффективность увеличилась до 95% для ребра с парафиновым воском и до 65% для полого ребра. Результаты были получены при массе воды в 20 кг и глубине 4 см. Ребро с теплоаккумулирующим материалом в облицовке бассейна показало лучшую эффективность по сравнению с солнечным опреснителем, оснащенным только ребрами [50].

Исследование производительности солнечного опреснителя с использованием стабилизированного материала с фазовым переходом показало, что производительность увеличилась до 57,5%, а производство пресной воды возросло до 3,5 л/м<sup>2</sup>. Температура плавления стабилизированного материала с фазовым переходом была повышена до 50 °С, что позволило увеличить производство пресной воды на 43,3% по сравнению с простым солнечным опреснителем [51].

Сравнительное исследование пассивного солнечного опреснителя с использованием материалов с фазовым переходом показало, что производство пресной воды увеличилось на 120% по сравнению с традиционным солнечным опреснителем. Более того, интеграция пассивного солнечного опреснителя с дополнительными компонентами, такими как солнечный коллектор, тепловой насос и материалы с фазовым переходом, позволила увеличить производство пресной воды на 700% по сравнению с традиционным солнечным опреснителем [52]. Схематическая иллюстрация представлена на рисунке 6.

Регенеративные среды помогают повысить эффективность солнечных опреснителей, поглощая и высвобождая тепловую энергию. Джутовая ткань и хлопчатобумажная ткань являются наиболее часто используемыми регенеративными материалами в солнечных опреснителях.

Использование джута в качестве регенеративной среды в солнечном опреснителе улучшило его производительность. Производство пресной воды увеличилось до 4 кг/м<sup>2</sup>/день. Суммарное производство пресной воды возросло на 20%, а энергетическая эффективность повысилась примерно на 8% по сравнению с простым солнечным опреснителем [53].

Использование джутовой ткани в качестве регенеративного материала в солнечном опреснителе в климатических условиях Египта повысило производство пресной воды с 5,5 кг/м<sup>2</sup>/день до 5,9 кг/м<sup>2</sup>/день. Джут способствовал поглощению скрытой тепловой энергии, выделяемой во время конденсации водяного пара, образующегося внутри опреснителя [54].

Исследование односкатного солнечного опреснителя с двойным бассейном, проведенное при климатических условиях Гуджарата, показало, что использование джутовой ткани в качестве регенеративной среды увеличивает производство пресной воды на 18,1% и 21,5% при глубинах воды 0,01 м и 0,02 м соответственно. Джутовая ткань продемонстрировала лучшую регенеративную

способность по сравнению с черной хлопчатобумажной тканью. Производство пресной воды также значительно зависело от глубины воды в бассейне [55].

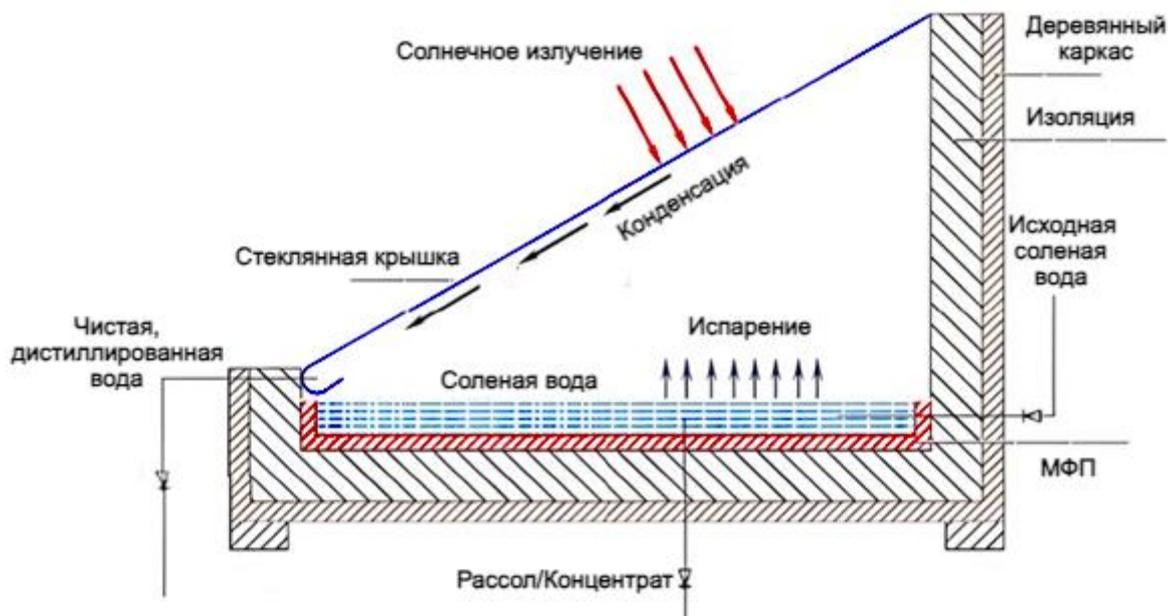


Рисунок 6 – Схематический вид солнечного дистиллятора с материалом фазового перехода

Солнечные опреснители могут быть улучшены с использованием дополнительных источников тепла, что особенно важно в регионах с ограниченной солнечной радиацией. В различных исследованиях изучалась интеграция солнечных опреснителей с дополнительными источниками тепла, такими как солнечные воздухонагреватели, водонагреватели, нанопокрывтия и тепловые насосы. В этом разделе представлены описания некоторых выбранных исследований по интеграции дополнительных источников тепла.

Экспериментальное исследование двускатного солнечного опреснителя с использованием водонагревателей погружного типа показало, что производство пресной воды увеличилось на 370% при использовании двух водонагревателей, каждый из которых имел мощность 500 Вт. Однако при скорости ветра 7 м/с производство пресной воды снизилось на 4%, а при скорости ветра 9 м/с — на 8% [56].

Оценка производительности солнечного опреснителя, интегрированного с солнечным водонагревателем, показала, что предварительный нагрев соленой воды с помощью солнечного коллектора с вакуумными трубками увеличил производство пресной воды на 77% по сравнению с традиционным солнечным опреснителем. Соленая вода поступала в бассейн солнечного опреснителя при температуре 60 °С. Интеграция вакуумного трубчатого коллектора с солнечным опреснителем значительно повысила общую производительность [57].

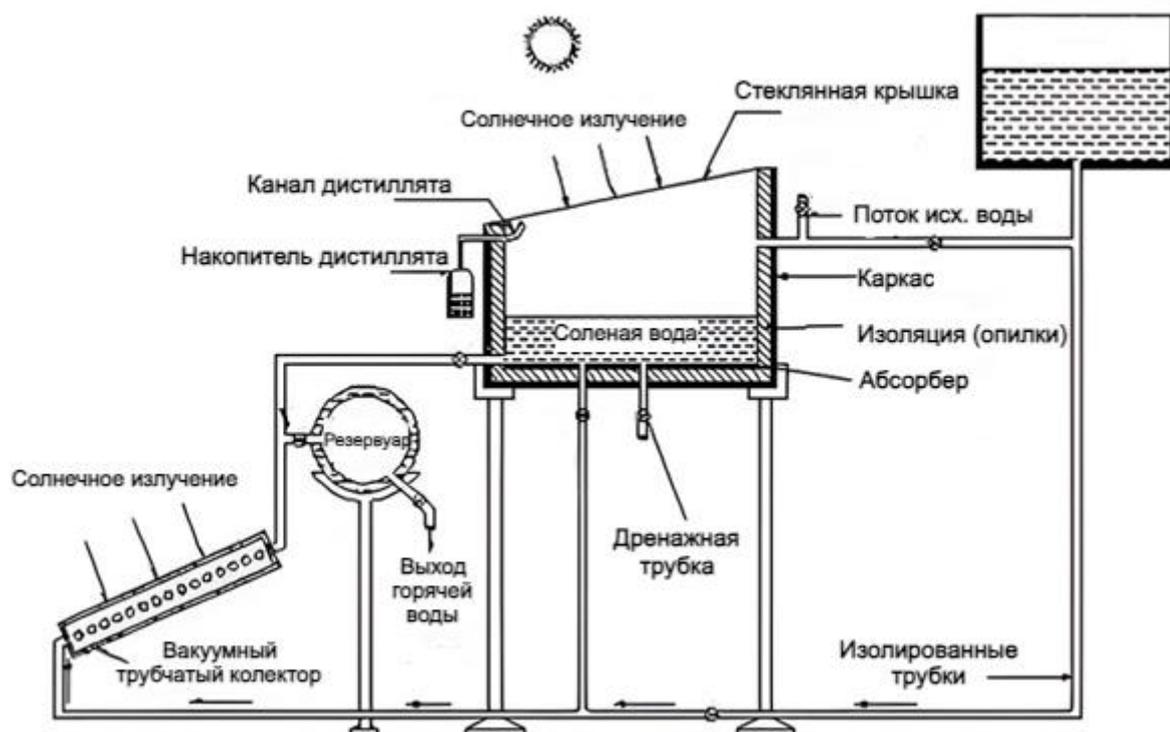


Рисунок 7 – Солнечный дистиллятор с солнечным водонагревателем [57]

Исследование гибридного солнечного опреснителя, интегрированного с вакуумным солнечным водонагревателем, показало, что использование двухслойного фитильного материала улучшило производство пресной воды и энергетическую эффективность на 114% и 71,5% соответственно. Производительность пресной воды увеличилась до 215%, когда горячая соленая вода поступала в бассейн в последние часы солнечного освещения [58].

Исследование солнечного опреснителя, интегрированного с солнечным водонагревателем, показало, что производство пресной воды увеличилось на 76% по сравнению с традиционным солнечным опреснителем в климатических условиях Южной Африки [59].

Исследование ступенчатого солнечного опреснителя, интегрированного с солнечным воздушнонагревателем, показало, что производство пресной воды увеличилось на 112% по сравнению с традиционным солнечным опреснителем. Кроме того, использование алюминиевого наполнителя в солнечном опреснителе обеспечивало на 53% большее производство пресной воды по сравнению с простым солнечным опреснителем [60]. Схематический вид на Рисунке 8.

Исследование солнечного опреснителя с использованием горячего воздушного впрыска и материалов с фазовым переходом показало, что максимальное производство пресной воды составило 9,4 литра/м<sup>2</sup>/день, что на 108% выше по сравнению с традиционным солнечным опреснителем. Впрыск горячего воздуха на верхнюю поверхность воды в бассейне улучшил массообмен, что способствовало увеличению производства пресной воды.

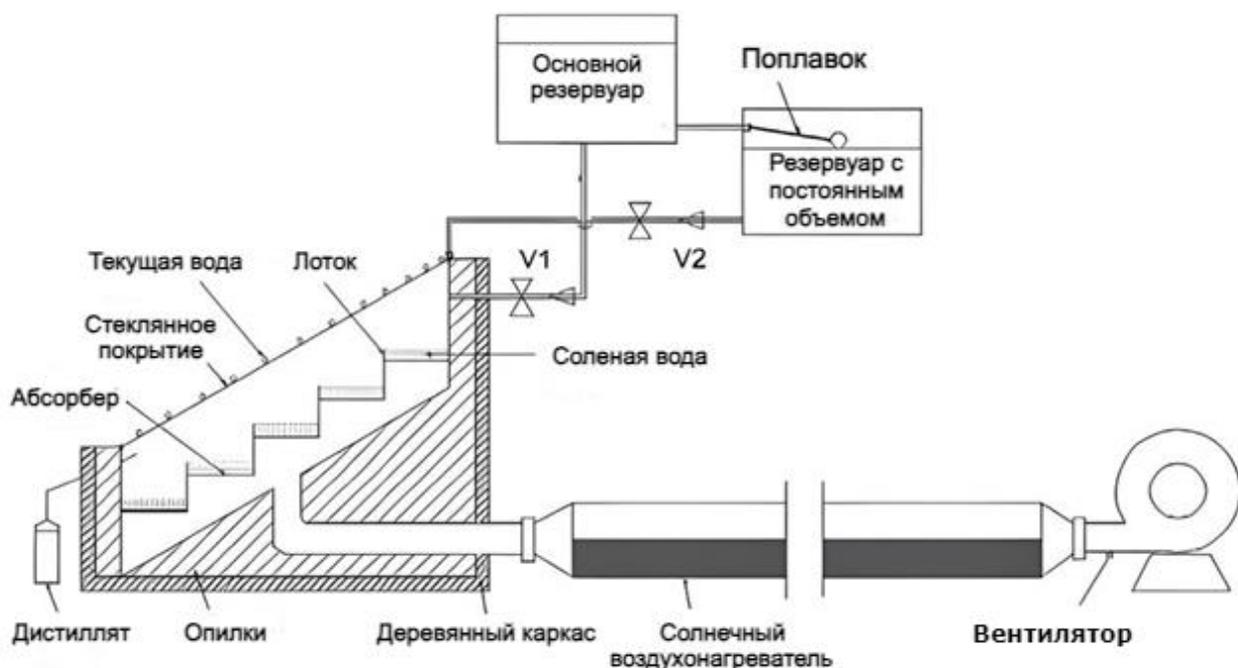


Рисунок 8 – Принцип работы солнечного дистиллятора с солнечным воздухонагревателем[60]

Кроме того, использование материала с фазовым переходом помогло поддерживать высокую температуру воды даже при колебаниях солнечной радиации и в часы отсутствия или низкой интенсивности солнечного света [61]. Схематический вид на Рисунке 9.

Исследование производительности солнечного опреснителя при изменении его геометрии показало, что максимальное производство пресной воды было достигнуто при использовании ступенчатых и каскадных опреснителей. Температура соленой воды была улучшена с помощью солнечных коллекторов и наножидкостей на основе этиленгликоля. Площадь поверхности бассейна также оказала влияние на производство пресной воды. Кроме того, солнечный опреснитель в форме треугольной пирамиды показал улучшение производства пресной воды по сравнению с традиционным солнечным опреснителем [62].

Тепловой насос, используемый в солнечном опреснителе с тепловым насосом, работает, поглощая тепло из окружающей среды и передавая его воде в солнечном опреснителе, что эффективно повышает температуру и улучшает эффективность процесса дистилляции.

Исследование ежедневного производства пресной воды в системе солнечного термического опреснения в жарком и влажном климате Сингапура показало, что коэффициент полезного действия (COP) системы варьировался от 5,0 до 7,0, а производство пресной воды достигло 1,38 кг/ч [63].

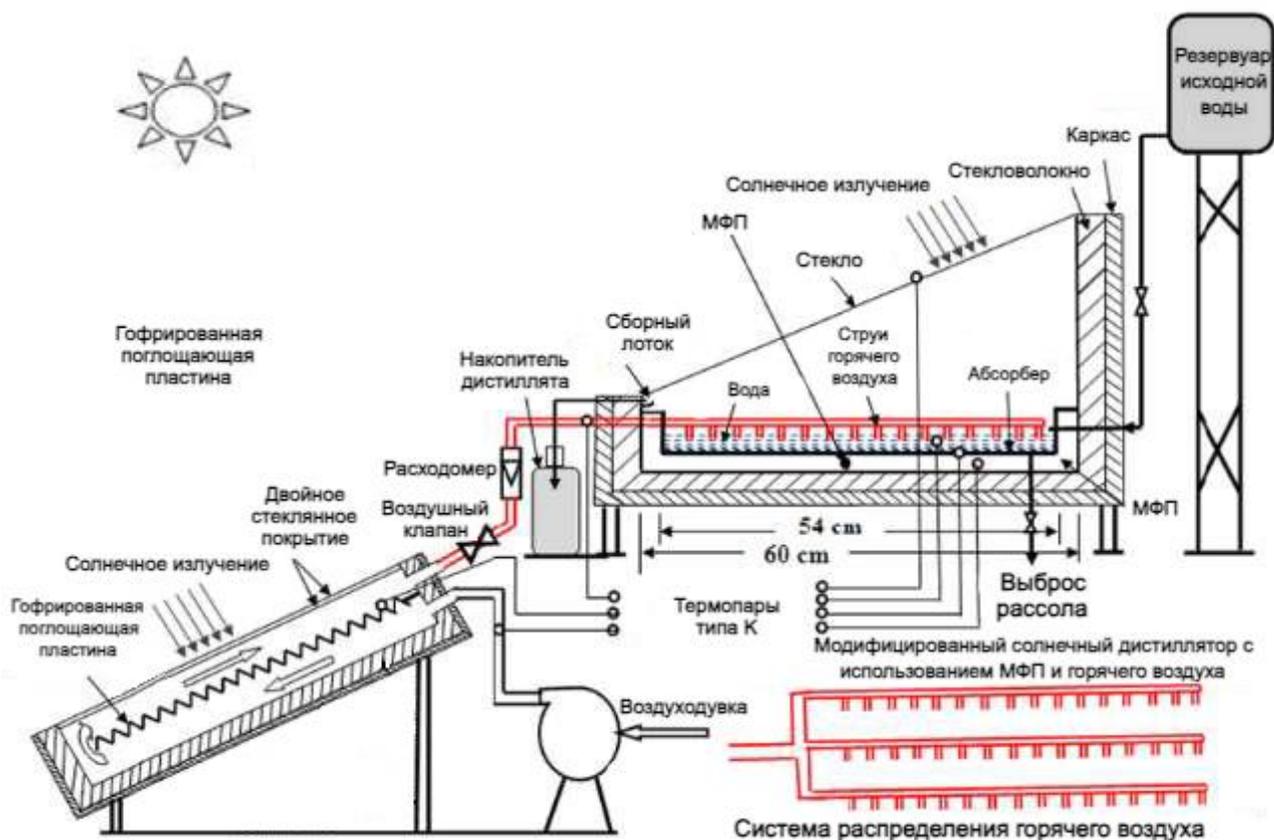


Рисунок 9 – Схематический вид модифицированного солнечного опреснителя с двухходовым солнечным коллектором [61]

Производительность системы опреснения на основе увлажнения-осушения с использованием теплового насоса была исследована, и результаты показали, что производство пресной воды увеличилось до 3 кг/день. Энергосбережение составило 70% по сравнению с традиционной системой опреснения [64].

Производительность системы увлажнения-осушения, интегрированной с циклом компрессионного охлаждения, была изучена, и результаты показали, что производство пресной воды увеличилось до 0,41 л/м<sup>2</sup>/день, а коэффициент полезного действия (COP) повысился до 7,6. Производительность системы также увеличилась за счет утилизации тепла, выделяемого конденсатором и испарителем системы охлаждения [65].

Производительность солнечного опреснителя, интегрированного с тепловым насосом, была численно исследована. В качестве материалов для накопления тепла в бассейне использовались парафиновый воск и гидратная соль. Экспериментальные наблюдения, проведенные в климатических условиях Казахстана, показали, что производительность гибридного солнечного опреснителя увеличилась на 80%. Производство пресной воды в гибридном солнечном опреснителе с использованием гидратной соли улучшилось до 12,5 кг/м<sup>2</sup>/день, что на 9% больше по сравнению с простым солнечным опреснителем [66].

Система опреснения на основе увлажнения-осушения с поддержкой теплового насоса показала улучшение производства пресной воды до 1,1 кг/ч/день по сравнению с традиционной системой. Стоимость дистиллята была оценена в 0,019 USD/л [67].

Исследование эффективности системы увлажнения-осушения, интегрированной с тепловым насосом, показало, что система достигла максимального коэффициента валового выхода (Gross Output Ratio) 5,06, коэффициента восстановления 4,0%, а почасовое производство пресной воды увеличилось до 11,5 кг/ч по сравнению с традиционной системой [68].

Основные факторы, влияющие на термодинамическую производительность солнечных опреснителей с тепловым насосом и регенеративной средой, были обсуждены в этом разделе.

Производительность солнечного опреснителя существенно зависит от скорости ветра и температуры окружающей среды. При низких температурах окружающей среды солнечная энергия, накопленная в бассейне, теряется из-за теплопроводности, конвекции и излучения. Кроме того, при снижении температуры стеклянного покрытия из-за скорости ветра производительность солнечного опреснителя улучшается, что приводит к повышению коэффициента энергетической эффективности. Когда скорость ветра составляет менее 2 м/с, производительность солнечного опреснителя значительно улучшается. Однако при скорости ветра более 2 м/с стеклянное покрытие теряет больше конвективного тепла [69].

Температура воды в солнечном опреснителе зависит от температуры соленой воды в бассейне. Поэтому рекомендуется использовать теплоаккумулирующие материалы для поддержания высокой температуры воды в бассейне и водонагреватели с тепловым насосом для предварительного подогрева соленой воды. Температура соленой воды влияет на общую производительность солнечного опреснителя. Поверхность стеклянного покрытия солнечного опреснителя должна поддерживаться при низкой температуре для улучшения конденсации [70].

Производительность солнечного опреснителя увеличивается в зависимости от угла наклона стеклянного покрытия, который должен соответствовать подходящей широте и долготе. Стеклянное покрытие используется для приема и передачи солнечной радиации внутрь солнечного опреснителя. Стеклянное покрытие должно иметь минимальную абсорбционную способность, низкую отражательную способность и высокую пропускную способность. Пропускная способность уменьшается с увеличением толщины стеклянного покрытия. Стеклянное покрытие должно выдерживать высокие температуры до 100 °C.

При увеличении площади абсорбера бассейна производительность солнечных опреснителей значительно возрастает. Площадь абсорбера бассейна солнечного опреснителя определяет улучшение скорости теплопередачи за счет испарения. Кроме того, когда поверхность бассейна покрыта черной краской с нанопокрывом, количество солнечной радиации, падающей на нее, значительно увеличивается. Это повышает температуру поверхности соленой воды в часы

пикового солнечного освещения и улучшает общую тепловую производительность системы.

Научная литература подтверждает, что многие исследования были посвящены улучшению производительности солнечных опреснителей путем интеграции с теплоаккумулирующими материалами, регенеративными материалами, солнечными коллекторами и системами тепловых насосов. Однако в открытой литературе не сообщается о возможности интеграции водонагревателя с тепловым насосом и солнечного опреснителя, оснащенного материалом для накопления скрытой тепловой энергии в бассейне. Концепция интеграции водонагревателя с тепловым насосом с солнечным опреснителем заключается в эффективном использовании испарителя для конденсации водяного пара, образующегося внутри солнечного опреснителя, с целью производства пресной воды, а также горячей воды для бытового использования. Испаритель водонагревателя с тепловым насосом, работающим от внешнего источника, поглощает энергию окружающей среды, поддерживая разницу температур между внешним источником и поверхностью испарителя [78].

В этой статье представлен сравнительный анализ двух конфигураций солнечных дистилляторов с использованием лицензионного программного пакета ANSYS 2023R2 и метода вычислительной гидродинамики (CFD). Для моделирования применялась модель VoF (Volume of Fluid), которая позволяет рассчитывать переход жидкости из одной фазы в другую. Важно отметить, что модель VoF способна воспроизводить процессы испарения для визуализации, не используя численные результаты в практическом смысле, но соответствуя теоретическому подходу. Актуальность исследования обусловлена глобальным кризисом питьевой воды, который требует повышения эффективности систем опреснения. Этот метод получения чистой воды является одним из самых экологически чистых, что и стало основной причиной выбора объекта исследования. Цель работы — численный анализ и исследование солнечного дистиллятора, сравнительный анализ его двух конфигураций, а также оценка возможных модификаций для повышения эффективности установки. В процессе исследования были смоделированы тепловые потоки внутри установки, распределение объемной доли пара и изменение температуры со временем. Полученные результаты показывают более высокую эффективность и производительность конфигурации с двойным уклоном по сравнению с односторонней конфигурацией. Исследование также подробно описывает физические процессы, происходящие внутри дистиллятора, и определяет направления дальнейшего совершенствования этой системы в моделировании с использованием ANSYS.[76]

Основное новшество заключается в интеграции водонагревателя с тепловым насосом и солнечного опреснителя для производства горячей воды для бытовых нужд и предварительного подогрева соленой воды перед ее поступлением в бассейн солнечного опреснителя. В этом исследовании рассматриваются показатели работы системы в течение года, а также экономический и экологический анализ предложенного решения. Кроме того, качество проб воды, полученных из солнечных опреснителей, было

протестировано и сравнено с нормативами Министерства здравоохранения РК (Санитарно-эпидемиологические требования).

В этой главе были рассмотрены различные конфигурации солнечных опреснителей, использование теплоаккумулирующих материалов, дополнительных источников тепла, экономическая и экологическая оценка воздействия, а также параметрические исследования. На основе обзора литературы было выявлено решение исследуемой проблемы. Термодинамический, экономический и экологический анализ солнечного опреснителя с регенеративной средой и водонагревателем с тепловым насосом будут рассмотрены в следующей главе.

## ГЛАВА 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальные наблюдения на солнечном дистилляторе с регенерацией, поддерживаемой тепловым насосом для нагрева воды, были разработаны и протестированы в климатических условиях города Актау (широта: 43.6588° N, долгота: 51.1975° E) в западной части Казахстана на берегу Каспийского моря. Серия экспериментальных испытаний была проведена на системе с использованием хладагента R134a в качестве рабочего вещества в тепловом насосе.

### 2.1 Описание экспериментальной установки.

Схематическая диаграмма солнечного опреснителя(дистиллятора) с тепловым насосом, представлена на рисунке 10. Часть системы солнечного дистиллятора, связанная с тепловым насосом, состоит из герметичного поршневого компрессора (на хладагенте R134a), конденсатора на стороне хладагента в виде медной спирали, погруженной в бак, термостатического расширительного вентильного устройства (ТРВ) и рулонного-пластинчатого испарителя, расположенного внутри солнечного опреснителя. Кроме того, тепловой насос оснащен герметичным осушителем хладагента, ресивером для жидкости, смотровым стеклом, манометрами и выключателем давления.

Обыкновенный солнечный опреснитель представляет собой солнечный опреснитель с одним склоном и углом наклона 33°, обращенным на юг. Площадь бассейна составляет 1 м<sup>2</sup>, где размещается соленая вода разной глубины до 20 см. Водяной пар конденсируется на внутренней поверхности стекла солнечного дистиллятора и на поверхности рулонно-пластинчатого испарителя теплового насоса. С этих двух поверхностей дистиллированная вода стекает в отдельные лотки и собирается в два контейнера. Соленая вода поступает в солнечный дистиллятор через регулировочный ручной клапан, проходя через вторую спираль в баке и нагреваясь. Бак служит конденсатором для теплового насоса, предварительным нагревателем соленой воды для системы солнечного дистиллятора и водонагревателем для бытовых нужд. Для горячего водоснабжения избыточное тепло в баке (Танк 1) перекачивается в другой бак(Танк 2) с помощью циркуляционного насоса. На рисунке 11 показаны основные механизмы теплопередачи в системе солнечного опреснителя.

Подробная схематическая иллюстрация солнечного дистиллятора с регенерацией, работающего с использованием теплового насоса и латентного теплового накопителя с приборами, используемые для мониторинга работы системы представлена на рисунке 12.

Экспериментальная установка состоит из обычного солнечного дистиллятора и водонагревателя с тепловым насосом, включающего три различных контура:

- (a) контур теплового насоса;
- (b) контур для бытовой воды;
- (c) контур соленой воды.

Солнечный дистиллятор выполнен из листа мягкой стали толщиной 1,2 мм с площадью абсорбера в 0,8 м × 0,78 м. Для снижения тепловых потерь и поглощения избыточного тепла, накопленного в течение пиковых часов солнечной активности была размещена 10 мм стекловатная теплоизоляция для предотвращения утечки накопленного тепла. Верхняя часть солнечного дистиллятора была закрыта 4 мм закаленным стеклом (обладающим максимальной способностью пропускания света и минимальной поглотательной способностью), с использованием резиновых уплотнений и нанесением специальных теплоизолирующих герметиков для минимизации утечки пара.

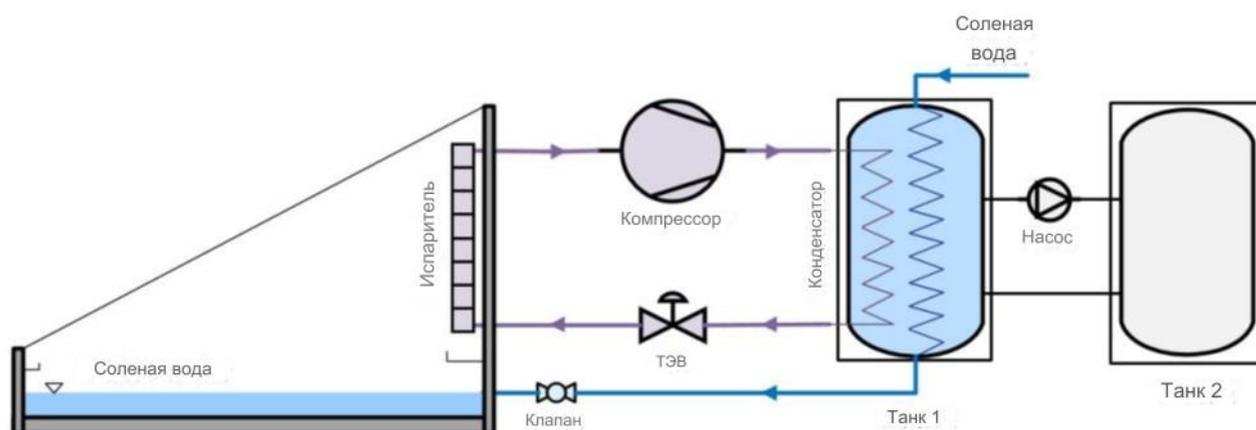


Рисунок 10 – Схематическое изображение регенеративного солнечного опреснителя с тепловым насосом

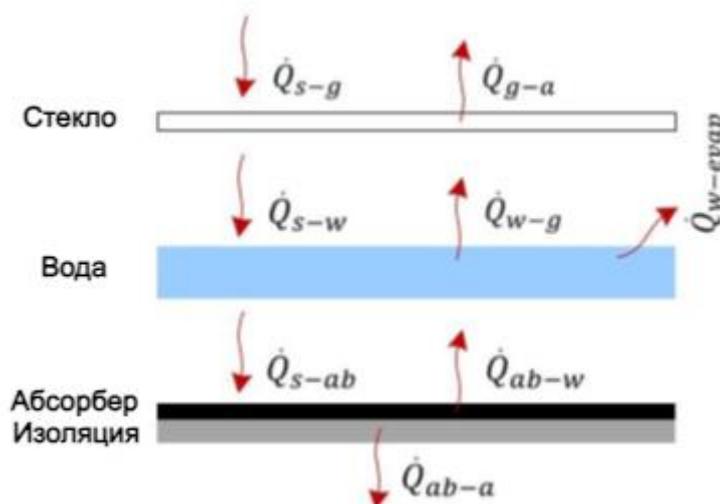


Рисунок 11 – Механизмы теплопередачи внутри солнечного опреснителя

Стеклопанель была ориентирована с наклоном 33° на юг для максимального поглощения солнечной радиации. Контур теплового насоса состоит из герметичного поршневого компрессора (модель: Embraco EMT 6144 Z, R134, 7.2C, 577 Вт) с номинальной электрической мощностью 577 Вт,

изолированного теплообменника типа "оболочка и змеевик" с объемом водяного бака 10 литров.

Кроме основных компонентов, в жидкостную линию хладагента теплового насоса установлен фильтр-осушитель, который предназначен для поглощения влаги и фильтрации пылевых частиц. Теплообменник типа "оболочка и змеевик" подключен к баку-накопителю горячей воды с использованием циркуляционного насоса. Контур соленой воды включает верхний бак, теплообменник "оболочка и змеевик" и солнечный дистиллятор. Соленая вода предварительно нагревается в теплообменнике "оболочка и змеевик", а затем испаряется в бассейне, поглощая солнечную энергию, накопленную в бассейне. Водяной пар, образующийся внутри солнечного дистиллятора, конденсируется на поверхности испарителя и на нижней поверхности стеклянного покрытия, которая поддерживается ниже точки росы водяного пара.

Тепловой насос, работающий в системе с солнечным дистиллятором и поддерживающий регенерацию, представляет собой сложную систему с различными геометрическими параметрами. Эти параметры показаны на рисунке 12, который представляет собой схематический вид солнечного дистиллятора. На рисунке изображены области испарителя и бассейна, которые играют важную роль в способности солнечного дистиллятора генерировать чистую воду через процессы испарения и конденсации.

Компоненты, использованные в регенеративном солнечном тепловом насосе для опреснения, применялись для наблюдения за улучшением производительности системы. Спецификации всех компонентов, использованных в различных конфигурациях солнечных дистилляторов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – техническое описание компонентов теплового насоса

<b>Компоненты</b>	<b>Технические детали</b>
Компрессор	Поршневой компрессор Embraco EMT 6144 Z, R134, 7.2C, 577 Вт
Конденсатор	Ребро на трубке с использованием воды в качестве охлаждающей среды
Расширительный клапан	диаметр: 8 mm; длина: 2 m
Испаритель	Площадь: 1,4 м × 0,7 м. Испаритель типа «оболочка-змеевик», 0.48 кв.м.
Хладагент	R134A

На рисунке 13а показана развернутая схема солнечного дистиллятора. Дистиллятор состоит из следующих компонентов:

- **Испаритель:** Верхняя часть устройства, где происходит испарение воды. Испаритель контактирует с поверхностью воды.
- **Стекло:** Наклонная прозрачная крышка, которая позволяет солнечной энергии проникать внутрь и способствует конденсации испарившейся воды на её внутренней поверхности.
- **Вода:** Находится в нижней части устройства и под воздействием солнечной энергии испаряется.
- **Изоляция:** Расположена вокруг стенок устройства, чтобы минимизировать потери тепла и повысить эффективность процесса дистилляции.

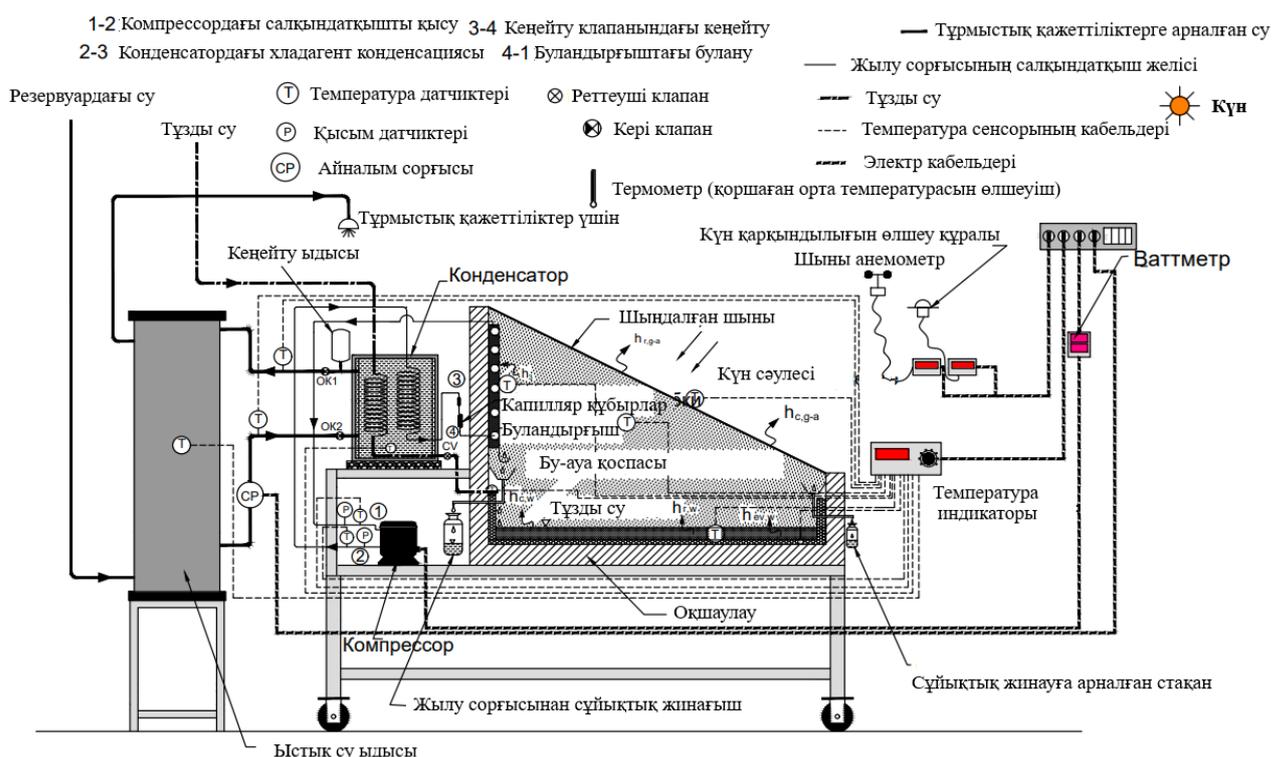


Рисунок 12 – Схематическое изображение регенеративного солнечного опреснителя с тепловым насосом с приборами для мониторинга системы

Экспериментальные наблюдения за солнечным опреснителем с регенерацией, поддерживаемым водонагревателем на тепловом насосе, были проведены для оценки его производительности в климатических условиях города Актау (широта: 43.6588 °N, долгота: 51.1975 °E) в Казахстане.

Солнечный опреснитель (рисунок 13) был изготовлен из нержавеющей стали толщиной 1,2 мм с площадью абсорбера 1,4 м × 0,7 м. Дно и боковые стенки бассейна были покрыты теплоизоляцией из стекловолокна толщиной 50 мм для уменьшения тепловых потерь и поглощения избыточного тепла, собранного в часы максимального солнечного излучения. Верхняя часть солнечного опреснителя была закрыта крышкой из закаленного стекла толщиной 4 мм (с максимальной пропускной способностью и минимальной поглощаемостью) с использованием резиновых уплотнителей для минимизации

утечек пара. Стеклопанная крышка была установлена под наклоном 33°, обращенным на юг, чтобы максимизировать поглощение солнечного излучения. В задней стенке внутри солнечного опреснителя установлены два плоских испарителя площадью 0,24 × 2 кв.м, подключенные последовательно с возможностью переключения (рисунок 13б).

Температура в различных точках экспериментальной установки солнечного опреснителя с регенерацией и тепловым насосом измерялась с использованием термопар РТ1000 (рисунок 15) с точностью ±0,1 °С (в диапазоне от -50 °С до 100 °С). Все термопары подключены к системе сбора данных (рисунок 16).

Все необходимые метеорологические данные были получены с метеостанции Davis VantagePro2Plus Cabled. 6162С (рисунок 17).

На рисунке 14 показана экспериментальная установка солнечного опреснителя с тепловым насосом включая систему сбора данных. Система включает:

- **Солнечный опреснитель:** Это крупная металлическая установка, отражающая поверхность которой позволяет эффективно поглощать солнечное излучение для испарения воды.
- **Тепловой насос:** Система, расположенная справа под защитным навесом, включает синий бак и трубопроводные подключения. Тепловой насос служит для повышения эффективности процесса дистилляции, используя отводимое тепло.
- **Система сбора данных:** На переднем плане расположен белый ящик с подключенными датчиками и проводами. Эта система обеспечивает мониторинг и регистрацию параметров установки, таких как температура, давление и производительность.

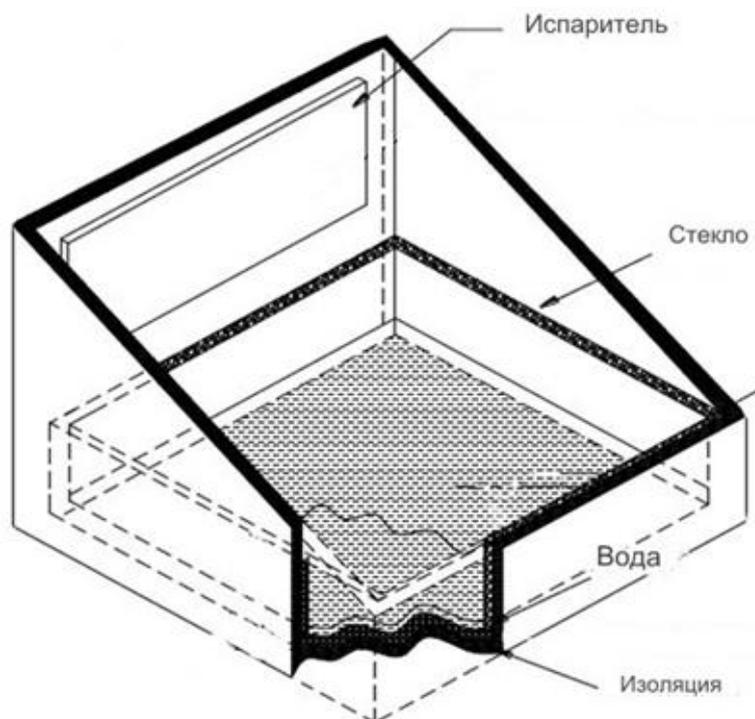
Экспериментальная установка солнечного опреснителя с тепловым насосом была установлена на базе Университета Есенова в городе Актау, что стало важным шагом в исследованиях возобновляемых источников энергии и методов обеспечения пресной водой. В рамках этого проекта была пробурена скважина, чтобы обеспечить установку исходной водой, и проведен анализ состава этой воды с использованием аккредитованных лабораторных методов.

Результаты исследований состава подземной воды выявили существенные различия по сравнению с морской водой Каспийского моря. Подземная вода содержит более низкую концентрацию солей по сравнению с морской, однако все равно имеет высокое содержание солей, что делает её непригодной для использования без предварительного опреснения. Этот фактор особенно важен в контексте региона, где доступ к пресной воде остается одной из приоритетных задач.

Несмотря на более низкое солесодержание, чем у морской воды, необходимость в опреснении подземной воды сохраняется, чтобы сделать её безопасной и пригодной для питьевых и бытовых нужд. Установка солнечного опреснителя с тепловым насосом была специально разработана для работы в таких условиях, где требуется обработка воды с различной степенью минерализации. Применение солнечной энергии и теплового насоса позволяет

значительно повысить эффективность процесса, снижая затраты на энергию и обеспечивая устойчивость системы.

а)



б)

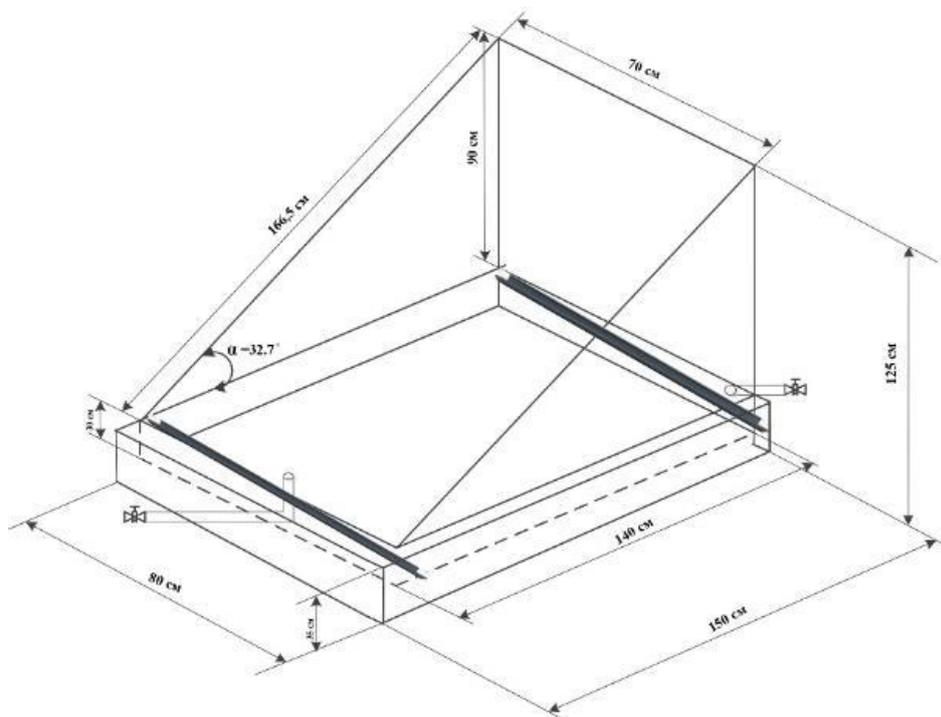


Рисунок 13 – Схема солнечного дистиллятора, а) Развёрнутая схема солнечного дистиллятора б) Размеры солнечного опреснителя



Рисунок 14 – Экспериментальная установка с инструментами

Кабельная метеостанция Davis Vantage Pro2 Plus — это проводная версия (с кабелем длиной 30 м) беспроводной метеостанции Vantage Pro2 Plus. Davis Vantage Pro2 Plus имеет все функции Vantage Pro2 с добавлением датчиков ультрафиолетового излучения и солнечной радиации.



Рисунок 15 – Термопары T1000

Davis Vantage Pro2 Plus отслеживает огромное количество погодных переменных: температуру (в помещении и на улице), барометрическое давление, влажность, осадки, ветер, скорость ветра, точку росы и многие другие. В

комплект входит консоль отображения данных и инновационный интегрированный блок датчиков, который сочетает в себе коллектор дождя, датчики температуры и влажности, а также анемометр, что упрощает установку и повышает производительность и надежность.

Можно строить графики последних 24 часов, дней или месяцев измерений или максимальных и минимальных значений, а также просматривать более 80 графиков, включая дополнительный анализ температуры, осадков, скорости дождя, ветра и барометрического давления без компьютера. Лента прогноза показывает детали и дополнительную информацию с более чем 100 различными сообщениями. Есть возможность подключения станции к ноутбуку с помощью программного обеспечения Vantage Pro2 WeatherLink и загружать данные о погоде практически в реальном времени на свой личный кабинет на официальном сайте.

Метеостанция может работать автономно или в сочетании с пакетом даталоггера/программного обеспечения WeatherLink для подключения к ПК/Mac для загрузки и анализа данных.

Особенности:

- Анемометр включает датчики скорости и направления ветра.
- Прочные компоненты выдерживают ветры ураганной силы, но чувствительны к самым слабым бризам. Протестировано в аэродинамической трубе при скорости ветра более 170 миль в час (274 км/ч).
- Алюминиевое ведро в коллекторе дождя самоочищающееся, устойчиво к коррозии и лазерно откалибровано для исключительной точности. Измеряет объем осадков с точностью до 0,01 дюйма или 0,2 мм.
- Датчики температуры и влажности находятся внутри экрана от радиации, который защищает их от солнечного излучения и других источников теплового излучения.
- Влагостойкий корпус защищает электронные компоненты от воздействия окружающей среды.
- Построение графиков за последние 24 часа, дни или месяцы измерений максимальных и минимальных значений.
- Просмотр более 80 графиков, включая анализ температуры, осадков, скорости дождя, ветра и барометрического давления — все это без компьютера!
- Установите более 70 сигналов тревоги для разных функций одновременно.
- Роза ветров с 16 направлениями показывает текущее и доминирующее направление ветра.
- Просмотр текущих данных или максимальных и минимальных значений за последние 24 дня, месяца или года.
- Пятипозиционная стрелка тренда показывает, растет, падает или стабилизируется барометрическое давление.
- Постоянный дисплей показывает наиболее важные погодные переменные в любое время.
- Отображение осадков за день или за текущий шторм. Иконка зонтика появляется, когда идет дождь.



Рисунок 1610. Система сбора данных



Рисунок 17. Метеостанция Davis Vantage Pro2 Plus Cabled с консолью

- Просмотр ежемесячных или годовых осадков, интенсивности дождя, испарения или интенсивности солнечной радиации.

Технические характеристики:

- Диапазон наружной температуры: от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+65^{\circ}\text{C}$ .
- Диапазон комнатной температуры: от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .
- Диапазон влажности: от 0% до 100%.
- Отображение объема осадков: от 0 до 9999 мм, с разрешением 0,25 мм.
- Скорость ветра: от 0 до 241 км/ч.
- Дальность передачи: до 300 м в прямой видимости.
- Потребление энергии: солнечная энергия питает станцию днем, встроенный суперконденсатор обеспечивает питание ночью, а литиевая батарея используется при необходимости.
- Частота передачи: метод расширенного спектра.

Система сбора данных может быть полезным инструментом для записи и анализа данных в солнечных дистилляторах, как показано на рисунке 24. Даталоггер может использоваться для измерения и записи таких параметров, как температура воды, подлежащей очистке, и давление в система теплового насоса. Солнечный интенсивомер, чашечный анемометр и термопары подключены к даталоггеру. Изменение температуры, солнечное излучение и скорость ветра могут записываться даталоггером с определенными временными интервалами, а цифровой дисплей показывает наблюдаемые показания.

## 2.2 Экспериментальный метод

Ключевые точки в контуре теплового насоса были обозначены следующим образом: всасывание компрессора - 1, выпуск компрессора - 2, выход конденсатора - 3, и вход испарителя - 4. В испарителе хладагент претерпевает фазовый переход из жидкого состояния в парообразное (4-1), поглощая скрытое тепло, выделяющееся внутри солнечного дистиллятора при конденсации водяного пара. Парообразный хладагент затем сжимается в компрессоре (1-2) и конденсируется в теплообменнике типа "оболочка и змеевик" (2-3), выделяя скрытое тепло хладагента. Во время конденсации хладагента происходит нагревание бытовой и соленой воды в теплообменнике "оболочка и змеевик". Затем жидкий хладагент расширяется в капиллярной трубке до давления испарителя (3-4), и цикл продолжается, как показано на рисунке 18.

Для проверки герметичности контура теплового насоса была использована азотная проверка при поддержании давления в пять бар в течение двадцати четырех часов. Затем контур теплового насоса был вакуумирован с помощью вакуумного насоса и заправлен хладагентом в количестве от 550 до 900 граммов. Коэффициент полезного действия (COP) теплового насоса был оценен на основе энергетической эффективности, и был определен оптимальный максимальный заряд. В результате эксперимента было установлено, что оптимальная масса хладагента R134a составляет 750 граммов  $\pm$  10 граммов. Стеклопанель и бассейн солнечного дистиллятора были очищены и заполнены соленой водой до глубины  $10 \pm 3$  мм. Перед началом экспериментальных наблюдений тепловой насос был включен на тридцать минут для прогрева и достижения стационарных рабочих условий. Соленая вода предварительно нагревается в теплообменнике типа "оболочка и змеевик" перед поступлением в бассейн солнечного

дистиллятора. Избыточное тепло, передаваемое в теплообменнике "оболочка и змеевик" теплового насоса, накапливается в дополнительном баке для горячей воды путем включения циркуляционного насоса с интервалом в 30 минут. Параметры окружающей среды (такие как солнечная радиация, температура воздуха и скорость ветра) и температуры в характерных точках (указанных на рисунке 18) контролировались с 8:00 до 21:00 с интервалом в тридцать минут. Начальные и конечные температуры воды в теплообменнике "оболочка и змеевик" измерялись с интервалом в 30 минут для прогнозирования мощности нагрева конденсатора. Потребление электроэнергии компрессором измерялось с интервалом в 30 минут в промежутке с 9:00 до 21:00. Глубина воды в бассейне контролировалась с интервалом в один час и поддерживалась на уровне  $10 \pm 3$  мм путем открытия регулирующего клапана. Производительность системы (полученная от стеклянного покрытия и испарителя теплового насоса) наблюдалась отдельно с использованием накопителей с интервалом в 60 минут. Экспериментальные испытания проводились в течение 275 ясных солнечных



Рисунок 18 – Диаграмма давление-энтальпия в системе теплового насоса

дней. Для сравнения производительности учитывались среднемесячные данные за разные месяцы. Коэффициент энергетической эффективности (COP) прогнозировался на основе экспериментальных данных.

Солнечный дистиллятор был разработан для работы с использованием солнечной энергии для испарения и сбора чистой воды. Производительность системы зависит от ряда факторов, включая интенсивность и продолжительность солнечного света, температуру окружающей среды и свойства материалов, использованных в системе. В данном случае было установлено, что солнечный дистиллятор имеет максимальную часовую производительность дистиллята, которая наблюдалась во время пиковых солнечных часов в июле. В это время интенсивность солнечного света была наивысшей, обеспечивая необходимую энергию для генерации пара, необходимого для производства чистой воды.

В рамках исследования производительности экспериментальной установки солнечного опреснителя с тепловым насосом была реализована программа проведения экспериментов, включающая условия, методы обработки данных, параметры окружающей среды и схемы проведения испытаний.

#### Условия экспериментов

- **Временные рамки:** Исследования проводились в разное время суток, чтобы оценить влияние солнечной активности на эффективность процесса.
- **Температура окружающей среды:** Замеры выполнялись при различных температурных условиях (утренние, дневные и вечерние часы) с учетом сезонных колебаний. Температура воздуха фиксировалась с помощью установленных датчиков температуры, которые обеспечивали точные измерения параметров воды и воздуха в разных точках установки.
- **Солнечная радиация и метеоданные:** Для измерения уровня солнечной радиации, температуры, влажности, скорости и направления ветра использовалась метеостанция Vantage Pro 2 Plus. Это оборудование позволяло собирать полные и точные метеорологические данные, необходимые для анализа влияния внешних условий на эффективность установки.

#### Методы обработки полученных данных

- **Сбор данных:** Все параметры, включая температуру воды, давление в системе, показатели эффективности теплового насоса и объем полученной пресной воды, собирались с использованием полу-автоматизированной системы регистрации данных.
- **Статистический анализ:** Данные обрабатывались с применением методов статистического анализа для определения корреляции между параметрами окружающей среды и производительностью установки.
- **Графическая интерпретация:** Были построены графики зависимости эффективности установки от различных факторов, таких как интенсивность солнечной радиации, температура воздуха и влажность.

#### Схема проведения исследований

- **Подготовка установки:** Установка проверялась на герметичность, метеостанция настраивалась, и контролировался уровень воды в опреснителе. Датчики температуры устанавливались в ключевых точках для мониторинга температурных условий.
- **Начало эксперимента:** Установка начинала работу с появлением солнечного света, и фиксировались начальные параметры воды (температура, солесодержание).
- **Процесс опреснения:** Вода испарялась в солнечном дистилляторе, а тепловой насос поддерживал оптимальные температурные условия, ускоряя процесс испарения и конденсации.
- **Измерение производительности:** Объем произведенной пресной воды измерялся с помощью весов, чтобы получить точные данные о количестве очищенной воды.
- **Сбор данных:** Параметры установки измерялись и записывались автоматически каждые 5 минут.

Реализация этой программы позволила провести всесторонний анализ работы солнечного опреснителя, выявить ключевые параметры, влияющие на его эффективность, и оптимизировать конструкцию для использования в реальных условиях.

### ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ

В этой главе представлены уравнения, используемые для анализа термодинамической производительности, экономического и экологического воздействия системы, а также обсуждаются принятые допущения.

Этот раздел посвящен анализу энергетической эффективности системы на основе первого закона термодинамики. Будет рассмотрено, как энергия, поступающая в систему, преобразуется и используется для опреснения воды. Включены уравнения для расчета теплопередачи, тепловой эффективности и производительности системы. Энергетическая производительность солнечного опреснителя с регенеративной средой и водонагревателем, поддерживаемым тепловым насосом, оценивается на основе первого закона термодинамики. Для упрощения расчетов и повышения точности анализа приняты следующие допущения:

- Отсутствие утечек водяного пара: предполагается, что из солнечного опреснителя не происходит утечек водяного пара в окружающую среду. Это позволяет считать, что вся произведенная пресная вода учтена в расчете эффективности.
- Игнорирование влияния кинетической, потенциальной и химической энергии: Влияние этих факторов на систему считается минимальным, и они не учитываются в расчетах, что упрощает анализ.
- Равномерная температура воды в бассейне: предполагается, что температура воды в бассейне поддерживается равномерной, что позволяет использовать средние значения для расчетов теплопередачи и энергопроизводительности.
- Игнорирование теплопотерь через дно и боковые стороны бассейна: считается, что наличие теплоаккумулирующего материала существенно уменьшает теплопотери, поэтому они не учитываются в расчете.
- Поддержание глубины воды: Глубина воды в солнечном опреснителе, оснащенный водонагревателем с тепловым насосом и регенеративной средой, поддерживается на уровне  $10 \pm 3$  мм за счет подачи соленой воды из верхнего резервуара.
- Для расчетов были учтены теплофизические свойства стекла, воды, абсорбирующей пластины, испарителя типа «оболочка-змеевик» и изоляционных материалов, представленные в Таблице 2.
- Эффект замерзания морской воды не учитывается.

Эти допущения позволяют упростить моделирование системы и сосредоточиться на ключевых факторах, влияющих на энергетическую производительность солнечного опреснителя.

Уравнения, используемые для расчета коэффициента энергетической производительности солнечных опреснителей с поддержкой водонагревателя с тепловым насосом и регенеративной средой, представлены в этом подразделе.

Таблица 2 – Характеристики регенеративного солнечного дистиллятора с тепловым насосом.

№	Соответствующие параметры	Числовое значение	Единица измерения
1	$\alpha_g$	0.0475	
2	$\alpha_w$	0.3	
3	$\alpha_{abs}$	0.95	
4	$R_g$	0.0735	
5	$R_w$	0.025	
6	$\varepsilon_g$	0.95	
7	$\varepsilon_w$	0.94	
8	$A_g$	1.1547005384	$m^2$
9	$A_w$	1	$m^2$
10	$A_{abs}$	1	$m^2$
11	$A_{ev}$	0.5	$m^2$
12	$L_{abs}$	0.002	$m$
13	$L_{ins}$	0.05	$m$
14	$H_w$	0.05	$m$
15	$L_w$	1	$m$
16	$W_w$	1	$m$
17	$K_{abs}$	16.3	$W/m^\circ C$
18	$K_{ins}$	0.039	$W/m^\circ C$
19	$q_{evaporator} (R134a)$	800	$W/m^2$
20	$Switch$	[0;1]	
21	$C_g$	800	$J/kg^\circ C$
22	$C_{abs}$	480	$J/kg^\circ C$
23	$C_{ev}$	385	$J/kg^\circ C$
24	$m_g$	11.685569448398	$kg$
25	$m_{abs}$	15.6	$kg$
26	$M_{ev}$	3.675	$kg$
27	$\sigma$	$5.6697 \cdot 10^{-8}$	$W/m^2 * K^4$
28	$g$	9.81	$m/s^2$
29	$S$	13	$g/kg$
30	$t$	30	$s$

Обобщенное уравнение энергетического баланса, основанное на первом законе термодинамики, имеет следующий вид:

$$E_{in} + E_{ge} = E_{out} + E_{st} \quad (1)$$

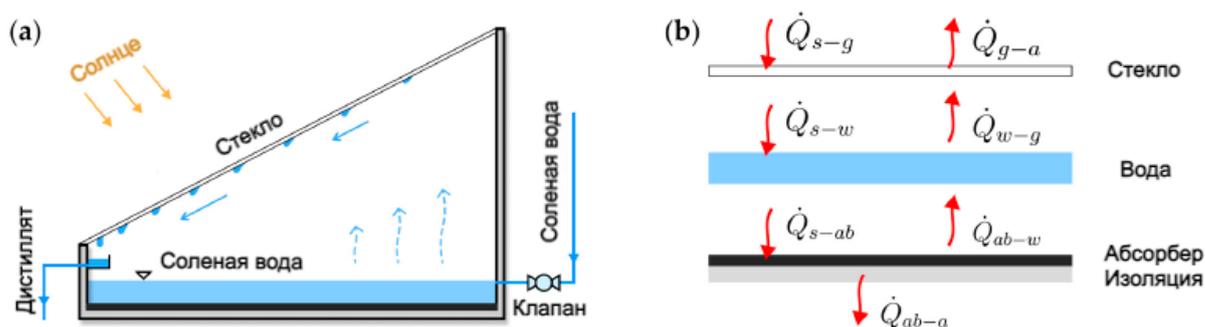


Рисунок 19 – а) обычный солнечный дистиллятор; б) режимы теплопереноса в солнечном дистилляторе[77]

Следующее выражение показывает энергетический баланс для различных компонентов солнечного опреснителя с поддержкой водонагревателя с тепловым насосом и регенеративной средой [69]:

Уравнение энергетического баланса для бассейна представлено следующим образом [69]:

$$\alpha_b \tau_g \tau_w I(t) A_b = m_b c_{pb} \frac{dT_b}{dt} + h_{c\ b-w} (T_b - T_w) + U_{0\ b-a} (T_b - T_a) \quad (2)$$

где  $m_b$  — масса бассейна в килограммах (кг).

Уравнение энергетического баланса для соленой воды представлено следующим образом [69]:

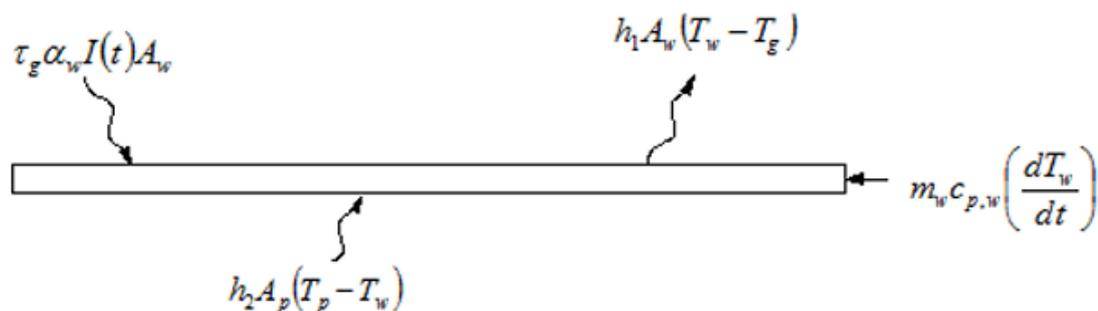


Рисунок 110 – Энергетический баланс соленой воды [69]

$$\alpha_w \tau_g I(t) A_w + h_{c\ b-w} (T_b - T_w) = m_w c_{pw} \frac{dT_w}{dt} + U_{0\ w-g} (T_w - T_g) \quad (3)$$

где  $m_w$  — масса соленой воды в килограммах (кг).

Уравнение энергетического баланса для стеклянного покрытия представлено следующим образом [69]:

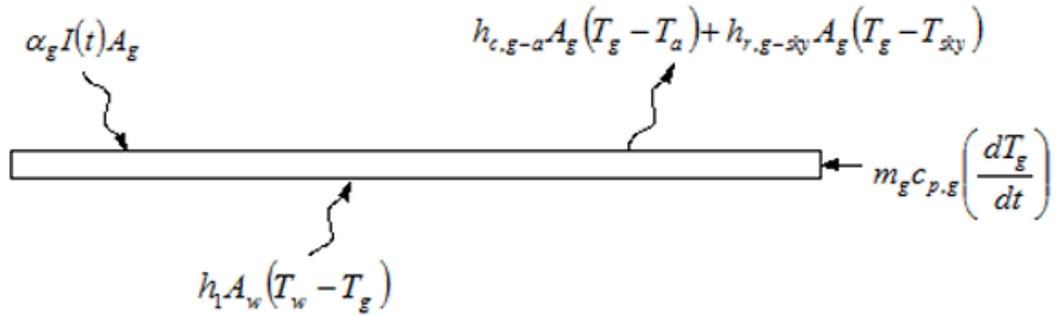


Рисунок 21 – Энергетический баланс стеклянного покрытия [69]

$$\begin{aligned} & \alpha_g I(t) A_g + U_{0\ w-g} (T_w - T_g) \\ & = m_g c_{pg} \frac{dT_g}{dt} + (h_{c\ g-sky} + h_{r\ g-sky}) (T_g - T_{sky}) \end{aligned} \quad (4)$$

где  $m_g$ — масса стеклянной крышки в кг.

Уравнение энергетического баланса для испарителя выражается как:

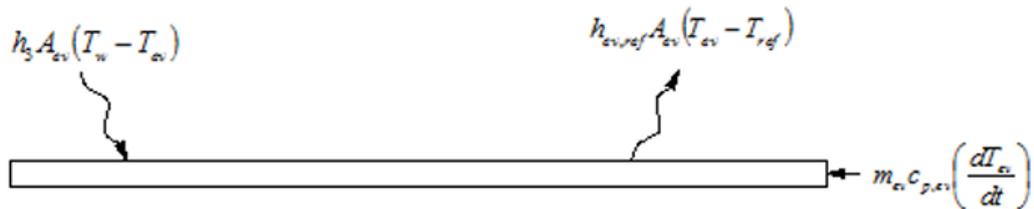


Рисунок 22 – Энергетический баланс испарителя [69]

$$\begin{aligned} & (h_{c\ w-ep} + h_{eva\ w-ep}) (T_w - T_{ep}) \\ & = m_{ep} c_{p,ep} \frac{dT_{ep}}{dt} + h_{ep,ref} + A_{ep} (T_{ep} - T_{ref}) \end{aligned} \quad (5)$$

где  $m_{ep}$ — масса испарителя в кг.

$$h_{c\ w-ep} = 0.884 \left[ T_w - T_{ep} + \frac{(P_w - P_{ep}) T_w + 273}{268,900 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6)$$

$$h_{eva\ w-ep} = 0.016 h_{c\ w-ep} \frac{(P_w - P_{ep})}{(T_w - T_{ep})} \quad (7)$$

$$h_{ep,ref} = \frac{Nuk_{ref}}{l_{ref}} \quad (8)$$

Уравнение для общего коэффициента теплопередачи [69]:

$$U_{0\ w-g} = h_{c\ w-g} + h_{eva\ w-g} + h_{r\ w-g} \quad (9)$$

Уравнение для коэффициента конвективной теплопередачи [69]:

$$h_{c\ w-g} = 0.884 \left[ T_w - T_g + \frac{(P_w - P_g)T_w + 273}{268,900 - P_w} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Здесь:

$$P_g = \exp \left[ 25.317 - \frac{5.144}{T_g + 273} \right] \quad (11)$$

$$P_w = \exp \left[ 25.317 - \frac{5.144}{T_w + 273} \right] \quad (12)$$

Уравнение для коэффициента теплопередачи при испарении:

$$h_{eva\ w-g} = 0.016 h_{c\ w-g} \frac{(P_w - P_g)}{(T_w - T_g)} \quad (13)$$

Уравнение для коэффициента радиационной теплопередачи:

$$h_{r,w-g} = \sigma \varepsilon_{eff} [(T_w + 273)^2 + (T_g + 273)^2] (T_w + T_g + 546) \quad (14)$$

Здесь

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\left[ \frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right]} \quad (15)$$

Уравнение для коэффициента конвективной теплопередачи:

$$h_{c,g-sky} = 2.8 + 3.0V \quad (16)$$

Уравнение для коэффициента радиационной теплопередачи:

$$h_{c,g-sky} = \frac{\varepsilon_{eff} \sigma (T_g^4 + T_{sky}^4)}{T_g - T_{sky}} \quad (17)$$

Уравнение для температуры неба:

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1/5} \quad (18)$$

Уравнение для конвективной теплопередачи:

$$h_c = \frac{k \times 0.15 \times (Gr.Pr)^{0.333}}{L} \quad (19)$$

Здесь,

$$Gr = \frac{g v \times \beta \times \Delta T \times L^3}{\gamma^2} \quad (20)$$

$$\beta = \left( \frac{1}{T_f + 273.16} \right) \quad (21)$$

$$T_f = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (22)$$

Уравнение для коэффициента выхода энергии (Gained Output Ratio, GOR) теплового насоса, используемого в регенеративном солнечном опреснителе:

$$GOR = \frac{m_w + L}{W} \quad (23)$$

Следующее уравнение относится к скрытой теплоте соленой воды [71]:

$$L = 3.1615 \times (10^6 - 761.6 T_w) \text{ for } T_w > 70 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (24)$$

Следующее уравнение описывает почасовую производительность солнечного опреснителя [72]:

$$m_w = \frac{h_{eva \ w-g} (T_w - T_g) \times 3600}{L} \quad (25)$$

Следующее уравнение описывает почасовую производительность регенеративного солнечного опреснителя на основе теплового насоса [64]:

$$m_w = \frac{h_{eva \ w-g} (T_w - T_g) + h_{eva \ w-g} (T_w - T_g) \times 3600}{L} \quad (26)$$

Коэффициент энергетической эффективности традиционных солнечных опреснителей:

$$EPC = \frac{m_w \times L}{A_{ss} \times \Sigma(I_{ss}) \times 3600} \quad (27)$$

Количество скрытой теплоты, выделяемой при испарении воды, можно выразить следующим образом:

$$h_{fg} = 2.4935 \times 10^6 \times (1 - 9.4779 \times 10^{-4} \times T_{w,avg} + 1.3132 \times 10^{-7} \times T_{w,avg}^2 - 4.794 \times 10^{-9} \times T_{w,avg}^3) \quad (28)$$

для  $T_{w,avg} < 70 \text{ }^\circ\text{C}$

$$h_{fg} = 3.1615 \times (10^{-6} - 761.6 \times T_{w,avg}) \quad (29)$$

for  $T_{w,avg} < 70 \text{ }^\circ\text{C}$

Здесь,

$h_{fg}$ - латентное тепло воды (в kJ/kg),

$T_{w,avg}$  – средняя температура воды (в  $^\circ\text{C}$ ).

Коэффициент энергетической эффективности регенеративного солнечного опреснителя с поддержкой теплового насоса определяется следующим образом:

$$EPC = \frac{m_w \times h_{fg}}{A_b \times \Sigma(I_{ss}) \times Q_{cond}} \quad (30)$$

Здесь:

- EPC обозначает коэффициент энергетической эффективности регенеративного солнечного опреснителя с поддержкой теплового насоса.
- $h_{fg}$  обозначает скрытую теплоту испарения воды (кДж/кг).
- $I_{ss}$  обозначает солнечное излучение (Вт/м<sup>2</sup>).
- $A_b$  обозначает площадь бассейна.
- $Q_{cond}$  обозначает тепло, отведенное конденсатором (Вт).

Ежедневная эффективность солнечного опреснителя определяется следующим образом:

$$\eta_d = \frac{m_{w,d} \times h_{fg}}{3600 \times n \times \Sigma(I \times A_b + Q_{cond})} \quad (31)$$

Здесь:

- $\eta_d$  обозначает ежедневную эффективность солнечного опреснителя.
- $m_{w,d}$  обозначает массу воды, произведенной солнечным опреснителем за день.

- $n$  обозначает количество часов работы солнечного опреснителя в течение дня.

Мощность нагрева конденсатора оценивается следующим образом:

$$Q_{cond} = \frac{m_{cw} c_{pw} \times (T_{final} - T_{initial})}{\Delta t} \quad (32)$$

Здесь:

- $m_{cw}$  — масса воды, хранящейся в кожухотрубном конденсаторе (38 кг).
- $c_{pw}$  — удельная теплоемкость воды.
- $T_{final}$  и  $T_{initial}$  — конечная и начальная температуры воды, измеренные в кожухотрубном конденсаторе.
- $\Delta t$  — это временной интервал (30 минут).

Коэффициент полезного действия (COP) теплового насоса определяется следующим уравнением:

$$COP_{sys} = \frac{Q_{cond}}{P_{comp}} \quad (33)$$

Здесь,

- $Q_{cond}$  - представляет собой количество тепла, отводимого в конденсаторе.
- $P_{comp}$  - это мощность, потребляемая компрессором теплового насоса.

### 3.1 Модель экономического анализа

Экономический анализ включает уравнения и методологии для оценки стоимости установки, эксплуатации и обслуживания системы, а также расчеты окупаемости инвестиций. Рассматриваются ключевые экономические показатели, такие как стоимость производства пресной воды и сроки окупаемости системы. Следующие уравнения используются для оценки экономической целесообразности солнечного дистиллятора с регенерацией, поддерживаемого тепловым насосом для нагрева воды. Постоянные годовые затраты определяются следующим образом [78]:

$$FAC = CRF \times CC \quad (56)$$

Здесь,

$CC$  — это капитальные затраты на оборудование (в долларах США).

Коэффициент возмещения капитальных затрат (CRF) рассчитывается следующим образом:

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (57)$$

Здесь,

- $i$  представляет собой процентную ставку (предполагается 12%).

- $n$  представляет собой срок службы солнечных дистилляторов (10 лет).

Годовая ликвидационная стоимость (ASV) определяется следующим образом:

$$ASV = SSF \times S \quad (58)$$

Ликвидационная стоимость (S) определяется следующим образом:

$$S = 0.2 \times CC \quad (59)$$

Коэффициент амортизационного фонда (SSF) определяется следующим образом:

$$SSF = \frac{i}{(1 + i)^n - 1} \quad (60)$$

Годовые эксплуатационные расходы (AOC) определяются следующим образом:

$$AOC = \frac{P_{comp} \times 12}{1000} \times ND \times C_{electricity} \quad (61)$$

Здесь,

- $P_{comp}$  - представляет собой мгновенное потребление мощности компрессора
- $ND$  - представляет количество ясных дней.
- $C_{electricity}$  - представляет стоимость электроэнергии.

Годовые расходы на обслуживание (AMC) оцениваются следующим образом:

$$AMC = 0.15 \times FAC \quad (62)$$

Общие годовые затраты (AC) на солнечный дистиллятор с регенерацией, поддерживаемый тепловым насосом для нагрева воды, оцениваются следующим образом:

$$AC = FAC + AMC - ASV \quad (63)$$

Стоимость за литр (CPL) дистиллята оценивается следующим образом:

$$CPL = \frac{AC}{P_d} \quad (64)$$

Здесь,

$P_d$  - указывает на среднюю годовую производительность, наблюдаемую в течение примерно 300 ясных солнечных дней, для солнечного дистиллятора с регенерацией, поддерживаемого тепловым насосом для нагрева воды.

Срок окупаемости был оценен с использованием следующего уравнения [25]:

$$PBP = \frac{\ln\left(\frac{m_{year} \times SP}{m_{year} \times SP - (CC + OC + AMC) + i}\right)}{\ln(1 + i)} \quad (65)$$

Здесь,

- $m_{year}$  - представляет количество свежей воды, ежегодно производимой солнечным дистиллятором с регенерацией, поддерживаемым тепловым насосом для нагрева воды (в кг),
- $SP$  представляет собой цену продажи дистиллята (в долларах США).

Вышеуказанные уравнения используются для анализа термодинамической эффективности, экономической целесообразности и экологического воздействия солнечного дистиллятора с регенерацией, поддерживаемого тепловым насосом для нагрева воды.

### 3.2 Численное моделирование

Этот раздел посвящен численному моделированию системы с целью прогнозирования ее работы в различных условиях. Описываются уравнения и модели, используемые для симуляции термодинамической и экономической производительности системы, а также для оценки чувствительности к различным параметрам.

Блок-схема, использованная для прогнозирования теоретических результатов, представлена на Рисунке 24.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений решается на основе метода Рунге-Кутты 4-го порядка. Программа для реализации численного алгоритма была разработана с использованием языка программирования Python 3.9.0. Алгоритм вычислений был дополнительно реализован в лицензированном программном обеспечении TRNSYS 18.0. На Рисунке 23 показан проект моделирования в TRNSYS с указанием компонентов системы. Начало симуляции установлено на 6:00 утра, а окончание симуляции — на 24:00 с шагом 30 секунд; погодные данные также указаны с этим шагом. Симуляция начинается с компонента "Weather" (Type9e), который считывает данные о температуре окружающего воздуха, скорости ветра и солнечной радиации из внешнего .txt файла. Компонент "T/Sr" (уравнение) используется для проверки промежуточных значений температуры и солнечной радиации. После этого эти значения радиации передаются в компонент "SR" (уравнение), в котором рассчитываются компоненты уравнений, такие как:  $ag' I(t)$ ,  $\alpha_w' I(t)$ ,  $apl' I(t)$ . Далее все предыдущие компоненты связываются с основным компонентом, где все уравнения раздела Энергетический анализ реализованы в "Солнечном

опреснителе (с испарителем)" (собственный разработанный компонент). В результате из этого компонента можно получить значения температуры, производительности, эффективности, теплового потока и коэффициентов теплообмена для текущей итерации. Компонент "TemperatureLastTimeSteps" (Type93) предназначен для хранения предыдущих значений температуры стекла и воды, которые передаются в компонент "Switch" (собственный разработанный компонент). "Switch" отвечает за включение или выключение теплового насоса, где на выходе подается логический сигнал 0 или 1. Этот компонент описан более подробно ниже. Эти значения передаются в "Солнечный опреснитель" для следующей итерации. После этого данные из этого компонента отображаются в виде графика (Type65d) и в виде текста (Type25c). На каждом шаге времени все вышеперечисленные процедуры повторяются. Рисунок 24 представляет собой блок-схему, подробно описывающую компонент "Switch" (см. Рис. 23). При первом запуске устанавливаются начальные значения таймеров и переключателя. Переменные таймер и таймер2 отвечают за предотвращение скачков включения/выключения компрессора и перегрева теплового насоса соответственно. Переменная таймера установлена на 5 минут, что означает минимальное время нахождения в состоянии включено или выключено. Переменная таймер2 установлена на 50 минут, что означает максимальное время нахождения в состоянии включено. Начальное положение переключателя равно нулю. Затем инициализируются предыдущие значения (начальные значения на момент начала симуляции) температуры воды и стекла. Устанавливается текущее симуляционное время, которое проверяется с конечным временем симуляции. Если время меньше или равно первому таймеру (5 минут), то на этой итерации изменений не происходит. В противном случае, если переключатель выключен и разница температур между водой и стеклом превышает 2 °C, то переключатель включается, и таймеры обновляются. Если переключатель включен, и время больше или равно таймеру2, то переключатель выключается, и обновляется первый таймер. Если переключатель включен, и время меньше или равно таймеру2, а разница температур между водой и стеклом меньше 0,5 °C, то переключатель включается, и обновляется первый таймер. Если условия по разнице температур не выполнены, то изменений не происходит, и переключатель с таймерами остаются в предыдущем положении. На каждой итерации данные таймера и переключателя сохраняются для следующей итерации. Все геометрические и теплофизические параметры солнечного дистиллятора с компрессионным тепловым насосом для расчетов по уравнениям представлены в Таблице 2 с указанием соответствующих единиц измерения.

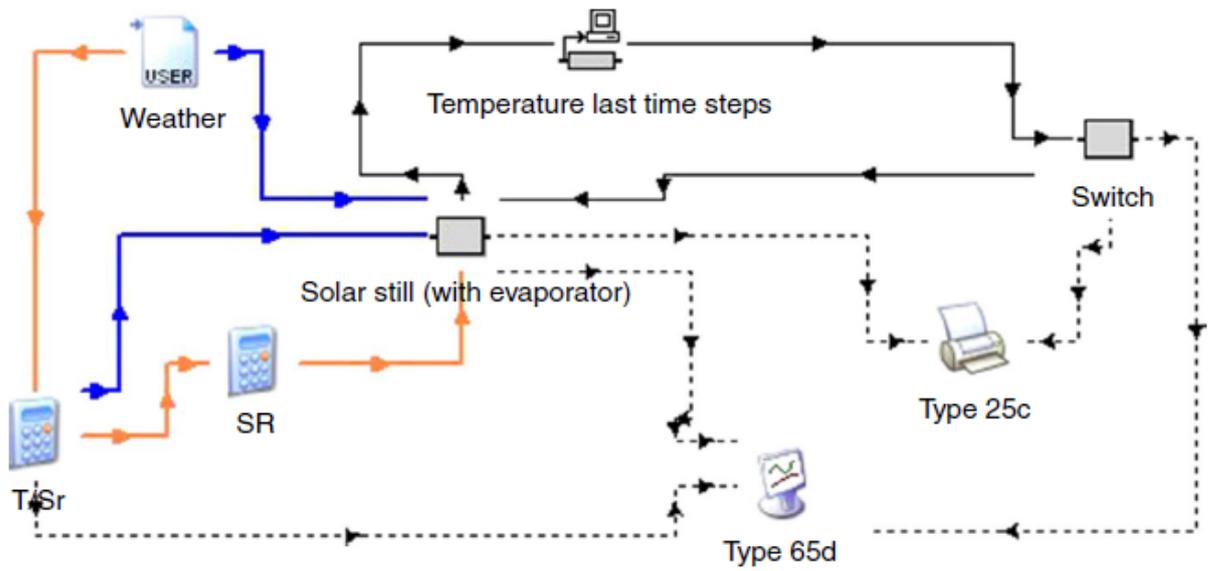


Рисунок 23 – Проект моделирования переходной системы

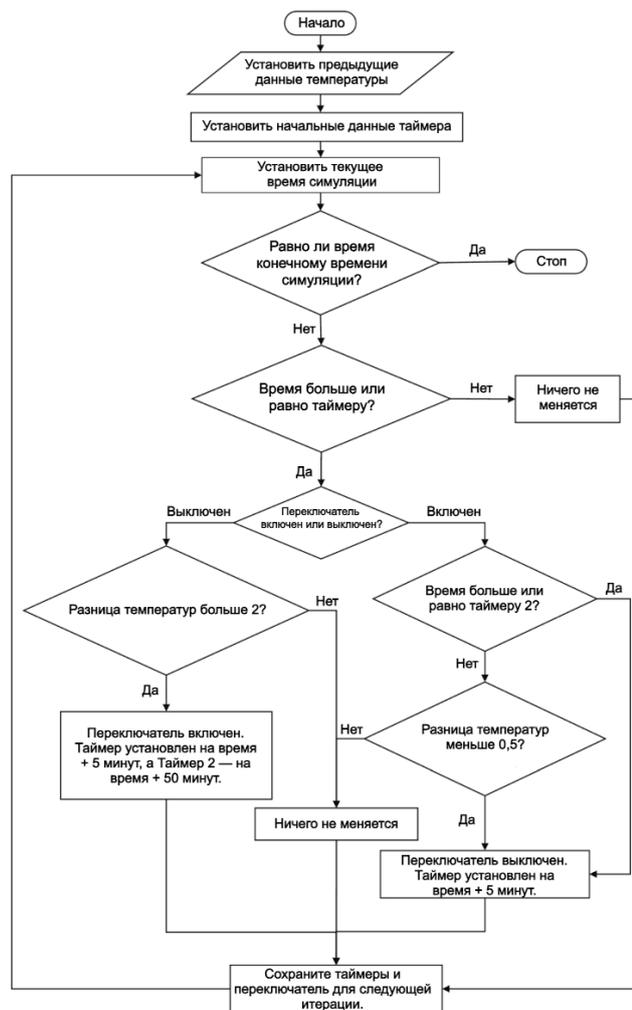


Рисунок 24 – Блок-схема численного расчета

Схематическая диаграмма системы когенерации с солнечным дистиллятором представлена на Рис. 25, демонстрируя две различные конфигурации: с использованием и без использования регенерации тепла. Компоненты теплового насоса в системе включают герметичный поршневой компрессор (использующий хладагент R134a), конденсатор из медной трубки на стороне хладагента, термостатический расширительный клапан и испаритель типа "оболочка-змеевик" расположенный внутри солнечного дистиллятора. Кроме того, тепловой насос оснащен осушителем хладагента герметичного типа, ресивером жидкости, смотровым стеклом, манометрами и реле давления.

В первой конфигурации испаритель типа "оболочка-змеевик" извлекает тепло из кабины бассейна и передает его для нагрева воды в баке (см. Рис. 25a). В этом случае предварительный нагрев воды в бассейне внутри кабины бассейна не производится. Для этой конфигурации были проведены как экспериментальные, так и численные исследования. В противоположность этому, во второй конфигурации испаритель типа "оболочка-змеевик" извлекает тепло из кабины бассейна и после преобразования возвращает его через конденсатор для нагрева воды в бассейне (см. Рис. 25b). Таким образом, тепло, извлеченное из кабины, регенерируется и используется для нагрева воды в бассейне. Для второй конфигурации были выполнены только численные исследования.

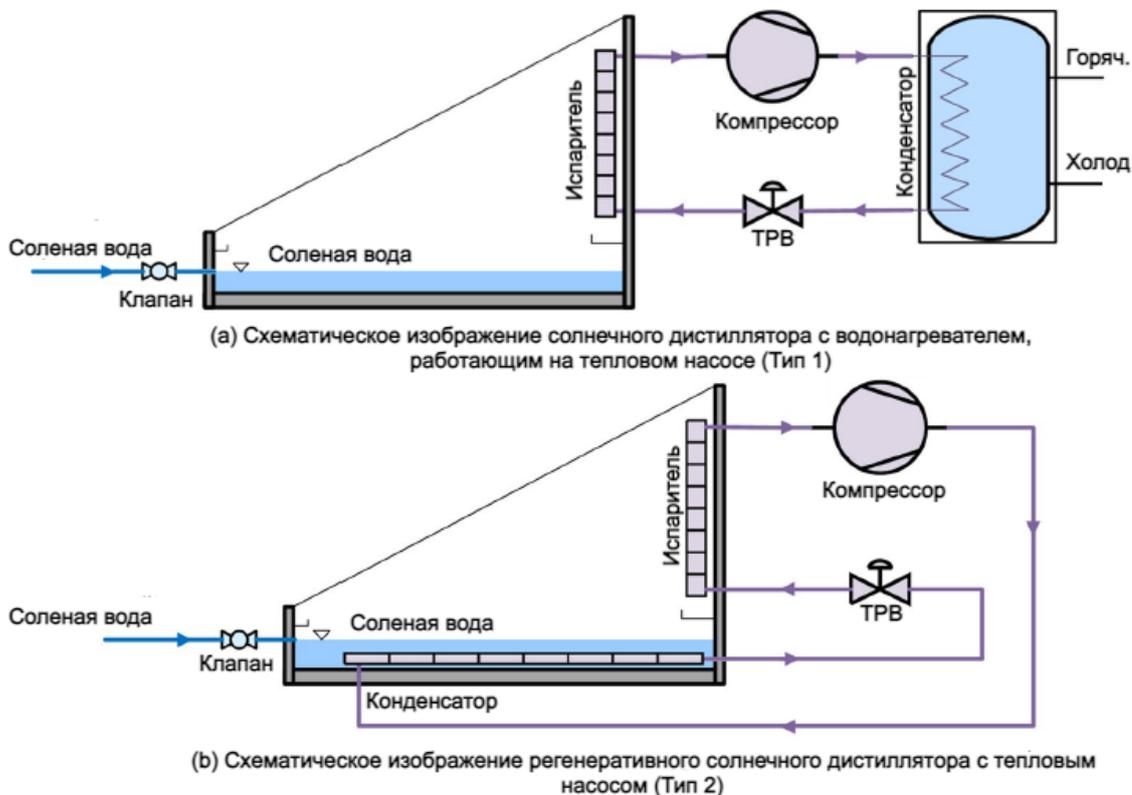


Рисунок 25 - Схематические диаграммы предложенных солнечных дистилляторов с тепловым насосом[77]

### 3.3 Анализ экологического воздействия

Экологическое воздействие, связанное с выбросами углекислого газа (CO<sub>2</sub>) от солнечного опреснителя на основе теплового насоса, оценивается на протяжении 10 лет эксплуатации на основе потребления электроэнергии [73]. Выбросы CO<sub>2</sub> в системах холодильного сжатия, кондиционирования воздуха и тепловых насосах оцениваются на основе выбросов, вызванных как прямыми выбросами хладагента, так и косвенными выбросами, связанными с потреблением электроэнергии.

Рассматриваются следующие предположения:

- Фактор выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании ископаемого топлива на традиционных электростанциях оценивается как 0,98 кг CO<sub>2</sub>/кВт·ч.
- Фактор выбросов CO<sub>2</sub> принят равным 1,57 кг CO<sub>2</sub>/кВт·ч [80].

$$CO_2 = m_{ref} \times GWP_{ref} \times L_{ref}(N - 1) + m_{ref} \times \beta \times P_{comp} \times n \times ND \times N \quad (66)$$

Здесь:

- $m_{ref}$  — масса хладагента, заправленного в тепловой насос,
- $GWP_{ref}$  — потенциал глобального потепления хладагента R134a,
- $L_{ref}$  — утечка хладагента,
- $\beta$  — коэффициент выбросов CO<sub>2</sub>,
- $n$  — количество рабочих часов в день (12 часов),
- $ND$  — количество дней, учитываемых для оценки производительности (225 дней),
- $N$  — срок службы системы (10 лет).

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ

Производительность системы под влиянием солнечного излучения, температуры окружающей среды и скорости ветра была исследована экспериментально. Город Актау в Казахстане расположен в пустынном и засушливом регионе с хорошей доступностью солнечного света в течение всего года. В данной главе представлены результаты экспериментальных наблюдений за круглогодичной производительностью системы, экономический анализ и оценка воздействия на окружающую среду предлагаемой конфигурации солнечного дистиллятора с регенерацией и поддержкой теплового насоса.

Температурные изменения в различных частях солнечного опреснителя на основе теплового насоса были численно оценены для климатических условий города Актау в Казахстане. Актау расположен на восточном побережье Каспийского моря. На Рисунке 26 показаны метеорологические данные за февраль и июль 2023 года, полученные с метеостанции, установленной на кампусе Университета имени Есенова в Актау. Метеостанция Vantage Pro2 Plus 6162C предназначена для измерения метеорологических данных, таких как скорость ветра, направление ветра, температура воздуха, влажность воздуха, атмосферное давление, осадки, интенсивность осадков, УФ-излучение и солнечная радиация. На рисунке 26 показано распределение температуры для каждого месяца, где средняя температура воздуха (сплошная линия) используется для численных расчетов. В феврале минимальное значение средней температуры составляет  $-0,60\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а максимальное значение —  $3,73\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Аналогичные значения для июля составляют  $23,92\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $29,66\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно. Согласно данным по солнечной радиации (рис. 27), максимальное среднее значение составляет  $300\text{ Вт/м}^2$  для февраля и  $826\text{ Вт/м}^2$  для июля. Согласно рисунку 28б, в феврале минимальное значение средней скорости ветра составляет  $5,54\text{ м/с}$ , а максимальное значение —  $8,54\text{ м/с}$ . Аналогичные значения для июля составляют  $4,59\text{ м/с}$  и  $9,14\text{ м/с}$  соответственно.

Как упоминалось ранее, уравнения были численно реализованы с использованием метода Рунге-Кутты 4-го порядка для решения системы ОДУ. Программа для вычислений была разработана с использованием языка программирования Python. В этом разделе представлены результаты моделирования для климатических условий города Актау, Казахстан. На рисунке 29 представлены данные о солнечной радиации и температуре окружающего воздуха для Актау. Эти данные были обработаны и усреднены для типичного дня в месяцах, представленных на графике, что отражает фактические условия соответствующего сезона. Представленные данные показывают, что пики солнечной радиации приходятся на период с 12:00 до 15:00 во все сезоны. Максимальные значения составляют  $286\text{ Вт/м}^2$  в январе,  $686\text{ Вт/м}^2$  в апреле,  $799\text{ Вт/м}^2$  в июле и  $502\text{ Вт/м}^2$  в октябре. Минимальная средняя температура в январе составляет  $0,22\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а максимальная —  $3,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В апреле минимальная и максимальная средние температуры составляют  $8,53\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $14,72\text{ }^{\circ}\text{C}$  соответственно. В июле эти значения составляют  $23,70\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $30,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а в октябре —  $11,40\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $16,57\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Как упоминалось во введении, основные исследования по

солнечным опреснителям в литературе сосредоточены на регионах с жарким климатом. Данная работа отличается тем, что оценивает производительность в регионах с холодным климатом. Согласно климатическим данным для Актау, диапазон средних наружных температур варьируется от 0,22 °С до 30,28 °С.

На рисунке 30 представлены данные о колебаниях температуры поглотителя, воды и стекла для четырех сезонов. Температуры поглотителя и воды почти идентичны во все сезоны. Например, в январе минимальная температура поглотителя составляет -0,34 °С, а температура воды — -0,37 °С. Максимальные температуры составляют 25,73 °С для поглотителя и 25,14 °С для воды. Аналогично, в июле минимальная температура поглотителя составляет 22,99 °С, а температура воды — 22,96 °С. Максимальные температуры составляют 67,23 °С для поглотителя и 66,20 °С для воды. Для сравнения, максимальная температура стекла составляет 9,02 °С в январе, 31,73 °С в апреле, 53,77 °С в июле и 27,75 °С в октябре. Таким образом, максимальная температура стекла в январе на 64,12% ниже, чем пиковая температура воды, тогда как в июле разница составляет 18,78%.

Рисунок 28б иллюстрирует распределение средней скорости ветра. В январе средняя скорость ветра колеблется в пределах от 6,32 м/с до 7,37 м/с, в то время как в апреле, июле и октябре соответствующие диапазоны составляют 4,31 м/с до 6,09 м/с, 4,33 м/с до 5,25 м/с и 4,57 м/с до 6,51 м/с соответственно. Город Актау испытывает ясные и солнечные условия более чем 225 дней в году, что представляет собой возможность для использования солнечной тепловой энергии для производства пресной воды.

**Солнечное Излучение.** Было установлено, что солнечное излучение увеличивается в утренние часы (с 8:00 до 13:00) в послеобеденные часы до примерно 100 Вт/м<sup>2</sup> к 18:00. В осенние и летние месяцы (апрель, май, июнь, июль и август) в 13:00 наблюдалось солнечное излучение более 800 Вт/м<sup>2</sup>. Продолжительность солнечного света в летние месяцы составляла 12 часов в день. В зимние месяцы (октябрь, ноябрь, декабрь и январь) пиковое солнечное излучение составляло около 600 Вт/м<sup>2</sup>.

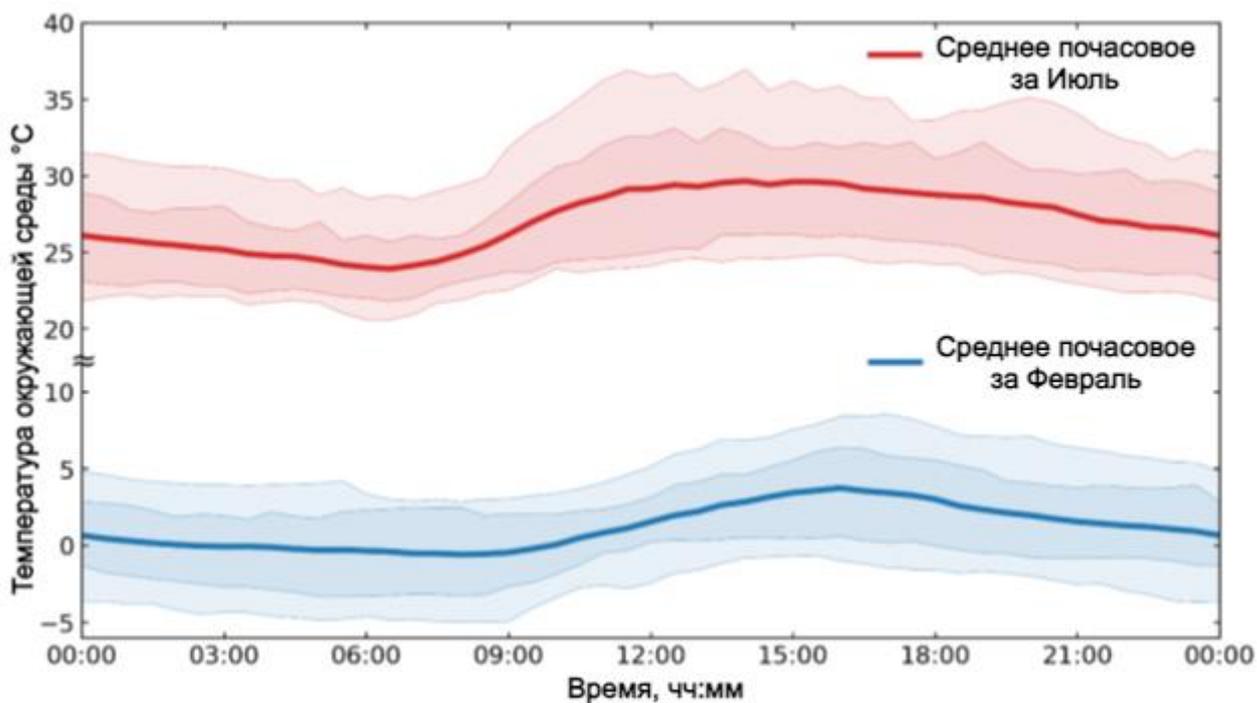


Рисунок 26 – Почасовая средняя температура окружающей среды (красная линия – июль, синяя линия – февраль) с диапазонами от 25-го до 75-го и от 10-го до 90-го перцентиля.

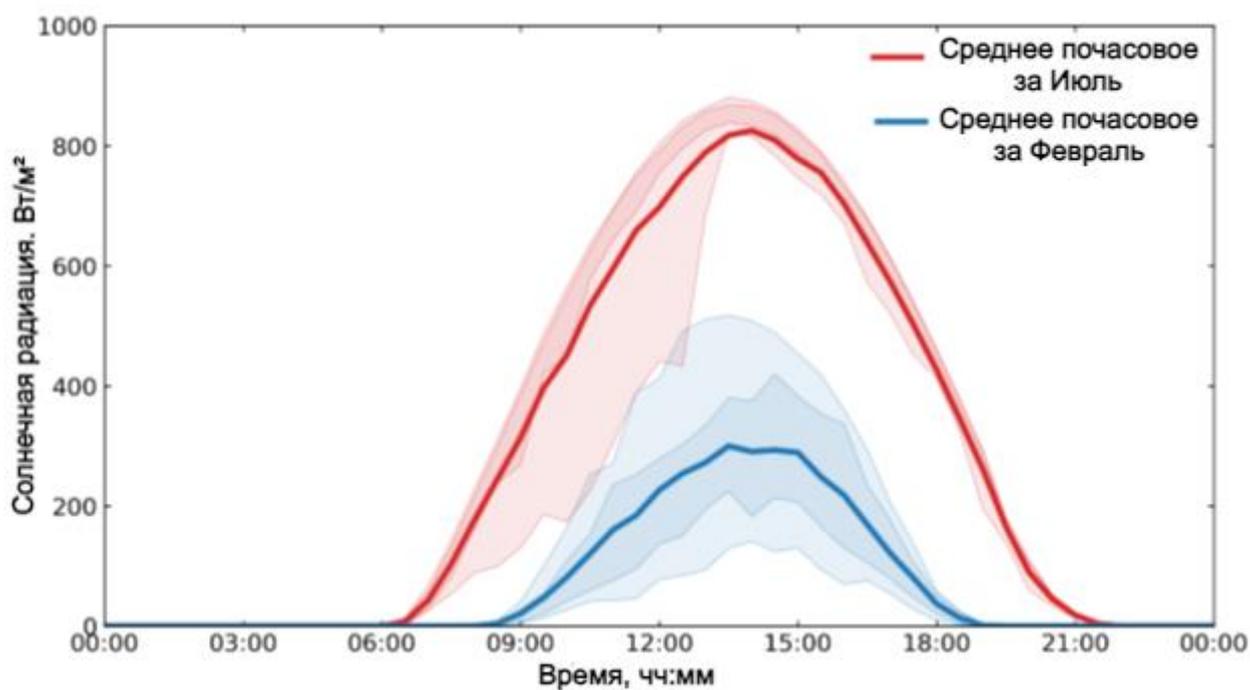


Рисунок 127 – Почасовая средняя солнечная радиация (красная линия – июль, синяя линия – февраль) с диапазонами от 25-го до 75-го и от 10-го до 90-го перцентиля.

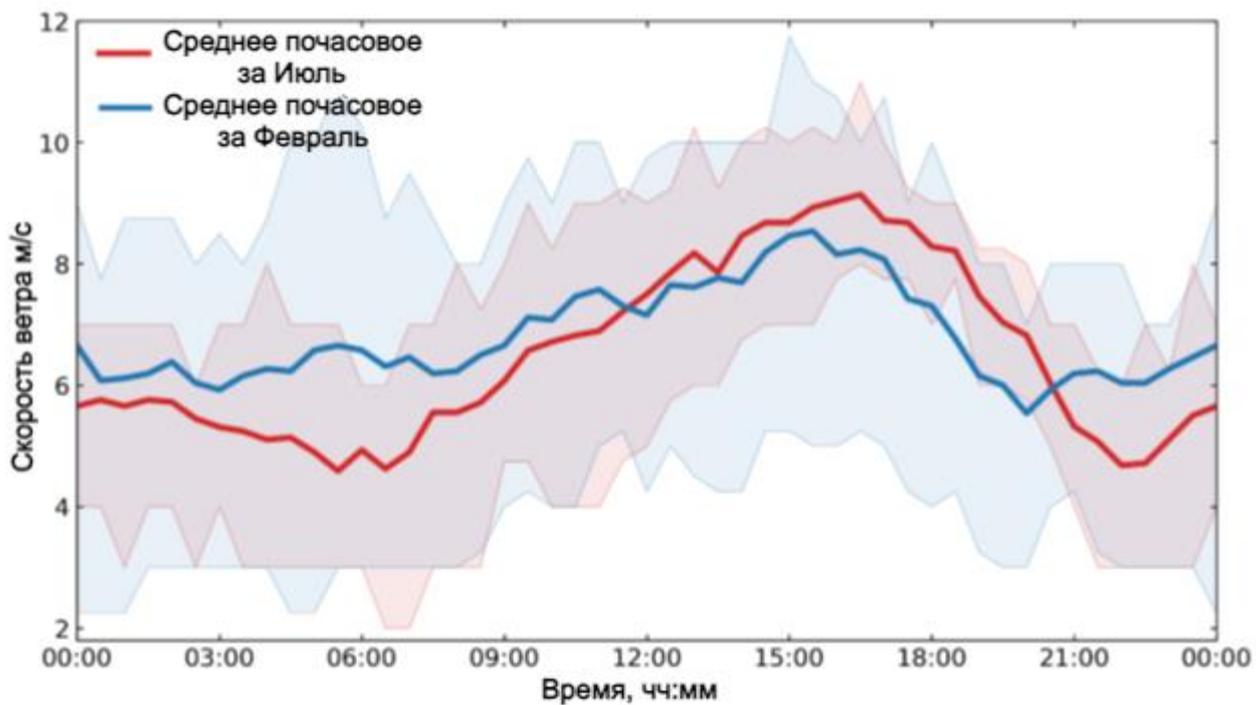


Рисунок 138а – Почасовая средняя скорость ветра (красная линия – июль, синяя линия – февраль) с диапазонами от 25-го до 75-го перцентиля.

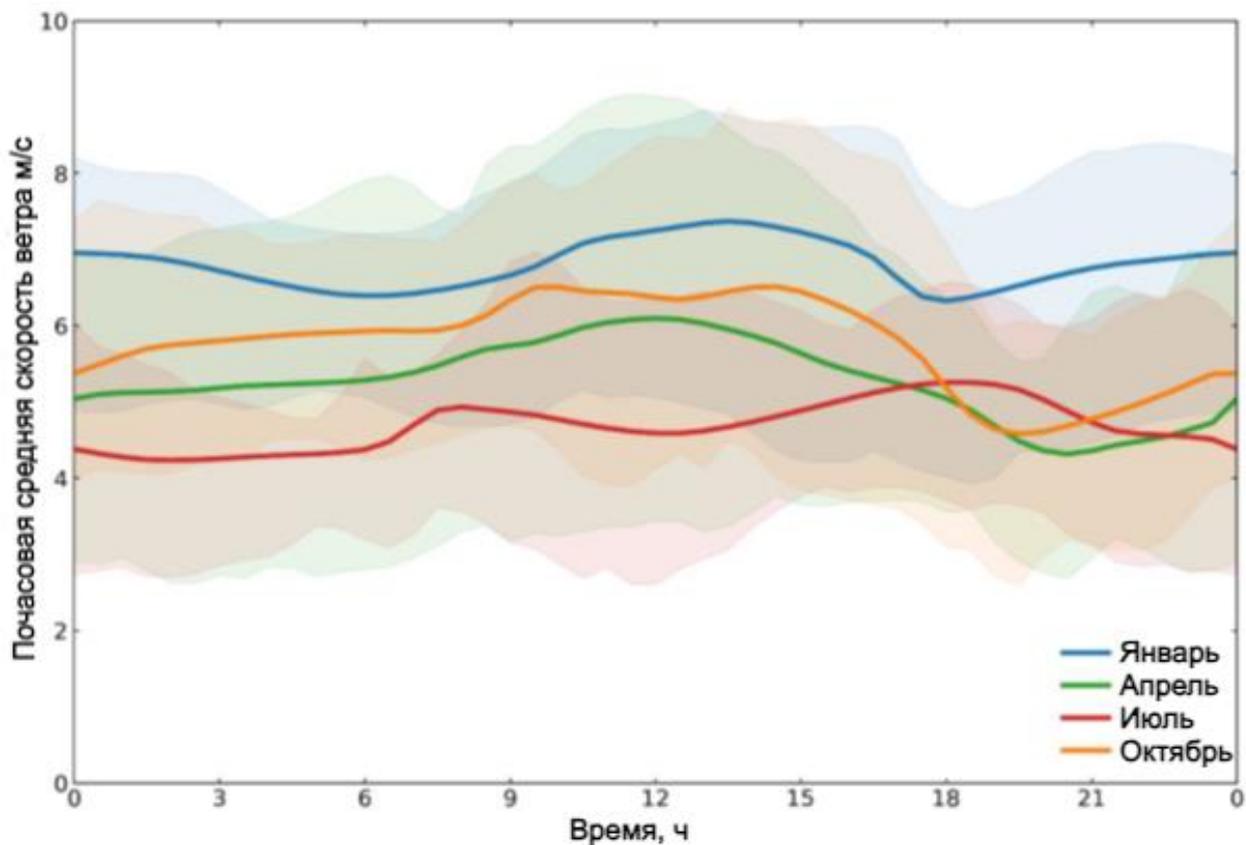


Рисунок 28б - Среднечасовая скорость ветра с интервалами от 25-го до 75-го и от 10-го до 90-го процентиля

Температура Окружающей Среды. Температура окружающей среды оказывает влияние на конвективные теплопотери через стеклянную поверхность и на проводящие теплопотери через бассейн солнечного дистиллятора. В осенние и летние месяцы (апрель, май, июнь, июль и август) температура окружающей среды повышалась с примерно 15 °С до около 39 °С в утренние часы (с 8:00 до 14:00). В зимние месяцы (октябрь, ноябрь, декабрь и январь) максимальная температура окружающей среды достигала около 20 °С. В вечерние часы, к 21:00, температура окружающей среды снижалась до значений между 0 и 10 °С.

Скорость Ветра. Скорость ветра влияет на теплопотери через стеклянную поверхность из-за конвекции и, как следствие, на производительность стекла. Было отмечено, что максимальная и минимальная скорость ветра составила около 11,9 м/с и 1,1 м/с соответственно. Кроме того, минимальные и максимальные изменения скорости ветра наблюдались в летние и зимние месяцы.

Изменение Температуры Стекла. Температура стекла имеет значительное влияние на производительность солнечного дистиллятора. Температура стекла зависит от солнечной радиации, температуры окружающей среды и скорости ветра. Наблюдалось, что температура стекла поднималась с  $10 \pm 1$  °С до  $53 \pm 1$  °С в утренние часы и снижалась до примерно  $10 \pm 1$  °С в послеобеденные часы. Максимальная температура стекла была зафиксирована во время пиковых часов солнечного освещения в летние месяцы. Скрытое тепло, выделяемое при конденсации водяного пара внутри солнечного дистиллятора, регенерировалось с помощью теплового насоса. Поверхность испарителя теплового насоса поддерживалась ниже точки росы водяного пара внутри солнечного дистиллятора, что приводило к более низкой температуре стекла по сравнению с традиционными солнечными дистилляторами.

Изменение Температуры Воды. Температура соленой воды в бассейне повышалась за счет предварительного нагрева в теплообменнике "оболочка и змеевик" и прямого поглощения солнечной энергии в бассейне. Наблюдалось, что температура соленой воды поднималась с  $20 \pm 1$  °С до максимальной температуры  $75 \pm 2$  °С в утренние часы (с 8:00 до 15:00) летних месяцев и снижалась до  $30 \pm 1$  °С к 21:00.

Изменение Температуры Испарителя. Поверхность испарителя поддерживалась ниже точки росы смеси водяного пара. Скрытое тепло, выделяемое при конденсации водяного пара, поглощалось испарителем теплового насоса и использовалось для предварительного нагрева соленой воды и для нагрева бытовой воды. Давление хладагента на выходе из компрессора варьировалось в диапазоне от 10,1 до 12,8 бар. Увеличение солнечного излучения приводило к повышению давления и нагрузки на испаритель. Вследствие этого давление в конденсаторе также увеличивалось под воздействием повышения солнечного излучения.

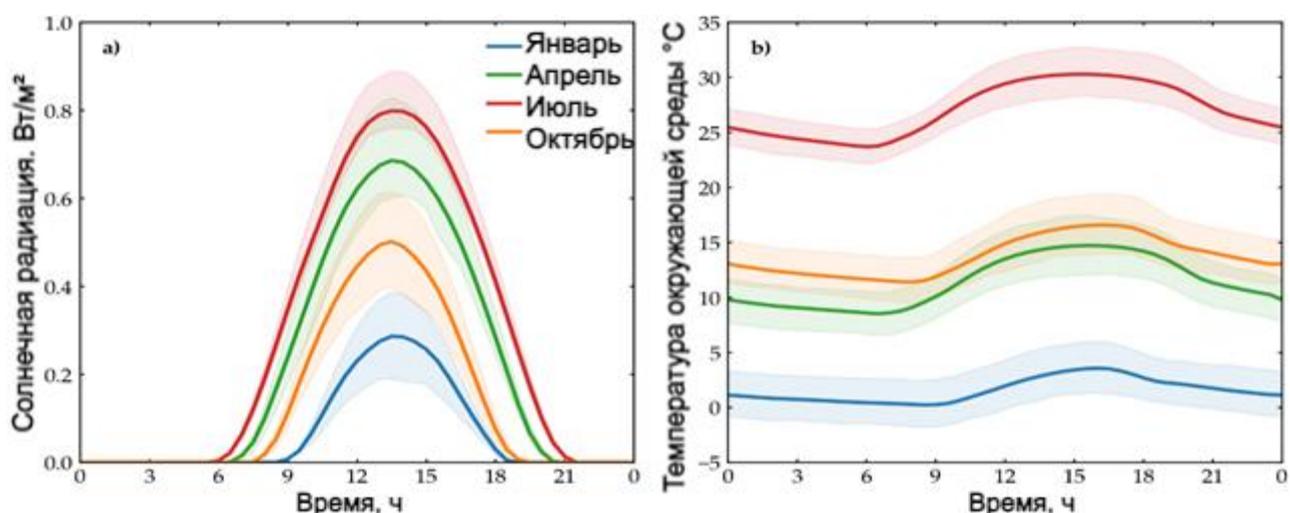


Рисунок 29 – Метеорологические данные для Актау в течение четырех сезонов: (а) Почасовая средняя солнечная радиация; (б) Почасовая средняя температура окружающего воздуха.

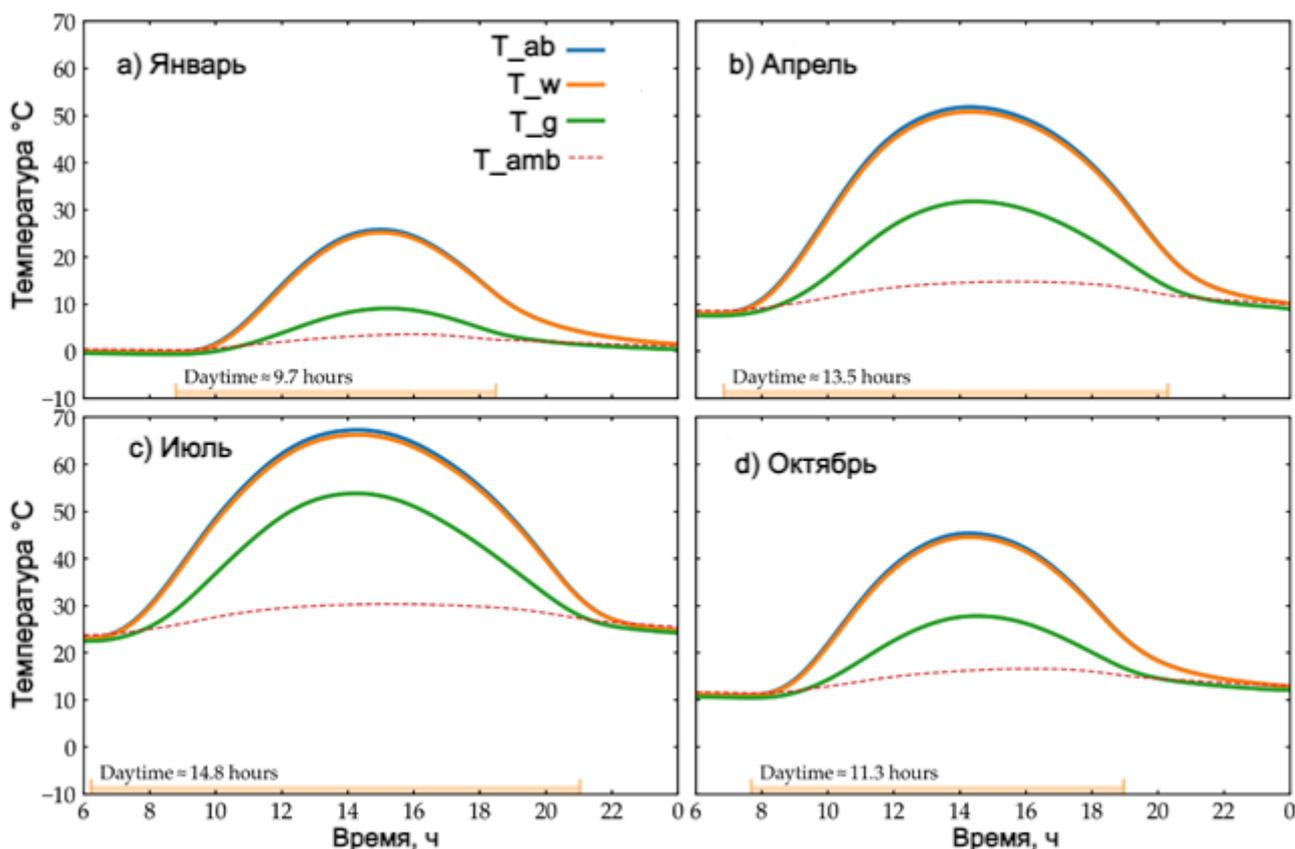


Рисунок 140 – Временные распределения температуры различных компонентов солнечного опреснителя в разные сезоны: (а) Январь; (б) Апрель; (с) Июль; (д) Октябрь.

#### 4.1 Результаты для Каспийского региона

В данном разделе представлены результаты расчетов для различных городов Каспийского региона с использованием разработанного алгоритма

расчета теплового баланса. В анализ включены города Актау и Атырау в Казахстане; Астрахань и Махачкала в России; Баку в Азербайджане; Тегеран в Иране; и Туркменбаши в Туркменистане. На рисунке 31 изображена карта Каспийского моря с отмеченными местоположениями указанных городов.

Из рассмотренных городов многие не сталкиваются с проблемами доступа к пресной воде благодаря их близости к крупным рекам: реке Урал (Жайык) для Атырау, реке Волга (Едил) для Астрахани, реке Терек для Махачкалы и реке Кура для Баку. Тегеран получает воду из меньших рек, таких как Лар и Карадж. В отличие от них, города Актау и Туркменбаши расположены в степных и пустынных регионах без доступа к речной воде, полагаясь исключительно на опреснение воды из Каспийского моря. Из-за роста населения спрос на большие объемы питьевой воды возрастает в таких городах, как Баку и Тегеран. Баку также зависит от Каспийского моря как источника питьевой воды. В Тегеране Иран использует Персидский залив, где расположены крупные установки по опреснению воды, и проложены водопроводные трубы вглубь страны.

Это исследование оценивает продуктивность, эффективность и стоимость дистиллированной воды, производимой с помощью солнечного опреснителя, с учетом климатических условий указанных городов. На рисунке 31 представлены метеорологические данные для этих городов, включая солнечную радиацию и температуру окружающего воздуха. Показанные данные являются дневными средними значениями за последние 13 лет, как указано в источнике [79]. Согласно представленным данным, Тегеран демонстрирует самые высокие уровни солнечной радиации во все сезоны, в то время как Атырау испытывает наименьшую солнечную радиацию в холодные сезоны, а Махачкала — в жаркие сезоны.

Оставшиеся города попадают в указанные диапазоны. Что касается температуры окружающего воздуха, Тегеран фиксирует самые высокие температуры во все сезоны, в то время как Атырау показывает наименьшие температуры в холодные сезоны, а Махачкала и Баку — в жаркие сезоны.

Рисунок 32 иллюстрирует среднюю дневную продуктивность для типичного дня в каждом месяце для различных городов. На рисунке показано, что Тегеран достигает наивысшей продуктивности, Атырау демонстрирует наименьшую продуктивность в холодные сезоны, а Махачкала — в жаркие сезоны.

Максимальная продуктивность в Тегеране достигает  $8,47 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$  в июне, тогда как минимальная продуктивность составляет  $1,76 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$  в январе. Максимальная продуктивность в Атырау составляет  $6,61 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$  в июне, а в Махачкале —  $5,69 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$ . Минимальная продуктивность в Атырау наблюдается в январе и составляет  $0,28 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$ , а в Махачкале —  $0,80 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$ . Результаты подтверждают, что продуктивность солнечного опреснителя довольно низка, особенно в холодные сезоны во всех этих городах.

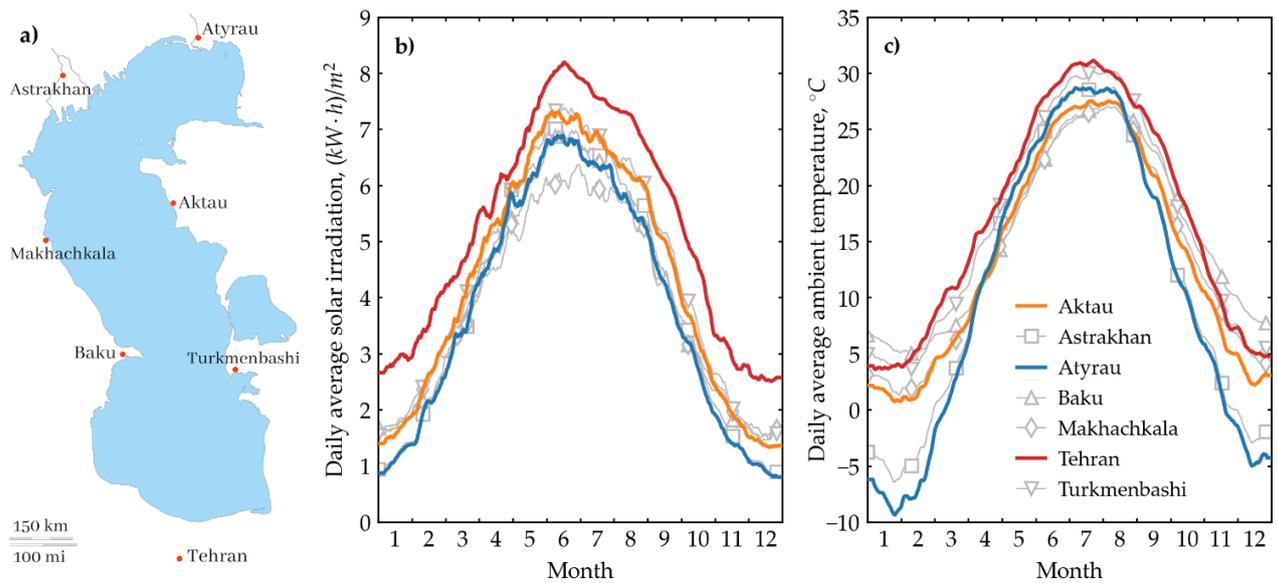


Рисунок 151 – Метеорологические данные для (а) прибрежных городов вдоль Каспийского моря: (б) Солнечная радиация; (с) Температура окружающего воздуха.

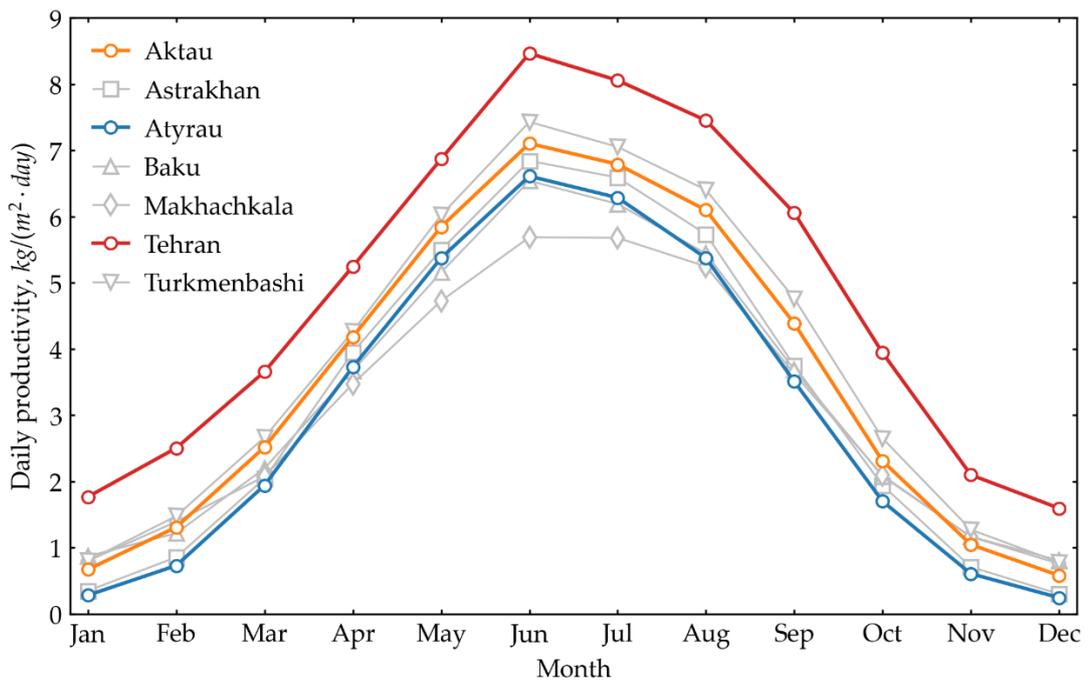


Рисунок 162 – Дневная продуктивность для представительного дня каждого месяца в различных городах

Поэтому имеет смысл сочетать солнечные опреснители с другими тепловыми системами опреснения для повышения продуктивности и декарбонизации существующих систем теплового опреснения на ископаемом топливе.

Рисунок 33 показывает изменение температуры различных частей солнечного опреснителя с поддержкой теплового насоса в течение дня февраля.

На этом рисунке яркие цвета указывают температуры с учетом работы теплового насоса, тогда как тусклые линии представляют данные без теплового насоса.

В случае без теплового насоса кривые постепенно увеличиваются в начале дня, достигают максимума между 15:00 и 16:00 и затем постепенно уменьшаются. С тепловым насосом температуры меняются колебательно, исключая температуру окружающей среды. Максимальная температура поглотительной пластины достигает 17,06 °С, а минимальная составляет 0,68 °С без теплового насоса. Максимальная температура воды без теплового насоса составляет 16,65 °С, а минимальная — 0,65 °С. Более высокая температура поглотительной пластины по сравнению с водой может быть объяснена относительно высоким коэффициентом поглощения черной краски. Замечено, что температура стеклянной крышки ниже температуры воды. Это связано с конвективным теплообменом с окружающим воздухом и эффектом испарителя теплового насоса. Максимальная температура стеклянной крышки без теплового насоса составляет 6,47 °С, а с тепловым насосом — -0,38 °С. Колебательная структура изменения температуры воды и поглотителя в присутствии теплового насоса связана с рабочими условиями компонента «Switch», описанного выше. Максимальная температура поглотительной пластины с тепловым насосом достигает 6,96 °С, а минимальная составляет 0,68 °С. Максимальная температура воды с тепловым насосом составляет 6,29 °С, а минимальная — 0,65 °С.

Для сравнения, рисунок 34 показывает аналогичные распределения температур в июле. В июле из-за более высоких температур окружающей среды тепловой насос работает дольше и стабильнее, что видно из распределения температур, которое колеблется меньше, чем в феврале. Летом температуры компонентов солнечного дистиллятора с тепловым насосом значительно выше, чем зимой. См. Таблицу 3 для максимальных и минимальных температур.

Таблица 3 – Значение температур компонентов в зависимости от времени

Температура/°С	Без теплового насоса				С тепловым насосом			
	Февраль		Июль		Февраль		Июль	
	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс
Стекло	-0,38	6,47	24,47	43,80	-0,38	4,27	24,47	35,83
Вода	0,65	16,65	25,85	58,63	0,65	6,29	25,85	46,06
Абсорбер	0,68	17,06	25,90	59,62	0,68	6,96	25,90	47,11
Окружающая среда	-0,60	3,73	23,91	29,66	-0,60	3,73	23,92	29,66

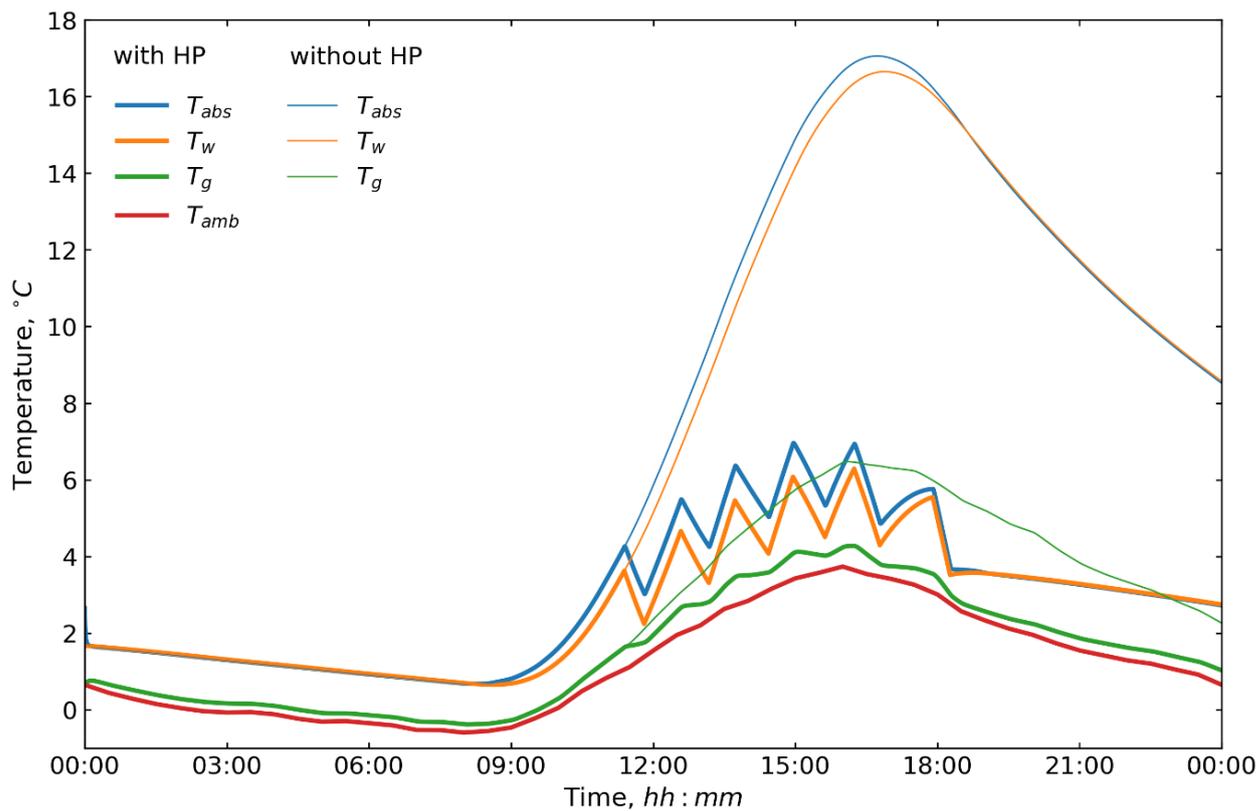


Рисунок 33 – Изменение температуры различных частей солнечного дистиллятора с тепловым насосом и без теплового насоса, в феврале.

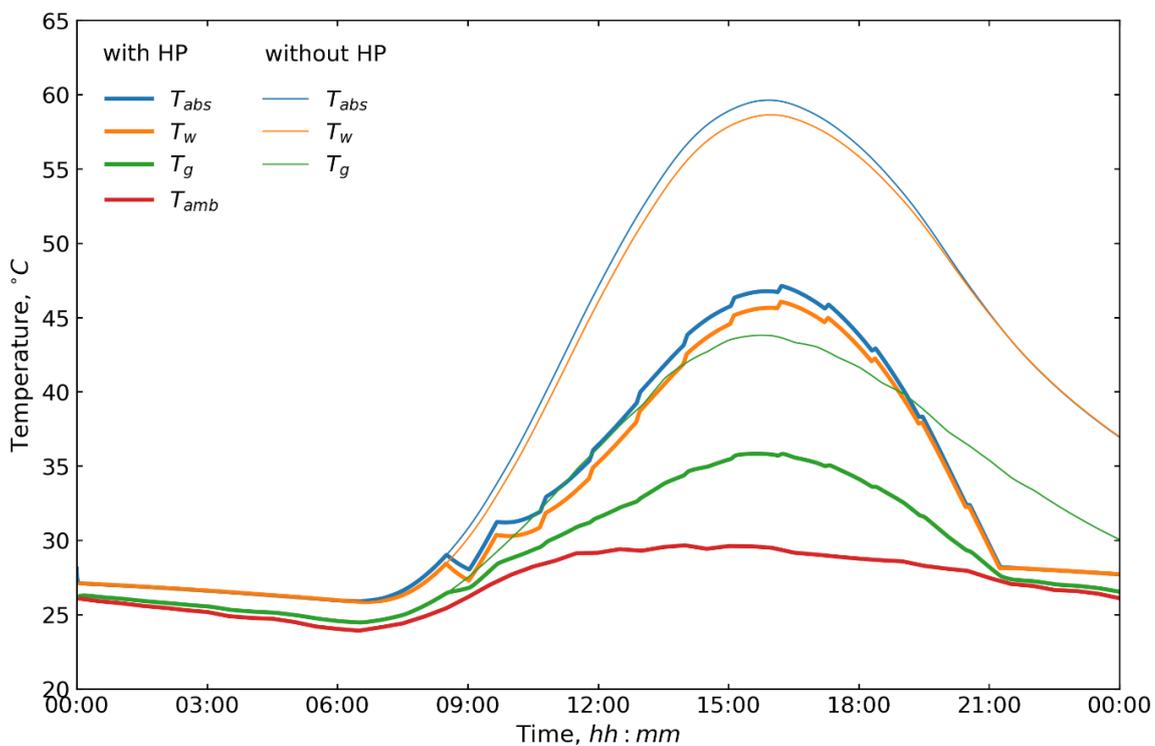


Рисунок 17 – Изменение температуры различных частей солнечного опреснителя с тепловым насосом и без теплового насоса, в июле

Рисунок 35 и 36 показывает распределение тепловых потоков между стеклом и другими компонентами солнечного опреснителя на основе теплового насоса. Соответственно, Рисунок 35 представляет февраль, а Рисунок 36 — июль.

- $\dot{Q}_{s-g}$  — это тепловой поток между солнцем и стеклом,
- $\dot{Q}_{w-g}$  — это тепловой поток между водой и стеклом,
- $\dot{Q}_{g-amb}$  — это тепловой поток между стеклом и окружающим воздухом.

Эти тепловые потоки соответствуют компонентам из уравнения (1):

$$\dot{Q}_{g-amb} = h_{r.g-amb} A_g (T_g - T_{amb}), \quad \dot{Q}_{w-g} = h_{t.w-g} A_w (T_w - T_g) \quad \dot{Q}_{s-g} = \alpha'_g I(t) A_g$$

Поскольку эти формулы зависят от температуры, их изменения подобны изменениям температуры. Аналогичным образом, при наличии теплового насоса скачки, вызванные работой испарителя, также отражаются в тепловом потоке. Их максимальные и минимальные значения фиксируются одновременно с соответствующими температурами. Сравнение максимальных и минимальных значений тепловых потоков в среднем за дни февраля и июля представлено в Таблице 4.

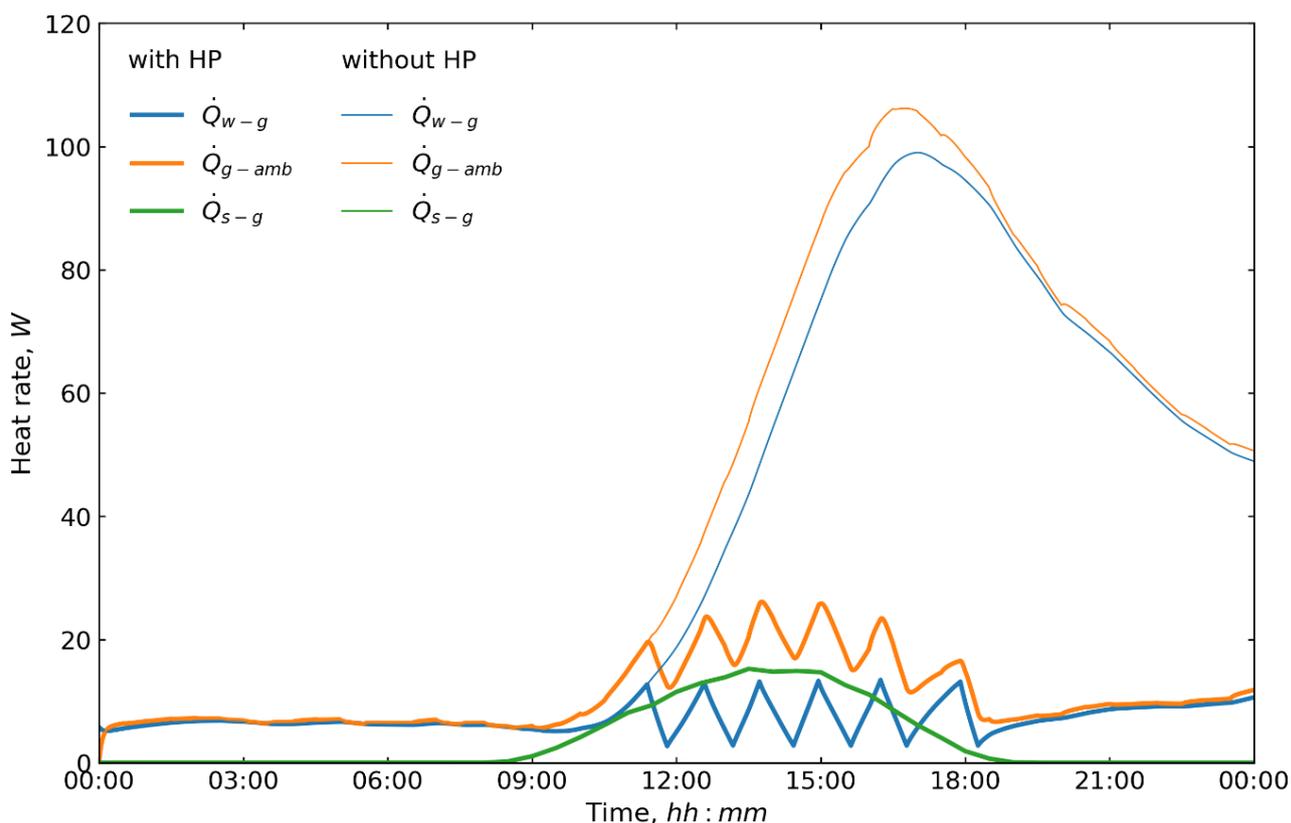


Рисунок 35 – Тепловой поток различных компонентов дистиллятора с тепловым насосом и без теплового насоса, в феврале

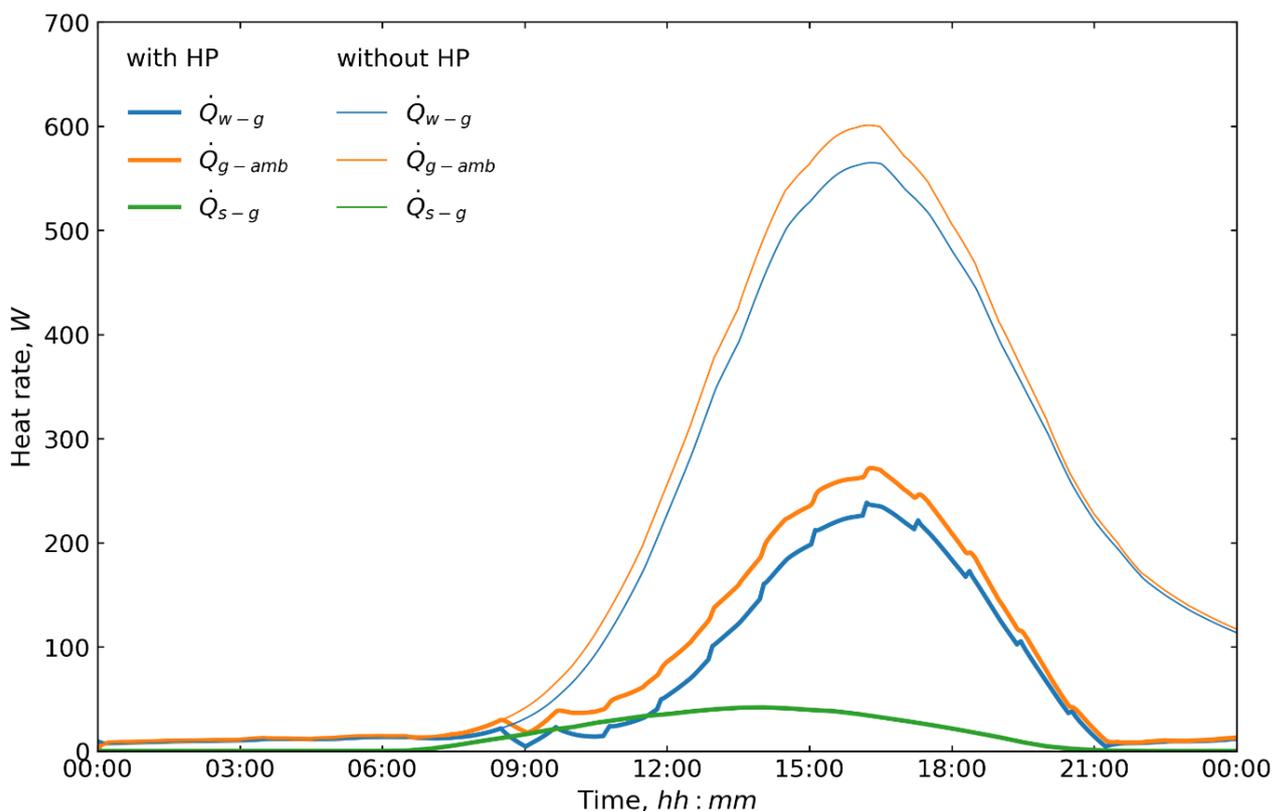


Рисунок 36 – Тепловой поток различных компонентов дистиллятора с тепловым насосом и без теплового насоса, в июле

Таблица 4 – Сравнение тепловых потоков

Тепловой поток/W	Без теплового насоса				С тепловым насосом			
	Февраль		Июль		Февраль		Июль	
	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс	Мин	Макс
$\dot{Q}_{s-g}$	0.0	15.24	0.0	43,80	-0,38	4,27	24,47	35,83
$\dot{Q}_{w-g}$	5.12	99.02	7.48	58,63	0,65	6,29	25,85	46,06
$\dot{Q}_{g-amb}$	0.65	106.18	0.94	59,62	0,68	6,96	25,90	47,11

Рисунок 37 и 38 показывают скорости теплопередачи между компонентами системы регенерации солнечного опреснителя на основе теплового насоса и солнцем. *Irrad* - это солнечная радиация,  $\dot{Q}_{s-g}$  - скорость теплопередачи между солнечной радиацией и стеклом,  $\dot{Q}_{s-w}$  - между солнечной радиацией и водой, а  $\dot{Q}_{s-abs}$  - между солнечной радиацией и пластиной. Скорости теплопередачи аналогичны графику солнечной радиации и вычисляются по тем же формулам, что и на предыдущих рисунках 35 и 36. Они достигают своих максимальных значений в тот момент, когда солнечная радиация достигает максимального значения. На основании сравнения можно сделать вывод, что солнечная радиация выше

летом, чем зимой. В Таблице 5 сравниваются максимальные скорости теплопередачи от солнца для среднего дня в феврале и июле. Поскольку скорость теплопередачи от солнечной радиации не может быть отрицательной, ее минимальное значение в обоих случаях будет равно нулю, что означает отсутствие излучательной теплопередачи от солнца.

Таблица 5 – Сравнение тепловых потоков

Тепловой поток/W	Февраль	Июль
$\dot{Q}_{s-g}$	15.24	41.95
$\dot{Q}_{s-w}$	77.41	213.11
$\dot{Q}_{s-abs}$	171.59	472.40
<i>Irrad</i>	299.88	825.61

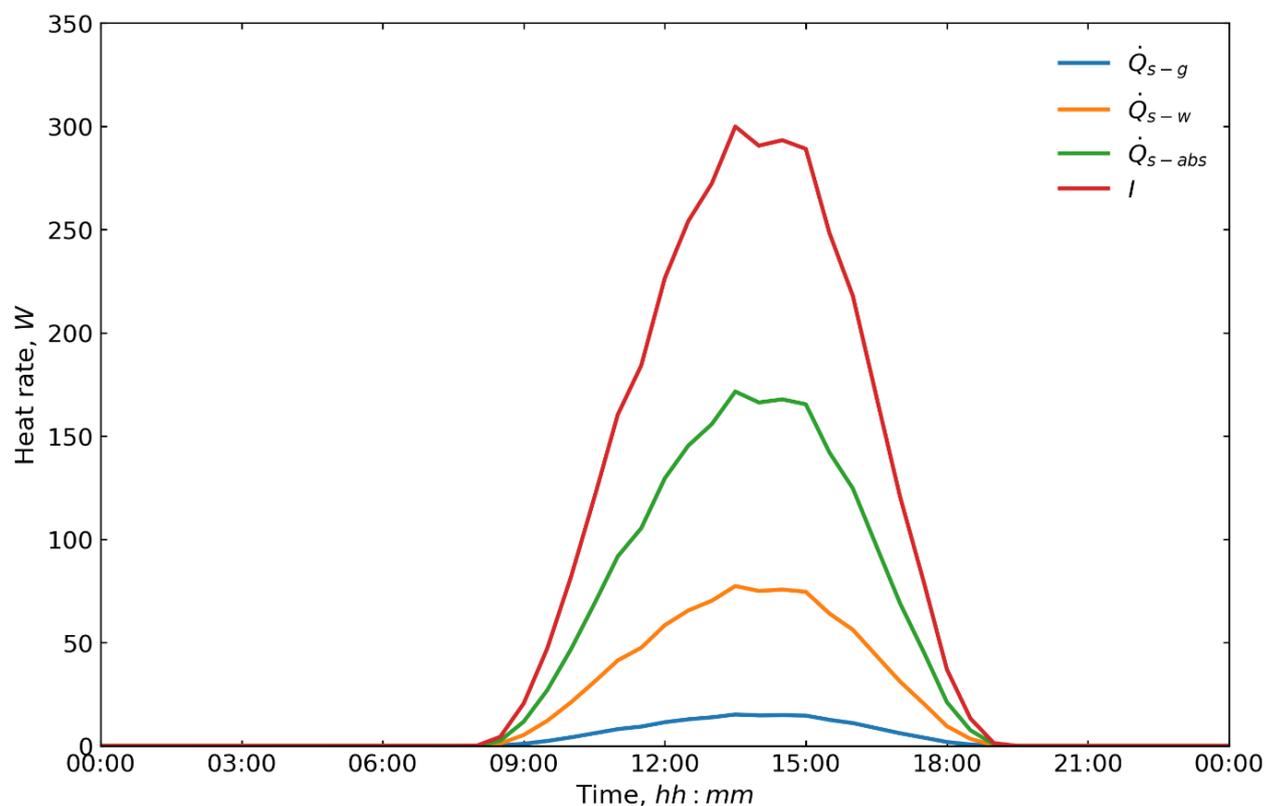


Рисунок 37 – Теплопередача между солнцем и системой солнечной дистилляции с тепловым насосом, в феврале

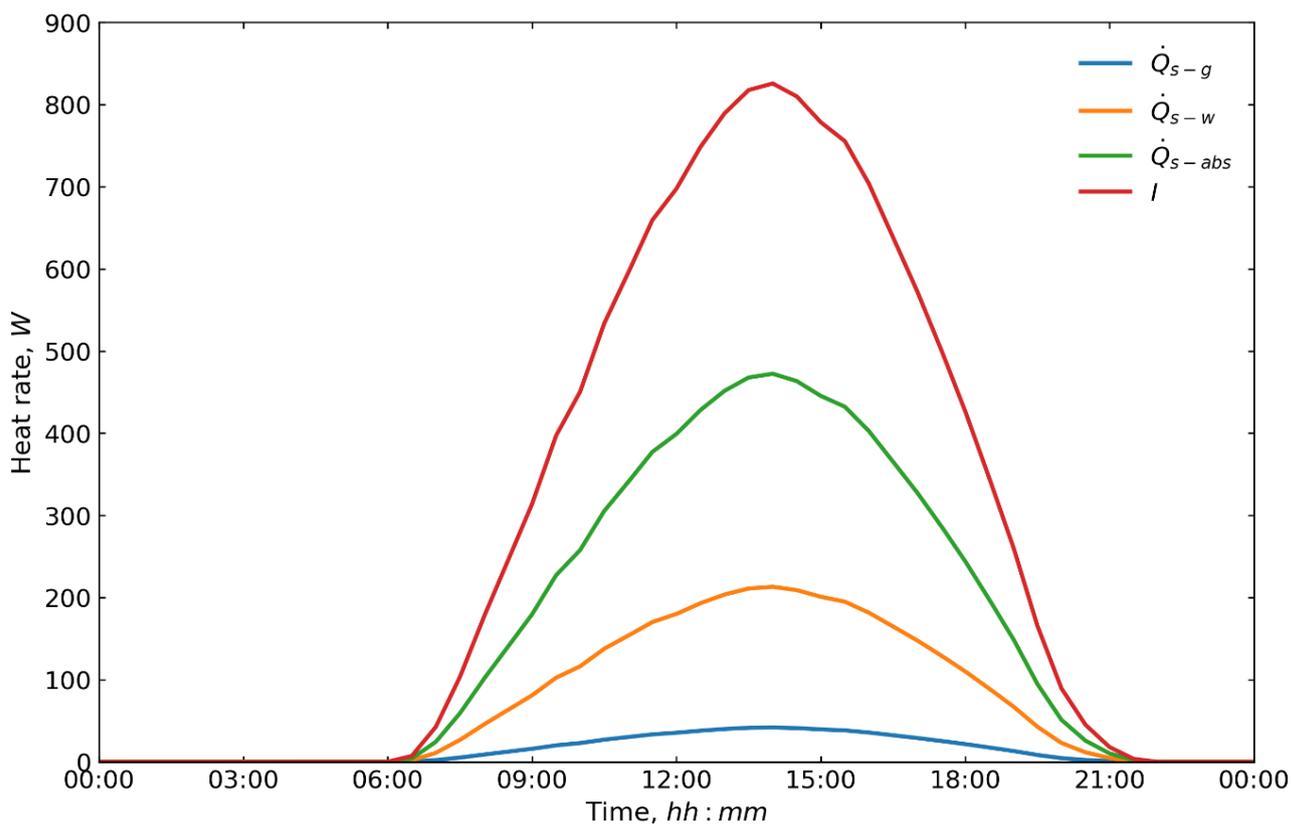


Рисунок 38 – Теплопередача между солнцем и системой солнечной дистилляции с тепловым насосом, в июле

#### 4.2 Анализ Продуктивности

Рисунки 39 и 40 показывают динамическое изменение производительности во времени. Согласно этому рисунку, синие линии представляют систему с тепловым насосом, оранжевые - без него. Максимальные значения наблюдаются в интервале 16:00-17:00. Это связано с тем, что в это время температуры воды и абсорбирующей пластины достигают своих максимальных значений, превышая показатель скрытой теплоты воды, что приводит к интенсивному испарению.

При включении теплового насоса числитель в уравнении (14) увеличивается за счёт теплового потока от испарителя, что улучшает производительность. Поэтому, при включении испарителя наблюдаются резкие скачки значений, однако одновременно с этим снижаются температуры воды и абсорбирующей пластины (33). Как видно из рисунков 39, 40 при отключении испарителя наблюдается падение ниже значений производительности без испарителя. Испаритель включается и выключается в соответствии с переключателем.

Из рисунков 39 и 40 видно, что зимой испаритель включается 6 раз с общим временем работы 3.3 часа, а летом — 12 раз с общим временем работы 11.23 часа. Максимальные значения динамической производительности для февраля составляют  $0.0043$  [г/(м<sup>2</sup>·30с)], а для июля —  $0.0067$  [г/(м<sup>2</sup>·30с)], минимальное значение для обоих случаев — ноль.

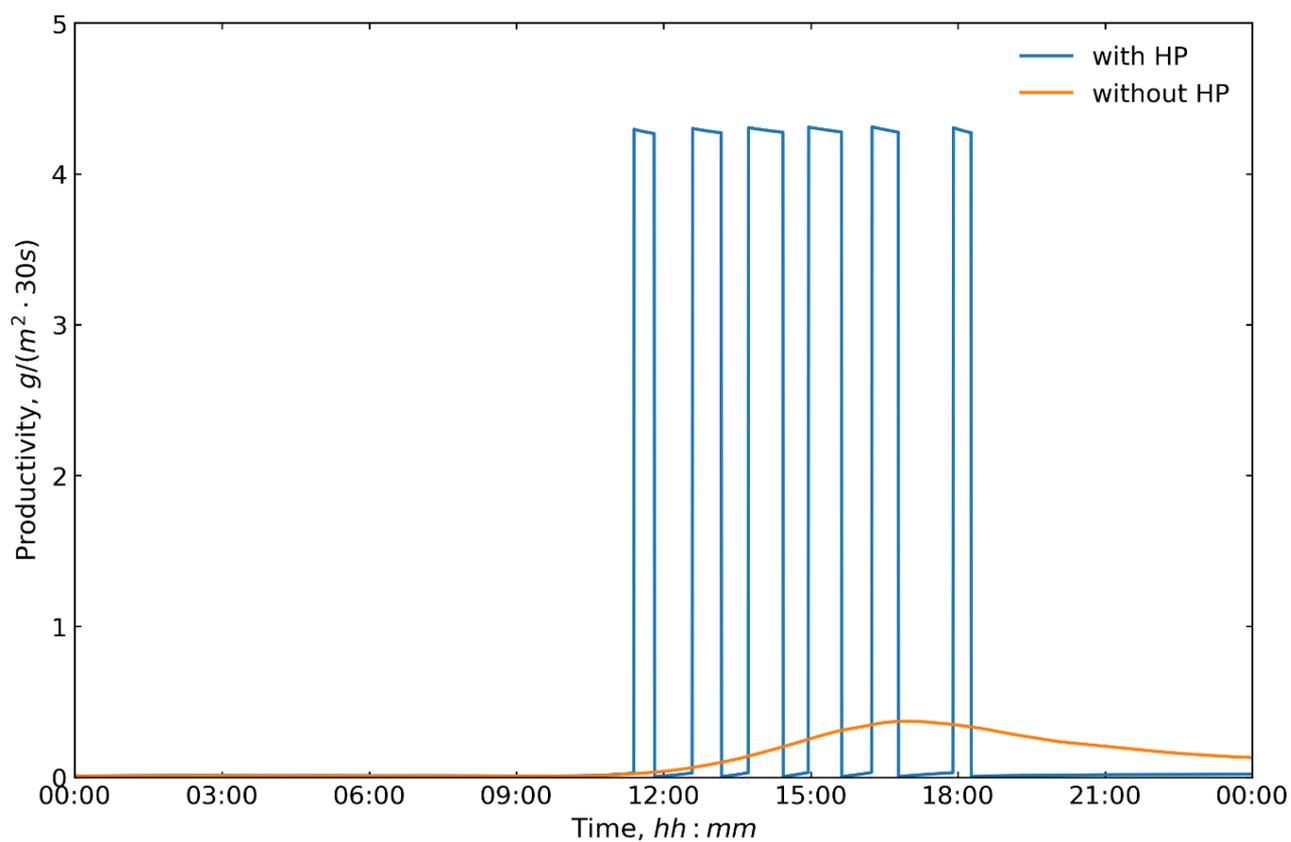


Рисунок 39 – Продуктивность, Февраль

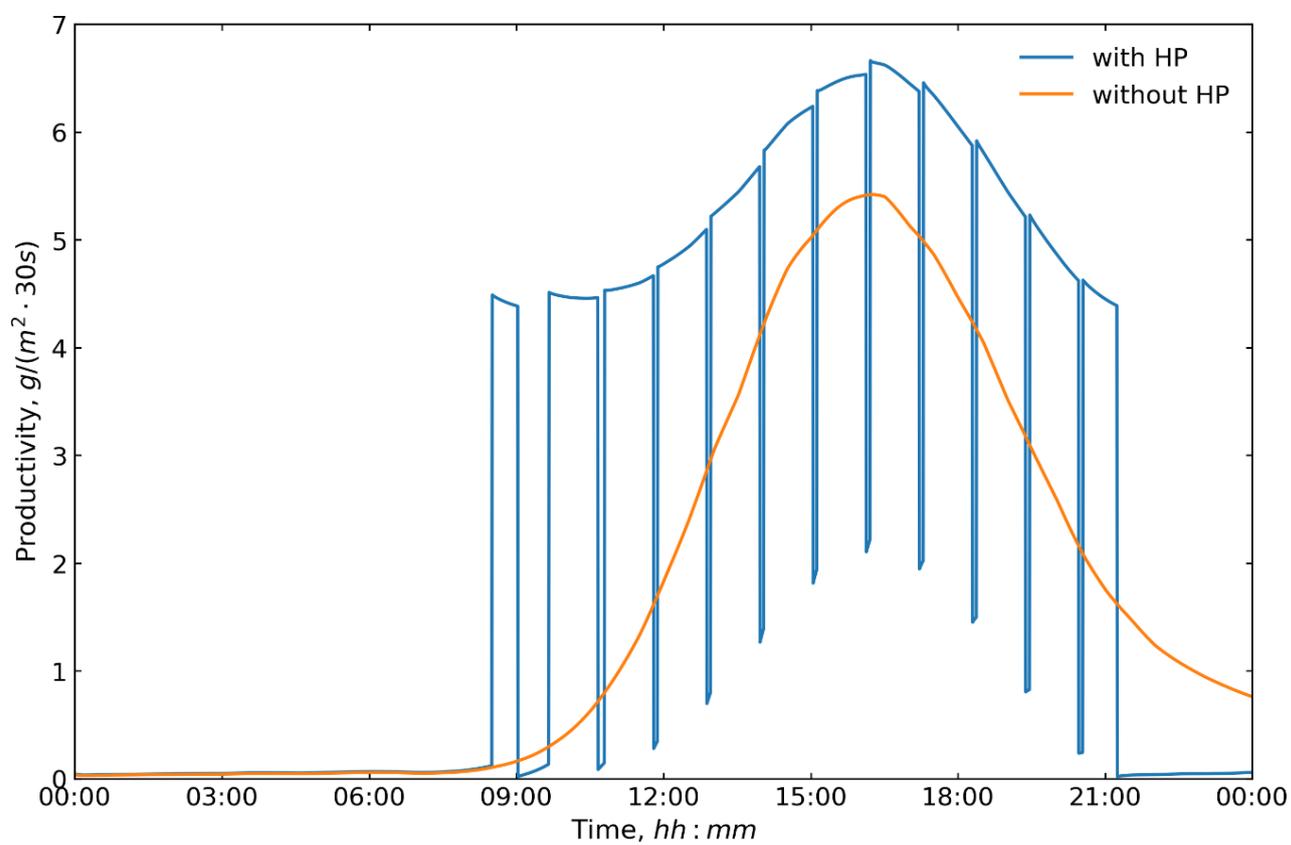


Рисунок 40 – Продуктивность, Июль

Рисунок 41 показывает накопленное значение производительности. Согласно рисунку, синие линии соответствуют системе с тепловым насосом, а оранжевые - без него. В конце рисунка 12 общая дневная производительность для системы без теплового насоса составляет  $0.34 \text{ [кг/(м}^2 \cdot 30\text{с)]}$ , а с тепловым насосом -  $1.73 \text{ [кг/(м}^2 \cdot 30\text{с)]}$  для февраля. Эти показатели в июле составляют  $7.45 \text{ [кг/(м}^2 \cdot 30\text{с)]}$  и  $4.98 \text{ [кг/(м}^2 \cdot 30\text{с)]}$  соответственно.

Согласно численным результатам, разработанная математическая модель и алгоритм расчетов подтвердили логические ожидания увеличения производительности при включении теплового насоса. Из рисунка 42 можно заключить, что тепловой насос увеличивает производительность системы более чем в 4.3 раза в феврале и в 1.5 раза в июле.

Рисунки 43 и 44 показывают производительность солнечного опреснителя на основе теплового насоса в зависимости от глубины воды и толщины изоляции. Из графиков можно сделать вывод, что зависимость между ними имеет экспоненциальную форму. Производительность максимальна при наименьшей глубине, так как вода может быстрее испаряться. Однако вода едва удерживает температуру и быстро передает тепло окружающим компонентам. Максимальная производительность достигается при глубине воды менее 0.1 м. Другие авторы [58,69] получили аналогичные результаты. В нашем случае для расчетов использовалась глубина 0.5 см, а для проверки — 6.0 и 10.0 см. Согласно рисунку 44, толщина изоляции свыше 10.0 см мало влияет на производительность. В расчетах была принята толщина 5.0 см на основе многочисленных экспериментальных работ других авторов [58,69].

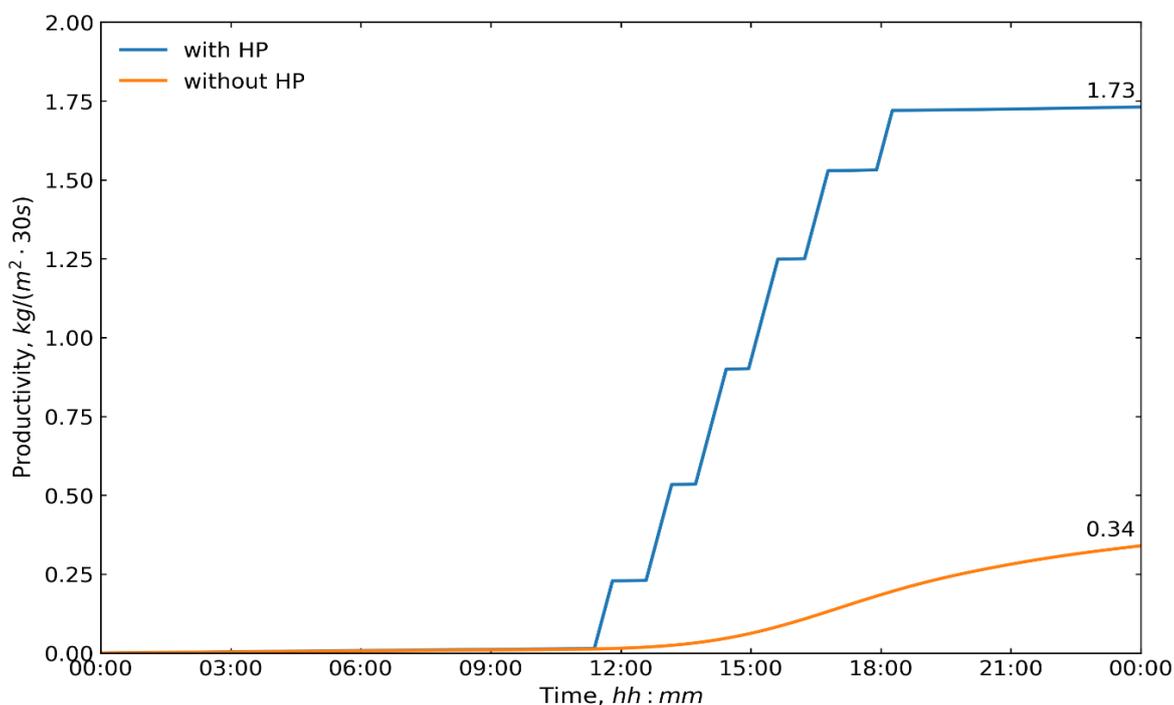


Рисунок 41 – Совокупная производительность за февраль

Максимальная продуктивность наблюдалась в интервале с 15:00 до 16:00, так как в это время солнечный дистиллятор достигал стационарных условий работы. Максимальная часовая продуктивность 1,73 кг/ч была зафиксирована в пиковые часы солнечного освещения в мае, что обусловлено быстрым испарением воды в бассейне и активным осушением водяного пара на поверхности испарителя теплового насоса. Максимальная часовая продуктивность, наблюдаемая в этом исследовании, оказалась выше, чем в предыдущем исследовании [69].

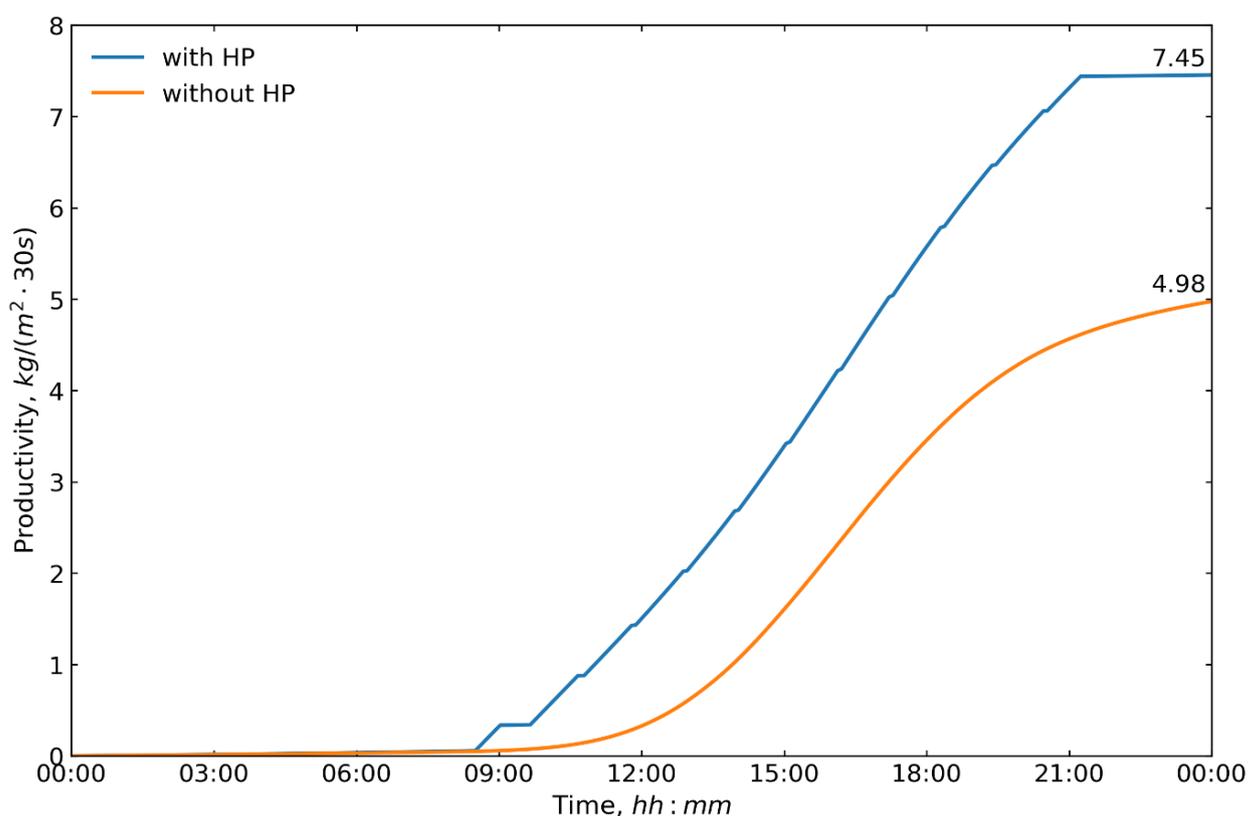


Рисунок 42 – Совокупная производительность за июль

Рисунок 45 иллюстрирует как мгновенную, так и накопленную производительность пресной воды в течение четырех сезонов года. Данные о распределении температуры предоставляют информацию о внутреннем теплообмене в солнечном испарителе, но график производительности дает более полное представление о сезонной эффективности системы. Мгновенная Производительность (рисунок 45а).

• Распределение и Пиковые Значения: Распределение мгновенной производительности тесно связано с распределением солнечной радиации. Пиковые значения мгновенной производительности соответствуют пиковым значениям солнечной радиации, которые наблюдаются между 12:00 и 15:00.

- Январь: 1.1 г/(м<sup>2</sup>·30с)
- Апрель: 5.3 г/(м<sup>2</sup>·30с)
- Июль: 7.6 г/(м<sup>2</sup>·30с)

- Октябрь:  $3.4 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot 30\text{с})$
- Сезонные изменения: более 90% производительности накоплено в области под графиком мгновенной производительности. Размер этой области меняется в зависимости от продолжительности дня в каждом сезоне. Накопленная Производительность (рисунок 45б).

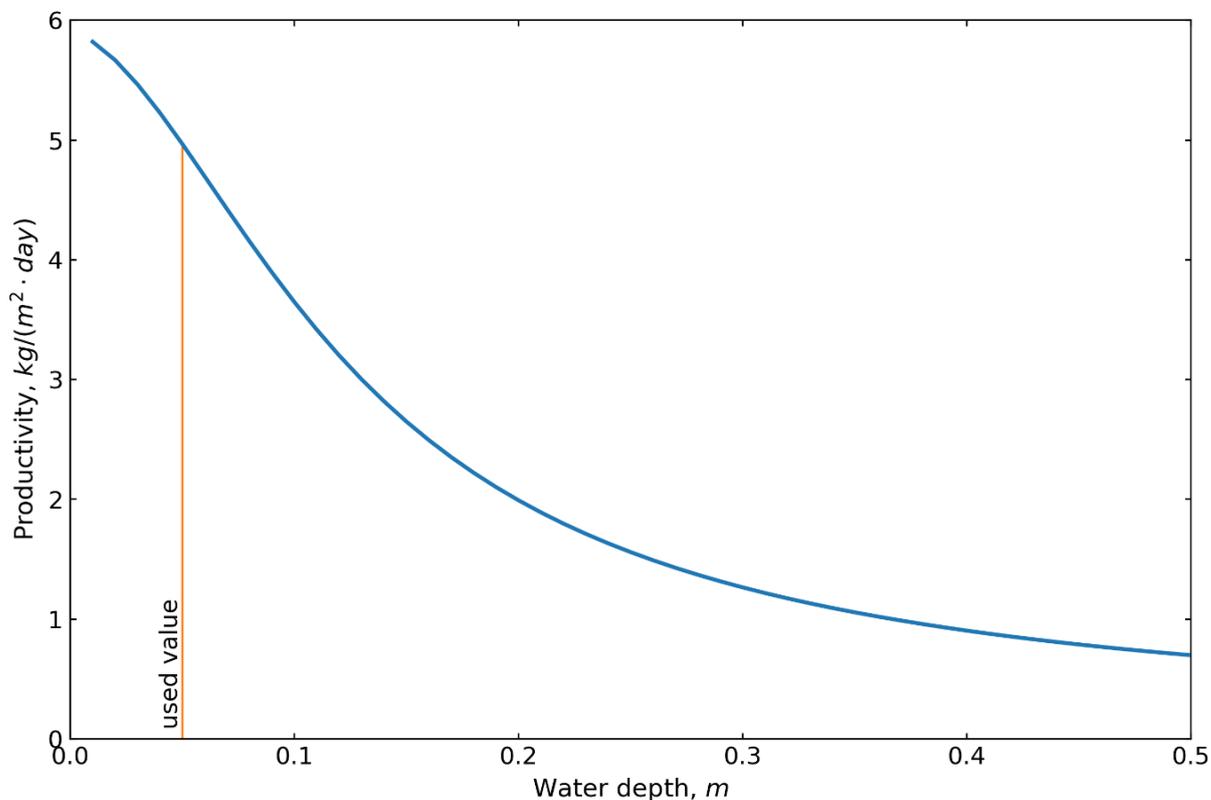


Рисунок 43 – Производительность солнечной опреснительной установки в зависимости от толщины воды

- Ежедневное накопление: Накопленная производительность, отражающая общее количество воды, произведенной в течение дня, достигает своего максимума на закате.
  - Январь:  $0.63 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$
  - Апрель:  $4.14 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$
  - Июль:  $6.75 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$
  - Октябрь:  $2.25 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$
- Изменения после заката: накопленная производительность может немного увеличиваться после заката. Например, в июле накопленная производительность в конце дня составляет  $6.77 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$  по сравнению с  $6.75 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$  на закате.
- Сезонная эффективность: Результаты показывают, что производительность системы в холодные сезоны низкая. Поэтому рекомендуется рассмотреть возможность интеграции солнечного испарителя с другими

ТЕПЛОВЫМИ СИСТЕМАМИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ.

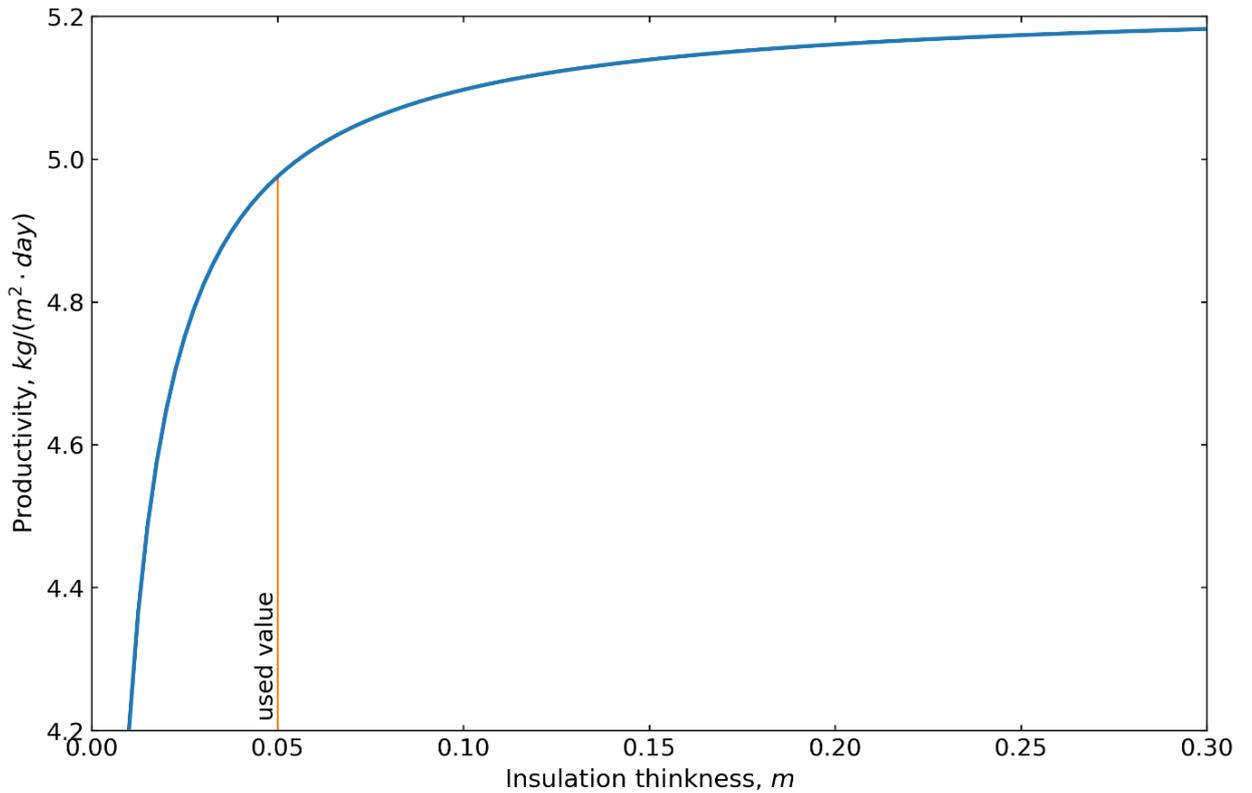


Рисунок 44 – Производительность солнечной опреснительной установки в зависимости от толщины изоляции

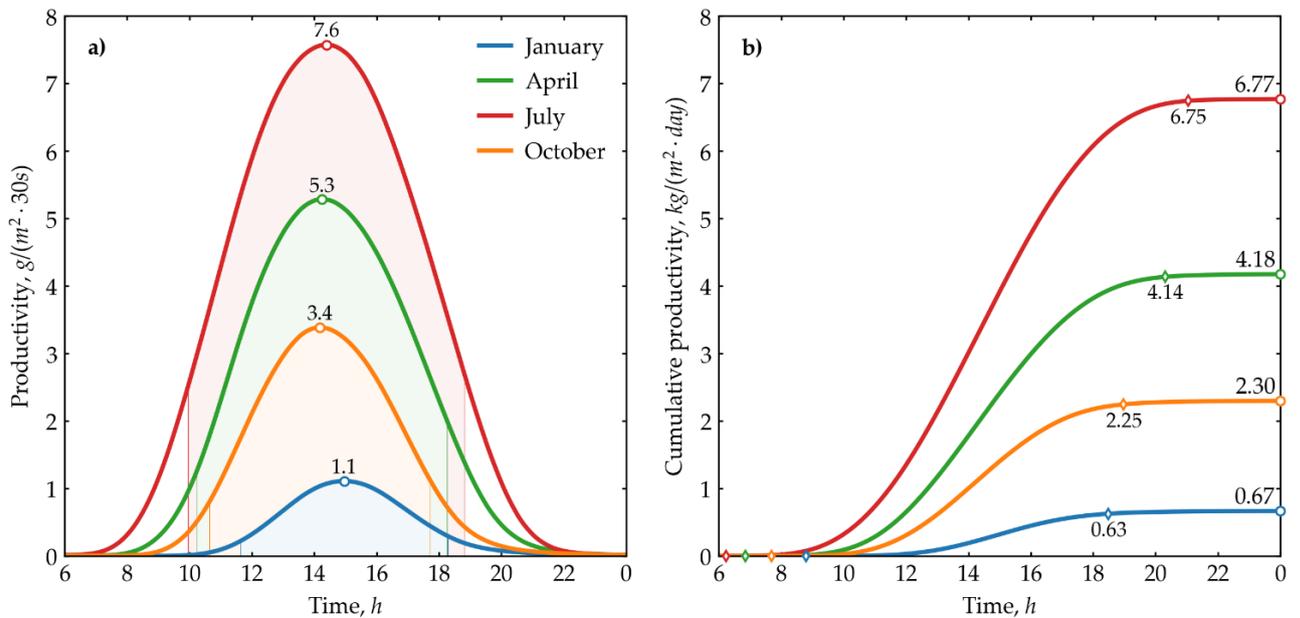


Рисунок 45 – Временное распределение (а) мгновенной и (б) накопительной продуктивности

## Влияние Глубины Воды в Бассейне и Толщины Изоляции (рисунок 46)

### 1. Глубина Воды:

○ Меньшая глубина: наибольшая производительность наблюдается при меньшей глубине воды из-за более быстрых темпов испарения. Однако такие мелкие глубины менее эффективны в удержании тепла, что приводит к быстрому теплообмену с окружающими компонентами.

▪ Пример: в июле при глубине 2 см нормированная дневная производительность составляет 97% от максимума, в то время как в январе - 80%. При глубине 4 см в июле нормированная производительность составляет 88%, а в январе - 57%.

○ Большая глубина: при увеличении глубины воды производительность уменьшается. Эти результаты подтверждают предыдущие находки о том, что с увеличением глубины бассейна производительность снижается.

### 2. Толщина Изоляции:

○ Изоляция: влияние толщины изоляции, варьирующейся от отсутствия изоляции до 10 см, было изучено. Производительность была нормирована относительно минимального значения производительности при всех указанных толщине изоляции.

▪ В июле толщина изоляции 4 см увеличивает нормированную дневную производительность в 3,24 раза. Дополнительное увеличение толщины на 1 см дает менее 5% прирост производительности. Аналогичные значения в апреле и октябре с 6 см изоляции составляют 5,53 и 5,39 соответственно. В январе при 9 см изоляции производительность возрастает в 7,13 раз, при этом дальнейшее увеличение толщины дает менее 5% прирост.

○ Оптимальная толщина: эти результаты показывают, что толщина изоляции оказывает значительное влияние на производительность в холодные сезоны. На основе параметрического анализа можно сделать вывод, что для достижения оптимальной производительности в континентальном климате Актау глубина воды в бассейне должна составлять примерно 2 см, а толщина изоляции должна находиться в пределах от 4 до 9 см.

**(а) Глубина воды.** Зависимость продуктивности солнечного дистиллятора от глубины воды показывает, как изменение глубины воды в резервуаре влияет на эффективность производства пресной воды. Как правило, продуктивность повышается при меньшей глубине воды из-за более быстрого испарения. Однако слишком мелкая глубина может привести к недостаточному удерживанию тепла, что снижает общую эффективность. Результаты показывают, что при глубине воды менее 0,1 метра продуктивность достигает наивысших значений, тогда как увеличение глубины до 0,5 метра и более может снизить продуктивность, поскольку вода хуже сохраняет тепло и быстрее передает его окружающим компонентам.

**(б) Толщина утеплителя.** Зависимость продуктивности от толщины утеплителя демонстрирует, как изменение толщины утеплителя влияет на эффективность системы. Увеличение толщины утеплителя, как правило, способствует улучшению продуктивности за счет уменьшения потерь тепла. В зимние месяцы, когда температура окружающей среды низкая, эффективность

утеплителя особенно заметна. Результаты показывают, что увеличение толщины утеплителя до определенного уровня значительно повышает продуктивность. Например, при толщине утеплителя 4 см в жаркий период года продуктивность может увеличиться в несколько раз, но дальнейшее увеличение толщины оказывает меньшее влияние. В холодные месяцы, такая же толщина утеплителя также ведет к значительному повышению продуктивности, однако дальнейшее увеличение толщины утеплителя приносит только небольшое улучшение.

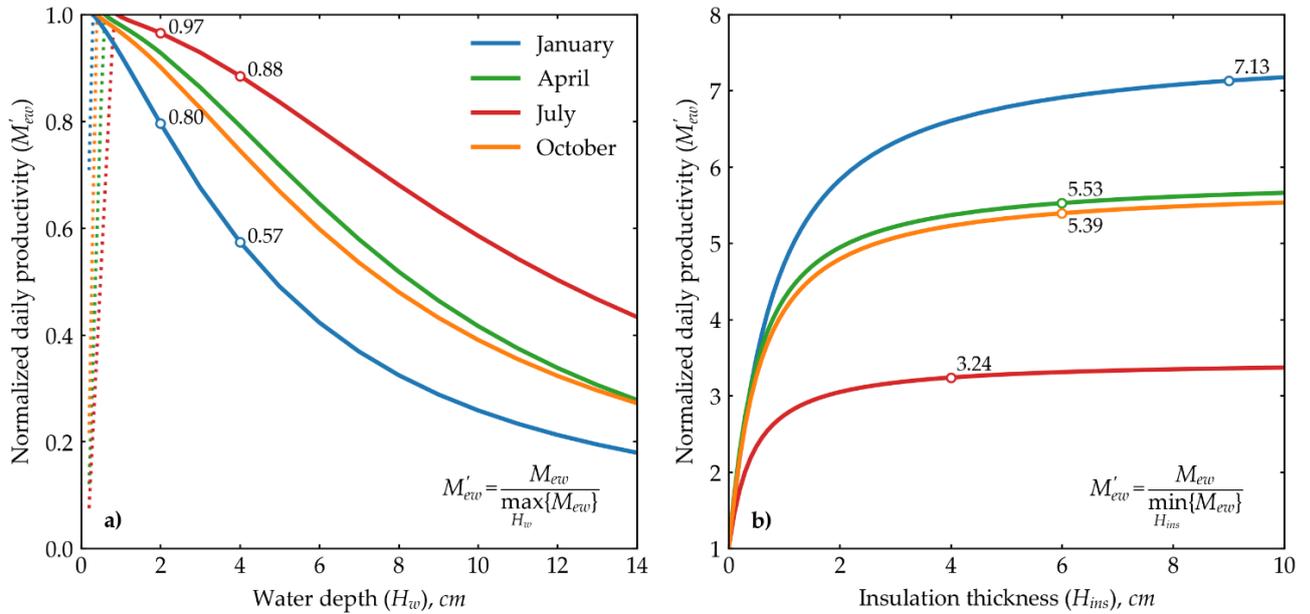


Рисунок 46 – Зависимость продуктивности солнечного дистиллятора от таких параметров, как: (а) Глубина воды; (б) Толщина утеплителя.

Рисунок 47 иллюстрирует временные изменения температуры различных компонентов солнечного опреснителя с тепловым насосом при конфигурациях Тип 1, Тип 2 и традиционной системы солнечного опреснителя без теплового насоса. На Рисунке 47а показаны изменения температуры отдельных компонентов в солнечного опреснителя с тепловым насосом в течение дня в январе. На основе полученных численных данных изменения температур  $T_{abs}$ ,  $T_g$  и  $T_w$  демонстрируют аналогичные тенденции как в традиционной солнечной системе, так и в конфигурации Тип 2. Эти тенденции характеризуются постепенным повышением в течение дня, достигая пиковых значений обычно между 15:00 и 16:00, после чего следует постепенное снижение. В отличие от этого, температурное распределение в конфигурации Тип 1 значительно отличается от предыдущих двух конфигураций. Это различие связано с использованием ролл-бонд испарителя в Типе 1, который поглощает тепло от испарённой воды в бассейне солнечного опреснителя и передаёт его для нагрева воды в баке.

Максимальная рассчитанная температура воды составляет 5,23 °C для Типа 1, 32,29 °C для Типа 2 и 26,67 °C для солнечного дистиллятора. В январе отсутствие предварительного подогрева воды привело к снижению температуры

воды в бассейне на 83,80% по сравнению со случаями, когда предварительный подогрев применялся. Рисунки 47b–d показывают стабильное распределение температур в течение времени для апреля, июля и октября соответственно. Как видно из Рисунка 7, во все четыре сезона значения температур  $T_{abs}$  и  $T_w$  находятся в непосредственной близости друг к другу. В конфигурации Тип 1, напротив, эти температуры демонстрируют колебания, обусловленные работой компонента «Switch», упомянутого ранее. Во всех четырех случаях температура поглотителя стабильно превышает температуру воды в бассейне на 0,84–2,38%. При сравнении температуры стекла во всех случаях она всегда выше температуры окружающего воздуха, но остается ниже температуры воды в бассейне. В январе разница между максимальными температурами воды и стекла составляет 65,1% для солнечного дистиллятора, 38,62% для Типа 1 и 63,12% для Типа 2. Большая разница между температурами воды в бассейне и стекла способствует конденсации на внутренней поверхности стекла, что, в свою очередь, увеличивает производительность. Эффективность конденсации возрастает, когда нагретый пар сталкивается с охлажденной поверхностью. Аналогичные показатели для апреля, июля и октября составляют 34,6%/27,25%/33,16%, 19,72%/19,93%/18,58% и 35,58%/9,77%/35,26% соответственно. Максимальные температуры  $T_{abs}$ ,  $T_w$  и  $T_g$  составляют 50,31 °C, 49,23 °C и 39,41 °C. Соответствующие значения для апреля — 29,05 °C, 27,96 °C и 20,34 °C.

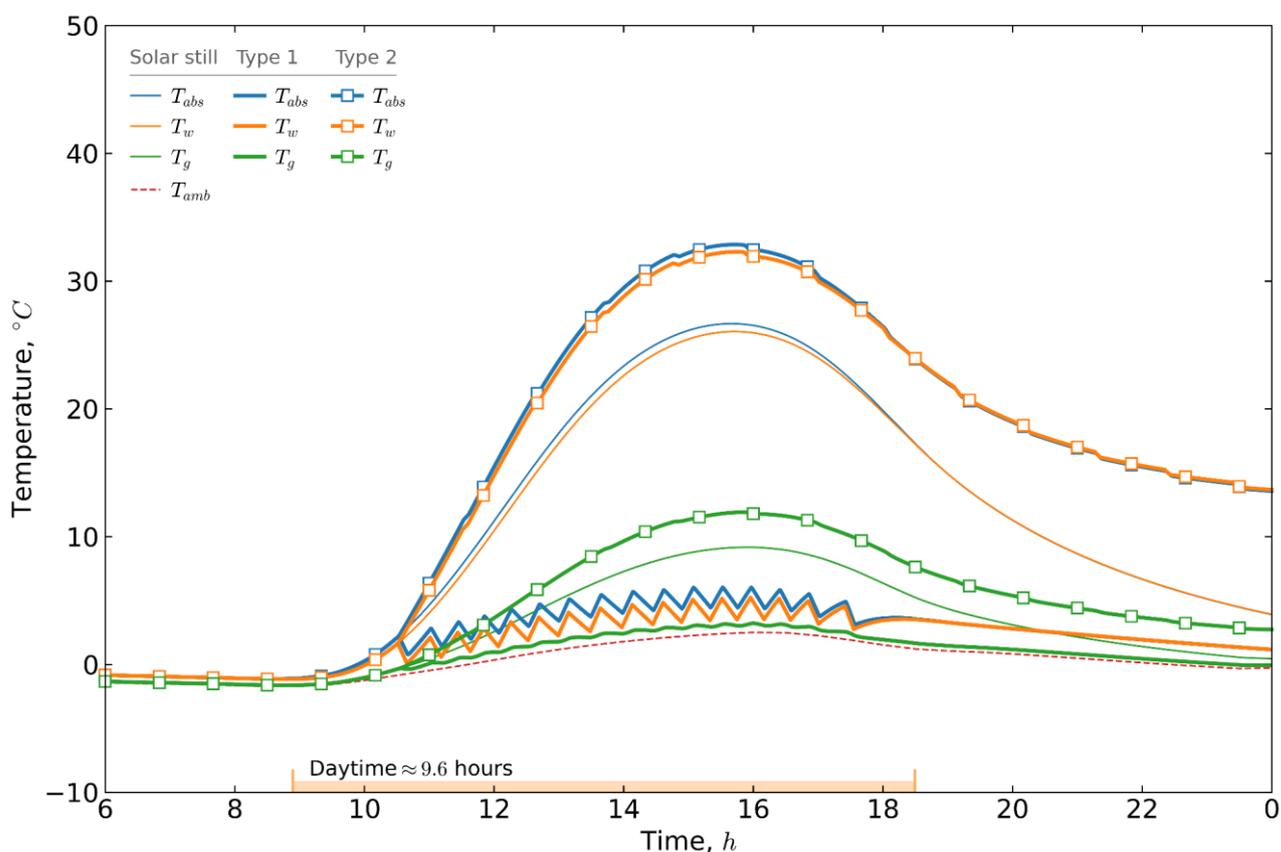


Рисунок 47а - Временные колебания температуры различных компонентов в солнечного опреснителя с тепловым насосом в течение месяца: январь.

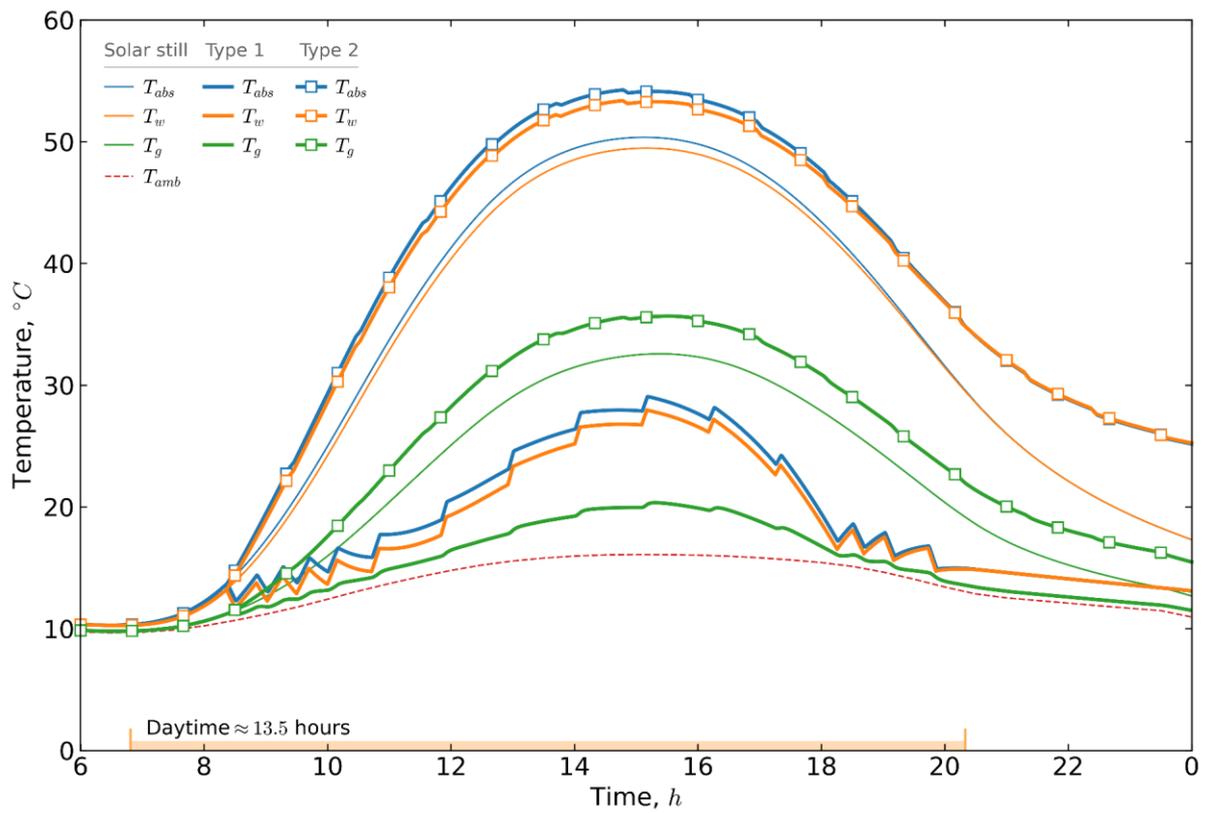


Рисунок 47б - Временные колебания температуры различных компонентов в солнечного опреснителя с тепловым насосом в течение месяца: апрель.

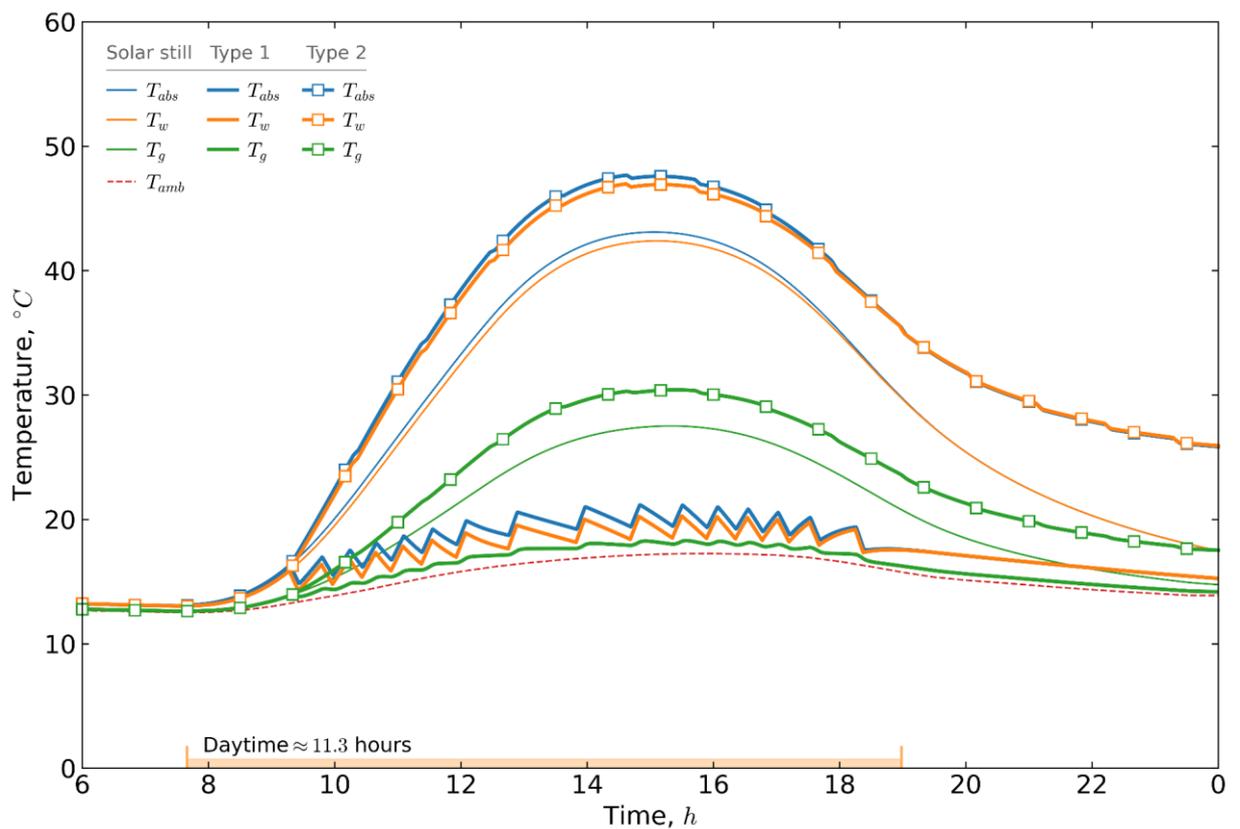


Рисунок 47с - Временные колебания температуры различных компонентов в солнечного опреснителя с тепловым насосом в течение месяца: октябрь.

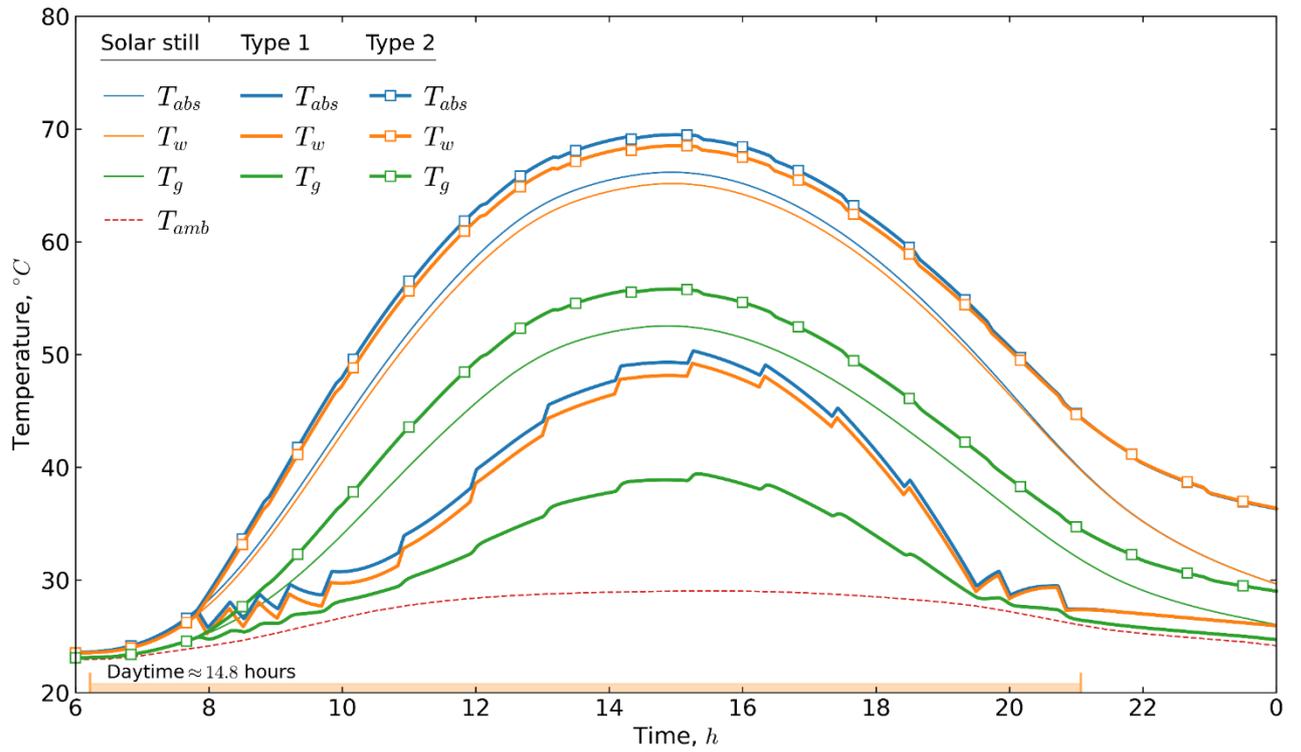


Рисунок 47d – Временные колебания температуры различных компонентов в солнечного опреснителя с тепловым насосом в течение месяца: июль.

### 4.3 Валидация Модели

Производительность регенеративного солнечного дистиллятора на основе теплового насоса была сравнена с теоретическими и экспериментальными наблюдениями. На рисунке 48 показано сравнение теоретической (Model) и экспериментальной (Experiment) продуктивности регенеративного солнечного опреснителя на основе теплового насоса и обычного солнечного дистиллятора. Было установлено, что теоретические и экспериментальные наблюдения для обеих систем имеют близкие значения.

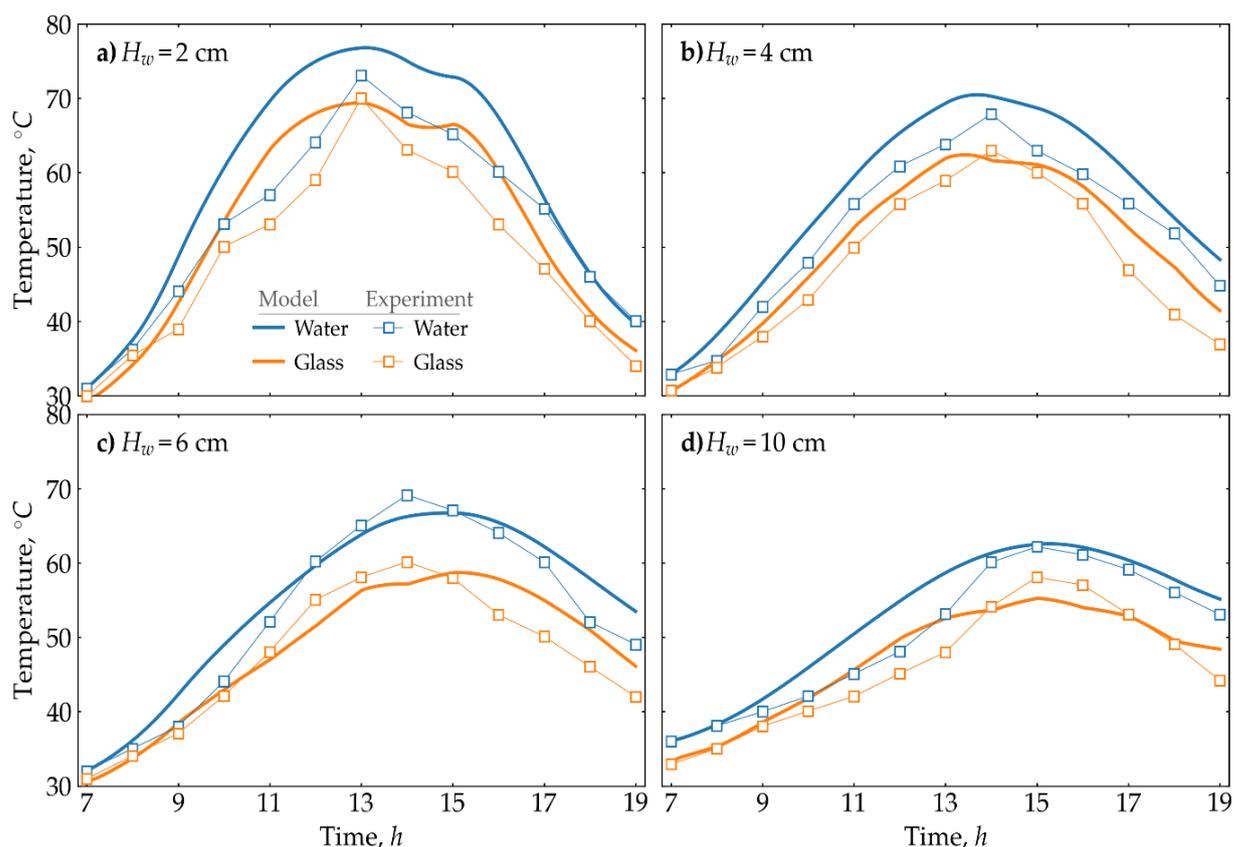


Рисунок 48 - Сравнение теоретических и экспериментальных результатов для разной толщины воды

Согласно рисунку 48, измерения и расчеты совпадают между собой. Минимальное расхождение между численными и экспериментальными значениями температуры воды для глубины 6 см составляет 0,0096%, а максимальное расхождение — 18,96%. Для глубины 10 см минимальное расхождение составляет 0,0029%, а максимальное — 12,08%. Точные значения для температуры стекла: 1,83% и 21,39% для глубины 6 см, и 0,002% и 14,26% для глубины 10 см соответственно. Рисунок 49 показывает распределение относительных ошибок в процентах во времени для указанных случаев сравнения с экспериментами. Значительное расхождение наблюдается после 14:00, что может быть связано с тем, что в расчетах не учитывается фанерная рама. Это также может быть вызвано различными интервалами расчетов (30

секунд) и измерений (60 минут). Доступные экспериментальные данные [33] были до 19:00.

Как показано на рисунке 47, тренд изменения температуры стекла тесно соответствует тренду изменения температуры воды в баке, что связано с включением механизма их теплообмена в анализ. Тем не менее, существуют различия в максимальных значениях температуры воды, особенно на меньших глубинах, где расхождения между измеренными и расчетными значениями менее выражены.

Что касается температуры стекла, минимальные относительные погрешности при глубинах 2 см, 4 см, 6 см и 10 см составляют:

**2 см:** 0,00077%; **4 см:** 0,0071%; **6 см:** 1,83%; **10 см:** 0,002%

Соответственно, максимальные относительные погрешности для этих глубин составляют:

**2 см:** 28,08%; **4 см:** 30,77%; **6 см:** 21,39%; **10 см:** 14,26%

Средние относительные ошибки для воды на глубинах 2 см и 4 см составляют 16,11% и 13,54% соответственно, тогда как для стекла они составляют 14,89% и 2,84% соответственно. На глубине 6 см средние относительные ошибки составляют 7,95% для воды и 9,27% для стекла. На глубине 10 см средние относительные ошибки составляют 5,68% для воды и 4,65% для стекла (Рисунок 49).

Для всех отчетных средних значений было отмечено, что медианные значения ниже средних, что указывает на значительные минимальные расхождения. Можно сделать вывод, что процесс валидации дал удовлетворительные результаты.

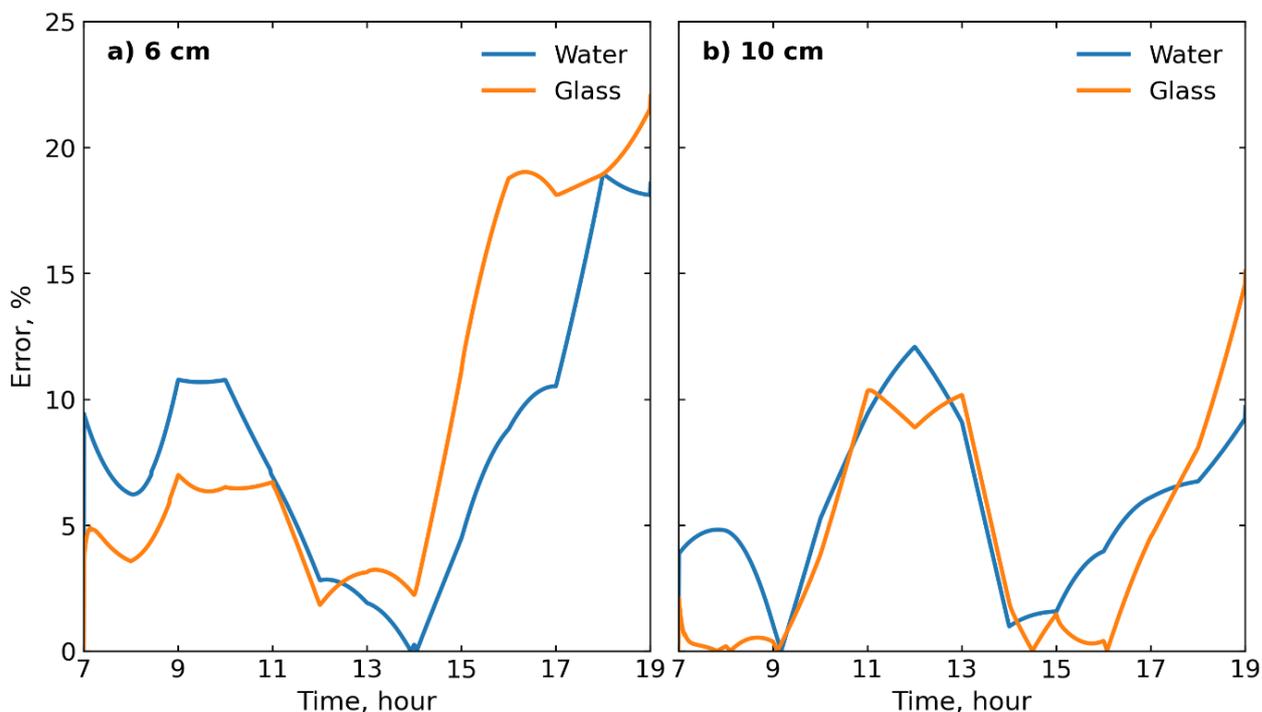


Рисунок 49 – Распределение относительных ошибок в процентах

#### 4.4 Экономический Анализ.

На основании уравнений в разделе экономического анализа произведена оценка стоимости дистиллированной воды для указанных городов Каспийского региона. Результаты представлены на Рисунке 50.

Наибольшая производительность наблюдается в Тегеране и составляет  $1,75 \cdot 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·год). За Тегераном следует Туркменбаши с производительностью  $1,39 \cdot 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·год), затем идут Актау —  $1,31 \cdot 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·год), Баку —  $1,19 \cdot 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·год), Астрахань —  $1,18 \cdot 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·год), Махачкала —  $1,12 \cdot 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·год) и Атырау —  $1,11 \cdot 10^3$  кг/(м<sup>2</sup>·год).

Согласно расчётам КПД солнечного дистиллятора был получен иной порядок ранжирования. Тегеран занимает первое место с КПД 0,53, за ним следует Туркменбаши с 0,47, Баку с 0,45, Актау и Махачкала — по 0,44, Астрахань — 0,41 и Атырау — 0,39. Полученные числовые данные согласуются с результатами, представленными другими авторами в открытых источниках.

Капитальные затраты (P) были рассчитаны на основе цен на материалы в указанных странах. Годовая процентная ставка (i) была взята согласно доступным данным для этих стран. Предполагается, что срок службы системы (n) составит 15 лет. Согласно полученным данным, самая дешёвая дистиллированная вода производится в Баку — 0,024 USD/кг, затем в Туркменбаши — 0,032 USD/кг, в Актау — 0,034 USD/кг, в Тегеране — 0,037 USD/кг, в Атырау — 0,040 USD/кг, в Астрахани — 0,041 USD/кг и в Махачкале — 0,043 USD/кг[79].

Как уже упоминалось, в данной работе оцениваются эффективность и производительность обычного солнечного дистиллятора. Каспийский регион богат природными ресурсами, имея доступ к недорогим источникам энергии, таким как природный газ и нефть. Поэтому интеграция солнечного дистиллятора с термальными системами опреснения, использующими природный газ, является вполне осуществимой. Такая интеграция может повысить производительность дистиллированной воды и, соответственно, снизить её стоимость. Кроме того, это способствует декарбонизации систем термального опреснения, работающих на ископаемом топливе, за счёт использования солнечной тепловой энергии. В будущем планируется исследовать потенциал интеграции солнечных дистилляторов с другими технологиями в Каспийском регионе.

Если предположить, что регенеративный солнечный дистиллятор на основе теплового насоса эксплуатировался 225 дней в году на протяжении десяти лет. Масса хладагента R134a, используемого в системе, составляла 650 граммов. Предполагается, что в системе присутствует утечка хладагента, эквивалентная 25% от общей заправки, а потенциал глобального потепления (GWP) R134a составляет 1430. Солнечный дистиллятор работал 12 часов в день, потребляя мгновенную мощность компрессора  $557 \pm 10$  Вт, в зависимости от условий окружающей среды и рабочих температур системы. Оценочные выбросы углекислого газа (CO<sub>2</sub>), связанные с эксплуатацией солнечного дистиллятора с поддержкой теплового насоса, составили  $24,5 \pm 0,65$  тонн за десять лет его службы. Анализ воздействия системы на окружающую среду позволяет выявить

возможности для улучшения и разработать стратегии для снижения потенциальных негативных последствий.

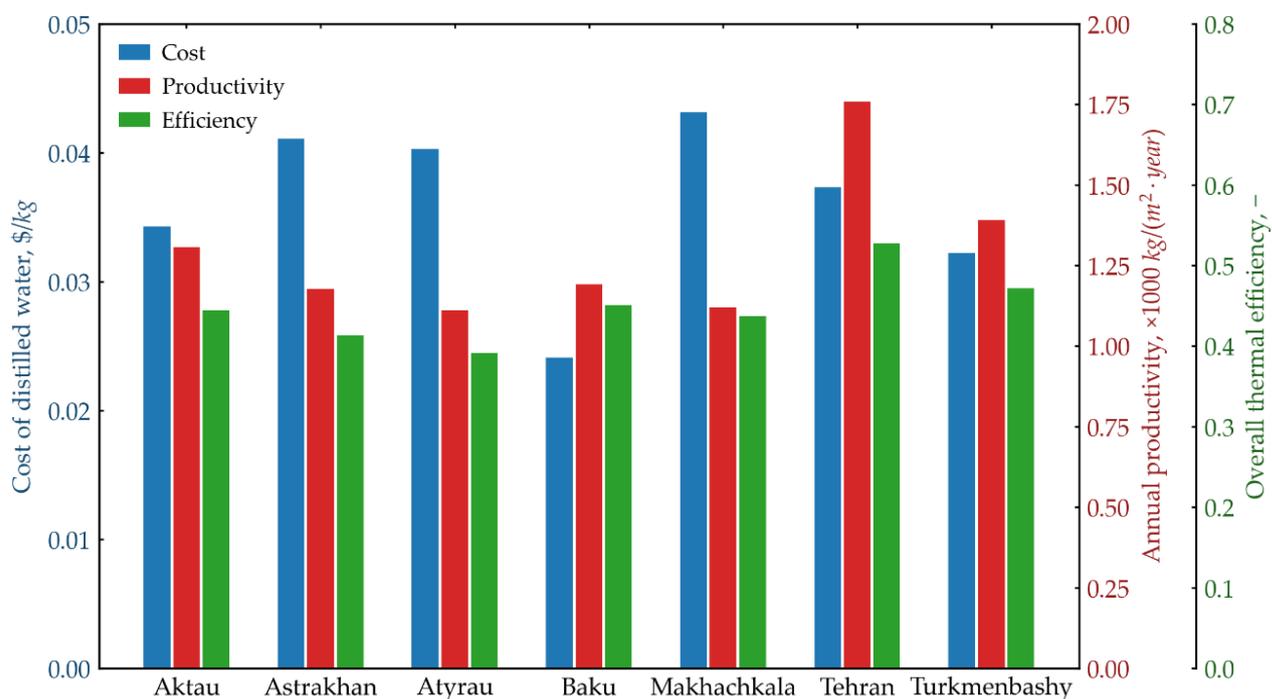


Рисунок 50 - Оценка стоимости дистиллированной воды и годовой производительности солнечного дистиллятора для городов Каспийского региона[79]

Основными факторами, влияющими на тепловую производительность солнечного дистиллятора с поддержкой теплового насоса, являются солнечная радиация, температура окружающей среды и скорость ветра. В этом разделе обсуждается влияние этих трех параметров на коэффициент энергетической эффективности и продуктивность системы. Коэффициент энергетической эффективности и продуктивность системы были смоделированы численно, и результаты приведены в данном разделе.

#### 4.5 Анализ Качества Воды

В данном разделе представлены методологии, используемые для анализа качества воды, полученной из солнечного опреснителя. Оценка будет включать сравнение с нормативами, установленными Казахстанским стандартом качества питьевой воды, чтобы определить пригодность воды для питья и других целей.

Казахстанские стандарты качества питьевой воды, утвержденные СанПиН РК, устанавливают допустимые пределы для различных параметров, связанных с качеством воды, чтобы обеспечить ее безопасность для потребления человеком. Поэтому важно провести анализ качества воды, полученной в ходе экспериментов, в соответствии с этими стандартами, чтобы убедиться, что она соответствует требуемым критериям. Образцы воды тестировались с использованием различных методов, удовлетворяющих требованиям

Казахстанских стандартов. Эти методы включают тестирование таких параметров, как рН, щелочность, жесткость, содержание хлоридов и фторидов. Точность и корректность процедуры тестирования имеют критическое значение для получения надежных данных, которые соответствуют установленным требованиям. Соблюдение стандартных процедур и руководящих принципов позволит обеспечить достоверные результаты, которые помогут контролировать качество воды и гарантировать её безопасность для использования.

Качество образцов воды, полученных из солнечного дистиллятора с регенерацией и поддержкой теплового насоса, было проверено и сравнивалось с нормами санитарных правил установленными Министерством здравоохранения Республики Казахстан. В таблице 5.3 приведены результаты анализа по таким параметрам, как внешний вид, цвет, запах, рН, общая жесткость, концентрация щелочности, хлоридов и фторидов.

**Внешний вид:** Важный параметр анализа дистиллята солнечного дистиллятора. Визуальный осмотр воды может дать первоначальное представление о видимых загрязнениях или примесях. В идеале, вода, произведенная солнечным дистиллятором, должна быть прозрачной, бесцветной и без видимых примесей или мутности. Любое изменение цвета, мутность или присутствие частиц в воде может указывать на наличие загрязнений, таких как грязь, органические вещества или другие примеси. Вода, которая кажется мутной или облачной, может содержать взвешенные частицы, которые могут повлиять на вкус и качество воды. Аналогично, вода, имеющая желтый или коричневый оттенок, может указывать на присутствие растворенных органических веществ, что может повлиять на вкус и запах воды. Результаты, представленные в таблице 5.3, показывают, что внешний вид воды соответствует санитарно-эпидемиологическим требованиям установленным Министерством здравоохранения Республики Казахстан.

**Запах:** Важный параметр в анализе дистиллята солнечного дистиллятора. Запах воды может предоставить ценную информацию о качестве воды и помочь выявить возможные загрязнения или примеси. Вода, произведенная солнечным дистиллятором, должна быть без запаха и соответствовать санитарно-эпидемиологическим требованиям установленным Министерством здравоохранения Республики Казахстан.

**рН:** Измеряет кислотность или щелочность воды. Идеальный диапазон рН для питьевой воды составляет от 6,5 до 8,5. Вода, выходящая за пределы этого диапазона, может указывать на наличие примесей или загрязнений. Вода, произведенная солнечным дистиллятором, имеет рН 7, что соответствует санитарно-эпидемиологическим требованиям установленным Министерством здравоохранения Республики Казахстан.

**Общая Щелочность:** Измеряет способность воды нейтрализовать кислоты. Низкая щелочность может указывать на кислотность воды, тогда как высокая щелочность может указывать на жесткость воды. В таблице 5.3 показана общая щелочность воды, соответствующая санитарно-эпидемиологическим требованиям установленным Министерством здравоохранения Республики Казахстан.

**Общая Жесткость:** Измеряет концентрацию минералов, таких как кальций и магний, в воде. Высокий уровень жесткости может вызывать накипь и влиять на вкус воды. В таблице 5.3 показана общая жесткость воды, соответствующая санитарно-эпидемиологическим требованиям установленным Министерством здравоохранения Республики Казахстан.

**Хлориды:** Важный минерал, необходимый организму в небольших количествах. Однако высокие уровни хлоридов в питьевой воде могут указывать на наличие загрязнений, таких как проникновение соленой воды или промышленные отходы. Повышенные уровни хлоридов в питьевой воде также могут повлиять на вкус и качество воды.

**Фториды:** Важный минерал для здоровья зубов. Однако избыток фторидов в питьевой воде может вызвать флюороз, что может привести к обесцвечиванию и повреждению зубов. Высокие уровни фторидов в питьевой воде также могут повлиять на вкус и качество воды. Для измерения хлоридов и фторидов в дистилляте, произведенном солнечным дистиллятором, образцы воды обычно анализируют с использованием ионоселективных электродов. Концентрация хлоридов и фторидов измеряется в миллиграммах на литр (мг/л) или частях на миллион (ppm).

Результаты показывают, что образцы воды соответствуют требованиям качества воды по санитарно-эпидемиологическим требованиям установленным Министерством здравоохранения Республики Казахстан. Таким образом, образцы воды, полученные из солнечного дистиллятора с регенерацией и поддержкой теплового насоса, подходят для питья, обогащенные необходимыми минералами. Солнечный дистиллятор с поддержкой теплового насоса является эффективным методом производства безопасной и свежей воды, что может помочь решить проблему нехватки воды в регионах, где доступ к безопасной питьевой воде является проблемой.

По результатам детального анализа было сделано заключение, что система производит пресную воду в объеме 14-16 литров в день, что вполне подходит для бытовых нужд. В таблице 6 представлены результаты анализов морской воды, питьевой воды и воды, полученной после опреснения. Показатели сравнивались с санитарно-эпидемиологическими нормами, установленными для питьевой воды.

Таблица 6 – Сравнительная таблица результатов анализов питьевой воды

№	Параметры	Морская Вода	Подземная вода	Дистиллят	СанПиН
1	Внешний вид	Мутный	Чистый	Чистый	Чистый
2	Цвет (град.)	20-25	5,6	-	<20
3	Запах (баллы)	<2	Без запаха	Без запаха	Без запаха
4	Водородный показатель рН	8,20	7,48	7,41	6.5-8.5

5	Общая щелочность (ммоль/л)	3.4-3.6	2,35	-	0,5-6,5
6	Общая жесткость (мг/л)	75-82.6	52	0,05	1.5-7
7	Хлориды (мг/л)	5300-5500	3562	-	150-250
8	Фториды (мг/л)	1,0	1,2	-	0,5-1,5
9	Сухой остаток(г/л)	13-13,5	9,3	0,017	0,01-1

Рисунок 51 отлично иллюстрирует разницу между водой до очистки (слева) и после очистки (справа), показывая улучшение прозрачности воды после проведенной опреснения.



Рисунок 51 – Морская вода Каспийского моря до и после очистки

Солнечный дистиллятор с регенерацией и поддержкой теплового насоса, оснащенный необходимыми приборами, был разработан и экспериментально изучен в климатических условиях города Актау. В этой главе представлены основные выводы, сделанные в ходе данного исследования, охватывающие энергетическую и эксергетическую производительность, экономический анализ и анализ воздействия на окружающую среду. Глава включает следующие основные разделы:

- Среднемесячная продуктивность солнечного дистиллятора с поддержкой

теплового насоса составила 14-16 кг в день с 100 литрами горячей воды при температуре 48-52 °С, что делает его жизнеспособным вариантом для решения проблемы нехватки воды.

- Максимальный коэффициент энергетической эффективности (COP) системы составил 1,45 в 19:00, что стало возможным благодаря влиянию парафинового воска и работе теплового насоса.

- В течение года коэффициент энергетической эффективности варьировался, с максимальными значениями летом и минимальными зимой. КПД теплового насоса находился в диапазоне от 2,21 до 2,55, что свидетельствует о высокой эффективности системы.

- Стоимость одного литра дистиллята, полученного из солнечного дистиллятора с поддержкой теплового насоса, была рассчитана на уровне 0,05471 USD.

- Период окупаемости системы составил 21,46 месяцев, что является временем, необходимым для возврата первоначальных инвестиций за счет экономии затрат на эксплуатацию системы.

- Выбросы CO<sub>2</sub>, связанные с эксплуатацией солнечного дистиллятора с поддержкой теплового насоса, были оценены в  $26,8 \pm 0,53$  тонны за десять лет эксплуатации системы.

- Образцы воды, полученные из солнечного дистиллятора с поддержкой теплового насоса, были протестированы и признаны пригодными для питья, при условии добавления необходимых минералов для соответствия санитарно-эпидемиологическим требованиям установленным Министерством здравоохранения Республики Казахстан.

## ГЛАВА 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана математическая модель и алгоритм расчета для оценки производительности солнечного дистиллятора с регенерацией, поддерживаемого тепловым насосом. Были проведены численные расчеты для оценки работы такого устройства опреснения в климатических условиях города Актау, Казахстан. Математическая модель основана на базовых уравнениях теплового баланса, учитывающих все механизмы теплообмена в системе. Алгоритм расчета был реализован на языке Python и с использованием программного обеспечения TRNSYS. Алгоритм расчета был проверен путем сравнения с экспериментальными данными других авторов, и получено согласие в пределах 14%. Был предложен новый механизм управления, который регулирует работу теплового насоса в сочетании с солнечным дистиллятором. На основе расчетов сделаны следующие основные выводы:

- В программном обеспечении TRNSYS был создан компонент для солнечного дистиллятора с регенерацией, поддерживаемого тепловым насосом.
- Разработанный инструмент расчета может использоваться для солнечного дистиллятора с регенерацией, поддерживаемого тепловым насосом, с различными геометрическими и термодинамическими параметрами.
- Предложенный алгоритм управления позволяет автоматизировать работу солнечного дистиллятора с тепловым насосом, обеспечивая высокую эффективность.
- Тепловой насос увеличивает суточную производительность системы более чем в 4,3 раза зимой.
- Тепловой насос увеличивает суточную производительность системы более чем в 1,5 раза летом.

Разработанный численный инструмент будет далее использоваться для изучения интеграции солнечных дистилляторов с различными технологиями возобновляемой энергии и энергоэффективности. Авторы будут совершенствовать представленную математическую модель, детализируя механизмы теплообмена. Также будет разработан прототип солнечного дистиллятора с тепловым насосом для проведения испытаний по опреснению воды Каспийского моря в условиях Актау.

В рамках данного исследования был разработан компактный прототип регенеративной солнечно-тепловой системы опреснения воды на основе теплового насоса, предназначенной для опреснения морской воды и обеспечения горячей водой отдалённых населённых пунктов Мангистауской области и прикаспийского региона Казахстана. Для этой системы был проведён всесторонний технический, экологический и экономический анализ её эффективности с учётом специфики региона. Разработанная система ориентирована на использование в частных домах, небольших фермерских хозяйствах, теплицах, а также на малых и средних предприятиях, что подтверждает её потенциал для широкого применения в данных условиях.

### **Оценка полноты решений поставленных задач.**

Экспериментальные исследования охватили ключевые параметры работы

системы, включая влияние теплового насоса на производительность и эффективность опреснения. Численная модель показала согласованность с экспериментальными данными, что подтверждает правильность подхода.

Полученные результаты подтверждают, что использование теплового насоса позволяет значительно увеличить производительность системы, что открывает возможности для практического применения в отдалённых регионах. Вклад исследования заключается в предложении более эффективной технологии опреснения воды с использованием солнечной энергии. Однако остаются направления для дальнейшей оптимизации и улучшения системы.

Рекомендации по конкретному использованию полученных результатов.

Разработанная система солнечного опреснителя с тепловым насосом может быть использована для автономного водоснабжения в отдалённых населённых пунктах, где ограничен доступ к пресной воде. Она позволяет обеспечить минимальные эксплуатационные затраты и эффективно использовать солнечную энергию. В засушливых регионах, таких как Мангистауская область, система будет полезна для опреснения морской и подземной воды, обеспечивая доступ к дешёвой пресной воде. Также её можно применять в коммерческих целях, например, для водоснабжения в сельском хозяйстве или туристических объектах. Полученные результаты могут быть полезны для модернизации существующих опреснительных систем, что повысит их эффективность и рентабельность за счёт использования теплового насоса.

Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.

Научный уровень выполненной работы соответствует современным тенденциям и лучшим достижениям в области солнечного опреснения и использования тепловых насосов для повышения эффективности таких систем. В исследовании был предложен новый подход к интеграции теплового насоса с регенеративным солнечным дистиллятором, что является актуальной задачей на фоне глобального поиска решений по обеспечению доступа к пресной воде в условиях дефицита.

Сравнивая с аналогичными исследованиями, работа демонстрирует значительный прогресс в области повышения производительности солнечных опреснителей за счёт интенсификации процессов конденсации. В отличие от существующих систем, предложенная конструкция отличается улучшенной тепловой эффективностью и возможностью использования в удалённых районах с ограниченными ресурсами. Полученные экспериментальные и численные результаты подтверждают высокий уровень работы, который сопоставим с передовыми исследованиями, направленными на разработку эффективных и доступных систем водоочистки с использованием возобновляемых источников энергии.

Результаты работ представлены в международных конференциях по направлению исследования, а также были опубликованы статьи в высокорейтинговых журналах.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Dhivagar, R, Mohanraj, M, Hidouri, K & Belyayev Y 2021, ‘Energy, exergy, economic and enviro-economic (4E) analysis of gravel coarse aggregate sensible heat storage-assisted single-slope solar still’, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 145, pp. 475–494.
2. Omara, AAM, Abuelnuor, AAA, Mohammed, HA & Khiadani, M 2020, ‘Phase change materials (PCMs) for improving solar still productivity: A review’, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 139, pp. 1585–1617.
3. Dwivedi, VK & Tiwari, GN 2009, ‘Comparison of internal heat transfer coefficients in passive solar stills by different thermal models: an experimental validation’, *Desalination*, vol. 246, pp. 304-318.
4. Kumar, S & Tiwari, GN 2011, ‘Analytical expression for instantaneous exergy efficiency of a shallow basin passive solar still’, *International Journal of Thermal Science*, vol. 50, pp. 2543-2549.
5. Shanmugan, S, Manikandan, V, Shanmugasundaram, K, Janarathanan, B & Chandrasekaran, J 2012, ‘Energy and exergy analysis of single slope single basin solar still’, *International Journal of Ambient Energy*, vol. 33, no. 3, pp. 142-151.
6. Halimeh, AZ, Farshad, FT, Faramarz, S, Fazlollah, H 2013, ‘Comparison between energy and exergy efficiencies in a weir type cascade solar still’, *Desalination*, vol. 325, pp. 113-121.
7. Ranjan, KR, Kaushik, SC & Panwar, NL 2013b, ‘Energy and exergy analysis of passive solar distillation systems’, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, pp. 1-11.
8. Ziabari, FB, Sharak, AZ, Moghadam, H, Tabrizi, FF 2013, ‘Theoretical and experimental study of cascade solar stills’, *Solar Energy*, vol. 90, pp. 205-211.
9. Hassan, H 2019, ‘Comparing the performance of passive and active double and single slope solar stills incorporated with parabolic trough collector via energy, exergy and productivity’, *Renewable Energy*, vol. 148, pp. 437-450.
10. Yousef, MS, Hassana, H & Sekiguchi, H 2019, ‘Energy, exergy, economic and enviroeconomic (4E) analyses of solar distillation system using different absorbing materials’, *Applied Thermal Engineering*, vol. 150, pp. 30-41.
11. Dhivagar, R, Murugesan Mohanraj & Yerzhan Belyayev 2021, ‘Performance analysis of crushed gravel sand heat storage and biomass evaporator-assisted single slope solar still’, *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, pp.65610–65620.
12. Mahmoud, KSA, Meraj, M, Azhar, M, Khan, ME, Mohammad, S, Ahsan, M, Shah AA, Ehab, HBH 2022, ‘Energy and exergy analyses of active solar still integrated with evacuated flat plate collector for New Delhi, Groundwater for Sustainable Development, vol. 19, issue. 100833.
13. Nursyahirah MS, Mohd Faizul MS, Mohd Faiz MS, Mohd Hanafi A 2023, ‘Energy, exergy, economic, environmental analysis for solar still using partially coated condensing cover with thermoelectric cover cooling’, *Journal of Cleaner Production*, vol. 387, issue. 135833.
14. Torchia, N, Porta-Gandara, JC, MC & Cervantes-de Gortari, JG 2008, ‘Exergy

analysis of a passive solar still', *Renewable Energy*, vol. 33, pp. 608-616.

15. Dwivedi, VK & Tiwari, GN 2012, 'Thermal modeling and carbon credit earned of a double slope passive solar still', *Desalination and Water Treatment*, vol. 13, pp. 400-410.

16. Li C, Yogi Goswami D, Shapiro A, Stefanakos EK, Demirkaya G 2012, A new combined power and desalination system driven by low grade heat for concentrated brine. *Energy*, vol.46, pp. 582 - 595.

17. Sethi, AK & Dwivedi, VK 2013, 'Exergy analysis of double slope active solar still under forced circulation mode', *Desalination and Water Treatment*, vol. 51, pp. 7394-7400.

18. Ranjan, KR, Kaushik, SC & Panwar, NL 2013b, 'Energy and exergy analysis of passive solar distillation systems', *International Journal of Low-Carbon Technologies*, pp. 1-11.

19. Asbik, M, Ansari, O, Bah, A, Zari, N, Mimet, A & El-Ghetany, H 2016, 'Exergy analysis of solar desalination still combined with heat storage system using phase change material (PCM)', *Desalination*, vol. 381, pp. 26-37.

20. Deniz, E 2016a, 'Energy and exergy analysis of flat plate solar collector-assisted active solar distillation system', *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, pp. 13-21.

21. Sarhaddi, F, Tabrizi, FF, Aghaei Zoori, H, Hossein, SA & Mousavi, S 2017, 'Comparative study of two weir type cascade solar stills with and without PCM storage using energy and exergy analysis', *Energy Conversion and Management*, vol. 133, pp. 97-109.

22. Sakthivel, TG & Arjunan, TV 2019, 'Thermodynamic performance comparison of single slope solar stills with and without cotton cloth energy storage medium', *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 137, pp. 351-360.

23. Chen, J, Zhang, Z, Zhang, G, Wang, D 2022, Energy, exergy, economic and environmental analysis of a novel direct-expansion solar-assisted flash tank vapor injection heat pump for water heater, *Energy Conversion and Management*, vol. 254, issue. 115239.

24. Deniz, E & Cinar, S 2016b, 'Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of a solar desalination system with humidification-dehumidification', *Energy Conversion and Management*, vol. 126, pp. 12-19.

25. Sharon, H, Reddy, KS, Krithika, D & Philip, L 2017, 'Experimental performance investigation of titled solar still with basin and wick for distillate quality and enviro-economic aspects', *Desalination*, vol. 410, pp. 30-54.

26. Joshi, P & Tiwari, GN 2018, 'Energy matrices, exergo-economic and enviro-economic analysis of an active single slope solar still integrated with a heat exchanger: A comparative study', *Desalination*, vol. 443, pp. 85-98.

27. Piyush, P, Rahul, D, Dhananjay, S & Amimul, A 2018, 'Energy matrices, exergoeconomic and enviroeconomic analysis of modified multi-wick basin type double slope solar still', *Desalination*, vol. 447, pp. 55-73.

28. Elbar, ARA, Yousef, MS & Hassar, H 2019, 'Energy, exergy, exergo-economical and enviro economical (4E) evaluation of new integration of solar still with photovoltaic panel', *Journal of Clear Production*, vol. 233, pp. 665-680.

29. Khanmohammadi, S & Khanmohammadi, S 2019, Energy, exergy and exergo-environment analyses, and tri-objective optimization of a solar still desalination with different insulations, *Energy*, vol. 187, pp. 115988.
30. Hassan, H, Yousef, MS, Fathy, M & Salem Ahmed, M 2020, Assessment of parabolic trough solar collector assisted solar still at various saline water mediums via energy, exergy, exergoeconomic, and enviroeconomic approaches, *Renewable Energy*, vol. 155, pp. 604-616.
31. Radhwan, AM 2004, Transient performance of stepped solar still with built-in latent heat thermal energy storage, *Desalination*, vol. 171, pp. 61-76.
32. Chamka, AJ, Takhar, HS & Soundalgekar, VM 2001, Radiation effects on free convection flow past a semi-infinite vertical plate with mass transfer, *Journal of Chemical Engineering*, vol. 84, pp. 335-342.
33. El-Sebaili, AA, Al-Ghamdi, AA, Al-Hazmi, FS & Faidah, AS 2009, Thermal performance of a single basin solar still with PCM as storage medium, *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1187-1195.
34. Rashidi, S, Akar, S, Bovand, M & Ellahi, R 2018a, Volume of fluid model to simulate the nanofluid flow and entropy generation in a single slope solar still, *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 400-410.
35. Rashidi, S, Bovand, M, Rahbar, N & Abolfazli Esfahani, J 2018b, Steps optimization and productivity enhancement in a nanofluid cascade solar still, *Renewable Energy*, vol. 118, pp. 536-545.
36. Sharshir, SW, Peng, G, Elsheikh, AH, Edreis, EMA, Eltawil, MA, Abdelhamid, T, Kabeel, AE, Zang, J & Yang, N 2018, Energy and exergy analysis of solar stills with micro/nano particles: A comparative study, *Energy Conversion and Management*, vol. 177, pp. 363-375.
37. Arunkumar, T, Murugesan, D, Raj, K, Denkenberger, D, Viswanathan, C, Rufuss, DDW & Velraj, R 2019, Effect of nano-coated CuO absorbers with PVA sponges in solar water desalting system, *Applied Thermal Engineering*, vol. 148, pp. 1416-1424.
38. Kabeel, AE, Sathyamurthy, R, Sharshir, SW, Muthumanokar, A, Panchal, H, Prakash, N, Prasad, C, Nandakumar, S & El-Kady, MS 2019b, Effect of water depth on a novel absorber plate of pyramid solar still coated with TiO<sub>2</sub> nano black paint, *Journal of Clear Production*, vol. 213, pp. 185-191. 124
39. Kabeel, AE, Abdelgaied, M & Eisa, A 2019c, Effect of graphite mass concentrations in a mixture graphite nano particles and paraffin wax as hybrid storage materials on performance of solar still, *Renewable Energy*, vol. 132, pp. 119-128.
40. Nafey, AS, Abdelkader, M, Abdelmotalip, A, Mabrouk, AA 2001, Solar still productivity enhancement, *Energy Conversion and Management*, vol. 42, pp. 1401-1408.
41. Mohammed, AF, Hegazi, AA, Sultan, GI & El-Said, EMS 2019, Enhancement of a solar still performance by inclusion the basalt stones as a porous sensible absorber: Experimental study and thermoeconomic analysis, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 200, pp. 109958
42. Dumka, P, Sharma, A, Kushwah, Y, Raghav, AS & Mishra, DR 2019a, Performance evaluation of single slope solar still augmented with sand filled cotton

bags', *Journal of Energy Storage*, vol. 25, pp. 100888.

43. Kabeel, AE, Abdelaziz, GB & El-said, EMS 2019d, 'Experimental investigation of a solar still with composite heat storage: Energy, exergy and economic analysis', *Journal of Clear Production*, vol. 231, pp. 21-34.

44. Kabeel, AE, El-Agouz, EI, Muthu Manokar, A, Rajendran Duraisamy, R, Ravishankar, S, Prakash, N & Chandran, P 2020, 'Comparative analysis on freshwater yield from conventional basin-type single slope solar still with cement-coated red bricks: An experimental approach', *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, pp. 32218–32228.

45. Kalpesh, M, & Kuldeep, N, 2020, 'Efficacy of forced condensation and forced evaporation with thermal energy storage material on square pyramid solar still', *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 1307-1319.

46. Srivastava, PK & Agrawal, SK 2013, 'Experimental and theoretical analysis of single sloped basin tube solar still consisting of multiple low thermal inertia floating porous absorbers', *Desalination*, vol. 311, pp. 198-205.

47. Rajaseenivasan, T & Srithar, K 2016, 'Performance investigation on solar still with circular and square fins in basin with CO<sub>2</sub> mitigation and economic analysis', *Desalination*, vol. 380, pp. 66-74.

48. Dinesh, M, Hitesh Panchal, M. Ahmadein, Zayed, ME, Naser, AA, Djuansjah, J, Moustafa, EB, Elsheikh, AH, Sadasivuni, KK 2022, 'Investigation and performance analysis of solar still with energy storage materials: An energy- exergy efficiency analysis-Case Studies in Thermal Engineering', vol. 29, issue. 101687.

49. Kabeel, AE, Mohamed, A & Mahgoub, M 2016, 'The performance of a modified solar still using hot air injection and PCM', *Desalination*, vol. 379, pp. 102-107

50. Kumar, TRS, Jegadheeswaran, S & Chandramohan, P 2019, 'Performance investigation on fin tube solar still with paraffin wax as energy storage media', *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, pp. 101-112.

51. Wen-Long C, Yan-Kai H, Yong-Le N (2019) Performance of solar still using shape-stabilized PCM: Experimental and theoretical investigation. *Desalination*, vol. 455, pp. 89–99.

52. Omara, AAM, Abuelnuor, AAA, Mohammed, HA & Khiadani, M 2020, 'Phase change materials (PCMs) for improving solar still productivity: A review', *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, vol. 139, pp. 1585–1617.

53. Sakthivel, M, Shanmugasundaram, S & Alwarsamy T 2010, 'A experimental study on a regenerative solar still with energy storage medium- Jute cloth', *Desalination*, vol. 264 pp. 24-31.

54. Kabeel, AE, El-Agouz, SA, Sathyamurthy, R & Arunkumar, T 2018a, 'Augmenting the productivity of solar still using jute cloth knitted with sand and heat energy storage', *Desalination*, vol. 443, pp. 122-129.

55. Modi, KV & Modi, GJ 2019, 'Performance of single slope double basin solar stills with small pile of wick materials', *Applied Thermal Engineering*, vol. 149, pp. 723-730.

56. Ahmed Z. Al-Garni 2012, 'Productivity Enhancement of Solar Still Using Water Heater and Cooling Fan', *Journal of Solar Energy Engineering*, vol.134, issue. 031006.

57. Sampathkumar, K & Senthilkumar, P 2012, 'Utilization of solar water heater in a single basin solar still—An experimental study', *Desalination*, vol. 297, pp. 8-19.
58. Omara, ZM, Eltawil, MA & ElNashar, EA 2013, 'A new hybrid desalination system using wicks/solar still and evacuated solar water heater', *Desalination*, vol. 325, pp. 56-69.
59. Gaonwe, TP, Hohne, PA, Kusakana, K 2022, 'Optimal energy management of a solar-assisted heat pump water heating system with a storage system', *Journal of Energy Storage*, vol. 56, issue. 105885.
60. Abdullah, AS 2013, 'Improving the performance of stepped solar still', *Desalination*, vol. 319, pp. 60-65.
61. Kabeel, AE, Mohamed, A 2016, 'Improving the performance of solar still by using PCM as a thermal storage medium under Egyptian conditions', *Desalination*, vol. 383, pp. 22-28.
62. Sathyamurthy R, Harris Samuel, DG, Nagarajan, PK, Arunkumar T, (2016), 'Geometrical variations in solar stills for improving the fresh water yield—A review', *Desalination and Water Treatment*, vol. 57, pp. a21145-21159
63. Hawlader, MNA, Dey, PK, Diab, S & Chung CY 2004, 'Solar assisted heat pump desalination system', *Desalination*, vol. 168, pp. 49-54.
64. Yang, J, Zhang, C, Lin, X, Zhang, Z & Yang, L 2017, 'Waste water desalination system utilizing a low temperature heat pump', *International Journal of Energy Research*, vol. 42, pp. 1132-1138.
65. Srithar, K, Rajaseenivasan, T, Arulmani, M, Gnanavel, R, Vivar, M & Fuentes, M 2018, 'Energy recovery from a vapour compression refrigeration system using humidification dehumidification desalination', *Desalination*, vol. 439, pp. 155-161.
66. Belyayev, Y, Mohanraj, M, Jayaraj, S & Kaltayev A 2019, 'Thermal performance simulation of a heat pump assisted solar desalination system for Kazakhstan conditions', *Heat Transfer Engineering*, vol. 40, pp. 1060-1072.
67. Faegh, M, Shafii, MB 2020, 'Thermal performance assessment of an evaporative condenser-based combined heat pump and humidification dehumidification desalination system', *Desalination*, vol. 496, pp. 114733.
68. Lawal, DU, Jawad, SA & Antar, MA 2020, 'Experimental and theoretical study on a heat pump driven open-air humidification dehumidification desalination system', *Energy*, vol. 207, pp. 118252.
69. Kumar, S & Tiwari, GN 2011, 'Analytical expression for instantaneous exergy efficiency of a shallow basin passive solar still', *International Journal of Thermal Science*, vol. 50, pp. 2543-2549.
70. Sharshir, SW, Yang, N, Peng, G, Kabeel AE 2016, 'Factors affecting solar stills productivity and improvement techniques: A detailed review', *Applied Thermal Engineering*, vol. 100, pp. 267-284. 128
71. Faegh, M, Shafii, MB 2017, 'Experimental investigation of a solar still equipped with an external heat storage system using phase change materials and heat pipes', *Desalination*, vol. 409, pp. 128-135.
72. Elango, C, Gunasekaran, N & Sampathkumar, K 2015, 'Thermal models of solar still—A comprehensive review', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 47, pp. 856-911.

73. Hepbasli, A 2006, 'A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future', Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp. 593-661.

74. Sivakumar, V & Ganapathy, SE, 2016, 'Energy and exergy analysis of single slope passive solar still: an experimental investigation', Desalination and Water Treatment, vol. 55, no. 6, pp. 1433-1444.

75. Holman, JP 2007, 'Experimental methods for engineers', Tata Mcgraw Hill Publishing Company.

76. Е.И. Карлина, Е.Б. Ердеш, Д.Б. Баимбетов, И.Б. Джамакеев, М. Моханрадж, Е.К. Беляев. «*ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ИСПАРЕНИИ И КОНДЕНСАЦИИ ВНУТРИ СОЛНЕЧНОГО ДИСТИЛЛЯТОРА*» была опубликована в журнале «*Вестник Казахстанского-Британского технического Университета*» входящий в перечень изданий, рекомендуемых КОКНВО МНВО РК(<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-3-281-301>)

77. D. Baimbetov, Ye.Karlina, Ye.Yerdesh, S.Syrlybekkyzy, A.Toleukhanov, M.Mohanraj, Ye.Belyayev. Thermal analysis of a compression heat pump-assisted solar still for Caspian regions of Kazakhstan // Springer Nature, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry (2024). <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13446-4> (WoS: Квартиль – Q2, Scopus: Процентиль – 87, SJR – 0.585)

78. [S.Syrlybekkyzy](#), A.Zhidebayeva, A.Aitimova, D. Baimbetov, L.Taizhanova DEVELOPMENT AND EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF NEW DESIGNS OF SOLAR DESALINATION POOLS FOR THE PRODUCTION OF FRESH WATER IN HOT CLIMATES // National Academy of Science Republic of Kazakhstan, News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences (стр. 179-195, №4, 2024).

79. Baimbetov, D.; Yerdesh, Y.; Karlina, Y.; Syrlybekkyzy, S.; Radu, T.; Mohanraj, M.; Belyayev, Y., Numerical Estimation of Potable Water Production for Single-Slope Solar Stills in the Caspian Region, MDPI. Water 2024, 16, 2980.