

На правах рукописи

Альмохаммед Омар Абдулхади Мустафа

Разработка энергосберегающей технологии вакуумной дистилляции воды с применением теплового насоса и солнечного коллектора

05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Казань 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский государственный энергетический университет» (ФГБОУ ВО КГЭУ)

Научные
руководитель: **Тимербаев Наиль Фарирович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», заведующий кафедрой Возобновляемые источники энергии

Официальные
оппоненты: **Пахомов Максим Александрович**
доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник лаборатории термогазодинамики ИТ СО РАН;

Куколев Максим Игоревич
доктор технических наук, старший научный сотрудник, профессор Высшей школы «Гидротехническое и энергетическое строительство» Инженерно-строительного института в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Ведущая
организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина**» г. Екатеринбург

Защита состоится «19» мая 2022 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.082.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» по адресу: 420066, город Казань, улица Красносельская дом 51, аудитория Д-224.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.02.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» и на сайте <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/199?idDiss=132>

Автореферат разослан «18» марта 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.082.02 кандидат
технических наук доцент



Власов Сергей Михайлович

Актуальность работы. Спрос на пресную воду постоянно растет, особенно в странах Ближнего Востока. По данным Глобального альянса по опреснению воды (GCWDA) предположительно к 2025 году почти 1 800 миллионов человек во всем мире будут испытывать острый дефицит пресной воды. На сегодняшний день этот вопрос является одним из наиболее актуальных вопросов устойчивого развития человечества. Перспективным, но в тоже время малоизученным, способом опреснения воды является создание дистилляционных систем опреснения воды, работающих под вакуумом и использующих принцип теплонасосных установок. Такие системы позволяют сократить использование невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов и уменьшить количество выбросов парниковых газов в атмосферу.

Степень разработанности темы исследования. Теоретические и экспериментальные исследования процессов в тепловых насосах для систем дистилляции проводились различными исследователями, среди которых можно выделить как отечественных – И. М. Калнинь, В. В. Бирюк, А. В. Бурмисторов, А. В. Быков, В.И. Горынин, С. М. Токарев, так и зарубежных – К. М. Vijan, R. Semiat и др. Так же можно указать на публикации таких ученых, как И. И. Малафеев, R. Lund, T. Deethayat и др.

Цель работы - повышение энергоэффективности систем дистилляции воды за счёт использования принципа теплового насоса, испарения и конденсации воды под вакуумом и дополнительного подвода тепла от солнечного коллектора.

Основные задачи, поставленные в работе:

1. Проведение теоретического анализа процессов теплопереноса, протекающих в вакуумных теплонасосных системах дистилляции воды.

2. Разработка схемы установки вакуумной дистилляции воды с использованием теплового насоса и солнечного коллектора, обеспечивающей высокую энергоэффективность процесса опреснения воды.

3. Разработка математической модели процессов теплопереноса, протекающих в установке дистилляции воды с применением теплового насоса и внешнего источника тепла и алгоритма её решения.

4. Создание экспериментальной установки и методики проведения экспериментов по вакуумной дистилляции воды.

5. Проведение серии экспериментов для подтверждения работоспособности разработанного технического решения и верификации расчетных зависимостей.

6. Обработка данных, полученных при экспериментальных исследованиях процессов теплопереноса, протекающих при дистилляции воды в вакуумных теплонасосных установках с использованием внешнего источника тепла в виде солнечного коллектора.

7. Разработка схемы промышленной установки дистилляции воды с использованием принципа теплового насоса и солнечных коллекторов.

Научная новизна. Работа содержит научно-обоснованные технические и технологические решения, направленные на снижение энергетических затрат на единицу продукции при производстве опресненной воды:

1. Предложены и обоснованы зависимости влияния отношения давления фреона в конденсаторе и в испарителе теплового насоса на массовый расход дистиллируемой воды и величину затрат энергии на дистилляцию.

2. Определён интервал отношения давления фреона в конденсаторе к давлению фреона в испарителе теплового насоса (2,25-6), при котором в теплонасосной дистилляционной системе эффективен подвод тепла от внешнего источника энергии в виде солнечного теплового коллектора.

3. Получены зависимости, описывающие влияние дополнительного подвода тепла от солнечного коллектора на коэффициенты преобразования как горячей, так и холодной стороны теплового насоса, влияющие на экономию энергетических ресурсов при дистилляции воды.

Теоретическая значимость работы состоит в математическом описании последовательных тепло-массообменных процессов испарения и конденсации воды в вакууме, и введение нового комплексного параметра в виде отношения давления фреона в конденсаторе и испарителе теплового насоса, позволяющего проводить теоретическую оценку энергетической эффективности функционирования дистилляционных систем с использованием теплонасосных преобразователей энергии.

Практическая значимость работы заключается в:

1. Разработке нового, энергосберегающего способа вакуумного теплонасосного опреснения воды с применением внешнего подвода тепла от солнечного коллектора, способствующего экономии энергетических ресурсов.

2. Создании экспериментального стенда для физического моделирования процессов теплопереноса при вакуумной теплонасосной дистилляции воды, который является прототипом для создания промышленных установок опреснения воды с применением тепловых насосов.

3. Получении эмпирических данных для проведения расчетных работ при проектировании установок для опреснения воды методом вакуумной теплонасосной дистилляции.

4. Определении рациональных режимных параметров работы дистилляционной системы, позволяющих достигнуть максимального энергосбережения в процессах опреснения воды.

5. Усовершенствовании конструкции конденсатора и испарителя теплового насоса за счет использования продольных ребер.

Новизна разработанных технических решений подтверждена патентами РФ на изобретение № 2723858 «Устройство для опреснения воды» от 30.06.2019 г и № 2743154 «Градирия низкого давления для дистилляции воды» от 15.02.2021.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных автором данных подтверждается соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований процессов теплопереноса, выполненных с использованием сертифицированных измерительных приборов и апробированных методик измерения. Результаты исследований подвергнуты статистическому анализу и хорошо согласуются с известными экспериментальными и расчетными

данными других авторов. Достоверность результатов обеспечена воспроизводимостью многократно повторенных экспериментов.

Личный вклад автора. Личный вклад автора является определяющим и заключается в формулировке основных идей и решении задач теоретического, экспериментального и прикладного характера. Лично автором проведены все основные теоретические исследования, приведённые в диссертации. При непосредственном участии автора создан экспериментальный стенд и проведены экспериментальные исследования процессов теплопереноса, протекающих при вакуумной теплонасосной дистилляции воды.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Наиболее существенные результаты, выносимые на защиту, относятся к п. № 3 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло. Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов» (частично), п. № 4 «Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками» и п. № 5 «Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах» паспорта специальности 05.14.04 «Промышленная теплоэнергетика».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Математическое описание процесса теплопереноса при вакуумной дистилляции воды с использованием теплонасосной установки и теплового солнечного коллектора.
2. Конструкция разработанного экспериментального стенда и методика проведения экспериментов по изучению вакуумных процессов дистилляции воды, обеспечивающих экономию энергетических ресурсов.
3. Результаты математического и физического моделирования влияния отношения давлений фреона в конденсаторе и в испарителе теплового насоса на потребление энергии системой дистилляции воды, получающей тепловую энергию от теплового насоса и солнечного коллектора.
4. Диапазон значений отношения давлений фреона в конденсаторе и испарителе теплового насоса, при котором рационально применение внешнего источника тепла в теплонасосных установках для повышения их энергоэффективности.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертационной работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Владивосток, 2019 г.; Всероссийской научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники», Казань, 2019 г.; XXIV Всероссийском аспирантско-магистерского научном семинаре, Казань, 2020 г.

Реализация работы. Созданная экспериментальная установка для исследования процессов, протекающих при дистилляции воды под вакуумом и применением теплового насоса, внедрена в учебный процесс ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» при обучении студентов по направлению подготовки 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль подготовки «Возобновляемые источники энергии».

Объекты и методы исследования. Объектом исследования в данной работе являлась соленая вода, подвергаемая процессу дистилляции под вакуумом. Методологической основой исследований являлись современные теоретические представления о процессах теплопереноса, происходящих в разреженных средах и процессах, связанных с фазовым переходом из жидкости в газ. Поставленные задачи решались с применением современных физических методов анализа, использованием теоретического, физического и компьютерного моделирования. Проверка теоретических данных и расчетов осуществлялась экспериментально по известным методикам и планам экспериментов.

Публикации. По тематике исследования опубликовано 9 публикаций, в том числе 2 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 патента, 3 статьи, в журналах Scopus, 1 статья в сборнике научной конференции и 1 статья в сборнике научного семинара.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованной литературы. Основная часть диссертационной работы состоит из 170 страниц, 83 рисунков и 5 таблиц. Библиографический список включает 150 позиций.

Краткое содержание работы. Во введении обоснована актуальность исследования, цели, методы исследования, научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены методы очистки воды путем химической или физической обработки. Выявлены преимущества и недостатки каждого метода. Поставлена цель - снижение стоимости дистиллированной воды за счет внедрения энергосберегающих теплонасосных технологий дистилляции воды под вакуумом с использованием подвода дополнительного тепла от солнечного коллектора, что уменьшает потребление энергии в процессе дистилляции.

Во второй главе представлена схема, описание и математическое моделирование процессов теплопереноса в разрабатываемой системе дистилляции воды с использованием теплового насоса. Представлена принципиальная схема дистилляции воды с использованием теплового насоса и солнечной энергии. Система дистилляции (рис. 1) состоит из двух контуров теплового насоса, один из которых имеет замкнутый цикл, а другой — открытый. Первый контур состоит из компрессора 1, конденсатора 2, дросселя 3 и испарителя 4. В разрабатываемой установке дистилляции используются как горячая, так и холодная сторона теплового насоса, что позволяет существенно повысить энергоэффективность системы дистилляции и обеспечивает экономию энергетических ресурсов. Второй контур состоит из испарителя воды 10, охладителя водяного пара 6, вакуумного насоса 5 и емкости для дистиллированной воды 7. Испарение воды в системе

происходит под вакуумом, создаваемым вакуумным насосом 5. Теплота, отводимая от конденсатора первого контура теплового насоса, расходуется на испарение воды в сосуде 10. Водяной пар охлаждается испарителем первого теплового насоса для увеличения его плотности, что минимизирует необходимую мощность вакуумного насоса. Через клапан 8 осуществляется выход чистой воды. Клапан 9 предназначен для контроля давления внутри контейнера чистой воды. Клапан 11 контролирует датчик концентрации соли, чтобы не пропускать соленую воду, когда ее концентрация превышает допустимый предел. Вакуумметр 12 показывает давление внутри этого контейнера. Неочищенная вода поступает через клапан 13.

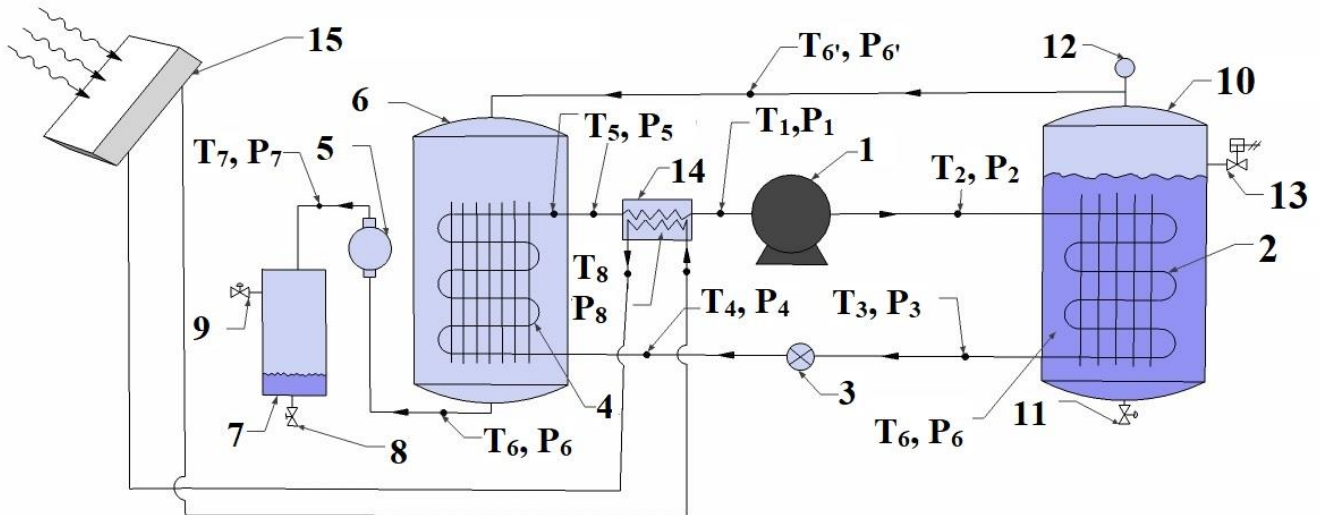


Рис.1. Усовершенствованная система дистилляции

Производительность горячей и холодной стороны теплового насоса была повышена путем нагрева хладагента, поступающего в компрессор, тепловой энергией, передаваемой солнечным коллектором 15 с помощью дополнительного теплообменника (14).

В третьей главе рассматривается методика расчета разработанной системы дистилляции воды. В установке используются обе тепловые стороны теплового насоса, что позволяет повысить энергоэффективность системы. Для повышения эффективности теплообменников, используемых в системе, они усовершенствованы путём добавления продольных ребер для увеличения прочности и интенсивности теплообмена, и уменьшения удельного размера теплообменников. Расчет процессов теплопереноса начинается с конденсатора, который представляет горячую сторону теплового насоса. Испаритель (холодная сторона) теплового насоса охлаждает водяной пар, что позволяет снизить потребление энергии в вакуумном насосе за счет увеличения плотности водяного пара. Максимальное теоретическое значение коэффициента производительности горячей и холодной сторон теплового насоса описывается уравнениями (1) и (2):

$$HCOP_{\text{м.т.}} = \frac{T_r}{T_r - T_x} \quad (1)$$

$$CCOP_{\text{м.т.}} = \frac{T_x}{T_r - T_x} \quad (2)$$

где $HCOR_{м.т.}$ - максимальный коэффициент преобразования для нагревания, $CCOR_{м.т.}$ - максимальный коэффициент преобразования для охлаждения, $T_{г}$ - температура конденсатора в процессе конденсации, $T_{х}$ - температура испарителя в процессе испарения.

Количество теплоты, отводимое от конденсатора, можно определить по формулам (3) и (4):

$$Q_c = G_{хол.} (i_2 - i_3), \quad (3)$$

$$Q_c = k F_k \Delta T_{лк}, \quad (4)$$

$$\text{где } \Delta T_{лк} = \frac{(t_{и} - t_{в}) - (t_{у} - t_{в})}{\ln[(t_{и} - t_{в}) / (t_{у} - t_{в})]}, \quad (5)$$

Q_c - количество теплоты, отводимое от конденсатора, кВт; $G_{хол.}$ - массовый расход фреона, кг/с; i_2 и i_3 - энтальпии фреона на входе и выходе из конденсатора, кДж/кг; k - общий коэффициент теплопередачи теплообменника, Вт/(м² * °С); F_k - площадь внешней поверхности конденсатора, м²; $\Delta T_{лк}$ - средняя логарифмическая разность температур конденсатора, °С; $t_{и}$ и $t_{у}$ - температура фреона на входе и выходе из конденсатора, °С; $t_{в}$ - температура воды вокруг трубки конденсатора, °С.

Количество теплоты, поглощаемое испарителем теплового насоса, можно определить по формулам (6) и (7):

$$Q_e = G_{хол.} (i_1 - i_4), \quad (6)$$

$$Q_e = k F_{и} \Delta T_{ли}, \quad (7)$$

$$\text{где } \Delta T_{ли} = \frac{(t_{в.п.} - t_{у}) - (t_{в.п.} - t_{и})}{\ln[(t_{в.п.} - t_{у}) / (t_{в.п.} - t_{и})]}, \quad (8)$$

Q_e - количество теплоты, поглощаемое испарителем, кВт, i_1 и i_4 - энтальпия фреона на входе и выходе испарителя, кДж/кг, $t_{и}$ и $t_{у}$ - температура на входе и выходе из испарителя, °С, $t_{в.п.}$ - температура водяного пара вокруг трубки испарителя, °С.

Общий коэффициент теплопередачи можно определить по формуле (9):

$$k = \frac{D_o^{-1}}{\frac{1}{\alpha_o D_o} + \frac{\ln(D_o * d_i^{-1})}{2\lambda} + \frac{1}{\alpha_i d_i}}, \quad (9)$$

где α_o , α_i - коэффициенты конвективного теплообмена внешней и внутренней жидкостей, соответственно, Вт/м²·°С; D_o , d_i - наружный и внутренний диаметры трубки, м, λ - теплопроводность материала трубки, Вт/м·°С.

Количество электроэнергии, потребляемой компрессором, можно определить по формулам (10), (11) и (12):

$$N_{комп.} = (I * V * \cos\varphi) / \eta_{комп.}, \quad (10)$$

$$N_{комп.} = S_{хол.} (P_c - P_e), \quad (11)$$

$$N_{комп.} = G_{хол.} (i_2 - i_1) / \eta_{isent.}, \quad (12)$$

где $N_{комп.}$ - мощность, потребляемая компрессором, кВт; $\eta_{комп.}$ - общий КПД компрессора; I - сила тока, потребляемого компрессором, А; V - напряжение электрического источника, В, $\cos\varphi$ - коэффициент мощности; $S_{хол.}$ - объемный расход фреона, м³/с; P_e и P_c - давление фреона в линии всасывания и нагнетания, Па; $G_{хол.}$ - массовый расход фреона, кг / с; i_1 и i_2 энтальпия фреона на входе и

выходе компрессора соответственно, кДж/кг; $\eta_{isent.}$ – изоэнтروпический КПД компрессора.

Массовый расход фреона можно определить по формуле (13):

$$G_{хол.} = \frac{(I * V * \cos \varphi) \eta_{isent.}}{(i_2 - i_1) \eta_{комп}} . \quad (13)$$

Массовый расход водяного пара определяется зависимостями (14), (15) и (16):

$$Q_c = Q_B , \quad (14)$$

$$G_{в.п.} [(i_{\Gamma} - i_{ж}) + (c_d * \Delta T_B)] = G_{хол.} (i_2 - i_3) , \quad (15)$$

$$G_{в.п.} = \frac{G_{хол.} (i_2 - i_3)}{[(i_{\Gamma} - i_{ж}) + (c_d * \Delta T_B)]} , \quad (16)$$

где Q_c - тепло, отводимое конденсатором теплового насоса в воду, кВт; Q_B - тепло, поглощаемое водой для испарения, кВт; $G_{в.п.}$ – массовый расход водяного пара, кг/с; ΔT_B - разница между температурами поступающей и кипящей воды в испарителе, °С; i_{Γ} – энтальпия насыщенного водяного пара при определенной температуре, кДж / кг; $i_{ж}$ – энтальпия воды при определенной температуре, кДж / кг.

Энтальпию водяного пара, поступающего в вакуумный насос, можно определить по формуле (17):

$$i_{в.п.} = i_{\Gamma} - \left[\frac{G_{хол.} (i_1 - i_4)}{G_{в.п.}} \right] . \quad (17)$$

Влагосодержание водяного пара, поступающего в вакуумный насос, определяется соотношением (18):

$$X = \frac{i_{в.п.}}{\frac{(i_{\Gamma} - i_{ж})}{10}} . \quad (18)$$

Объемный расход водяного пара определяется формулой (19).

$$S = G_{в.п.} * v_{в.п.} , \quad (19)$$

$$\text{где } v_{в.п.} = X \left(\frac{(v_{\Gamma} - v_{ж})}{10} \right) , \quad (20)$$

где $v_{в.п.}$ - удельный объем водяного пара, поступающего в вакуумный насос, м³/кг; v_{Γ} – удельный объем насыщенного водяного пара, поступающего в вакуумный насос, м³/кг; $v_{ж}$ – удельный объем воды при определенной температуре, кДж/ кг.

Мощность вакуумного насоса, можно определить с помощью уравнения (21):

$$N_{в.на.} = [S * (P_2 - P_1)] / \eta_{в.н.} . \quad (21)$$

где $N_{в.на.}$ - мощность вакуумного насоса, Вт, P_2 - атмосферное давление, Па, P_1 - давление на линии всасывания вакуумного насоса (давление внутри емкости для испарения воды), Па, $\eta_{в.н.}$ - общий КПД вакуумного насоса.

Общая мощность, потребляемая установкой, рассчитывается как:

$$N_T = N_{комп.} + N_{в.на.} . \quad (22)$$

Производительность установки на дистиллированной воде определяется по формуле (23):

$$S.ч = \frac{G_{в.п.}}{\rho_B} * 3.6 * 10^6 , \quad (23)$$

где $S.ч$ – количество дистиллированной воды, л/ч; ρ_B - плотность дистиллированной воды, кг / м³.

Затраты энергии на производство 1 кг дистиллированной воды рассчитываются по уравнению (24):

$$\mathcal{E}_d = \frac{N_T}{G_{в.п.}} \quad (24)$$

Отношение давления фреона в конденсаторе к давлению фреона в испарителе теплового насоса является комплексным показателем, от которого зависят многие технологические параметры функционирования разработанной нами системы дистилляции, в том числе и ее энергоэффективность:

$$P_{отн.} = \frac{P_c}{P_e}, \quad (25)$$

где $P_{отн.}$ - отношение давлений; P_c - давление в конденсаторе, Па; P_e - давление в испарителе, Па.

Был разработан алгоритм расчета, представленный на рисунке 2.

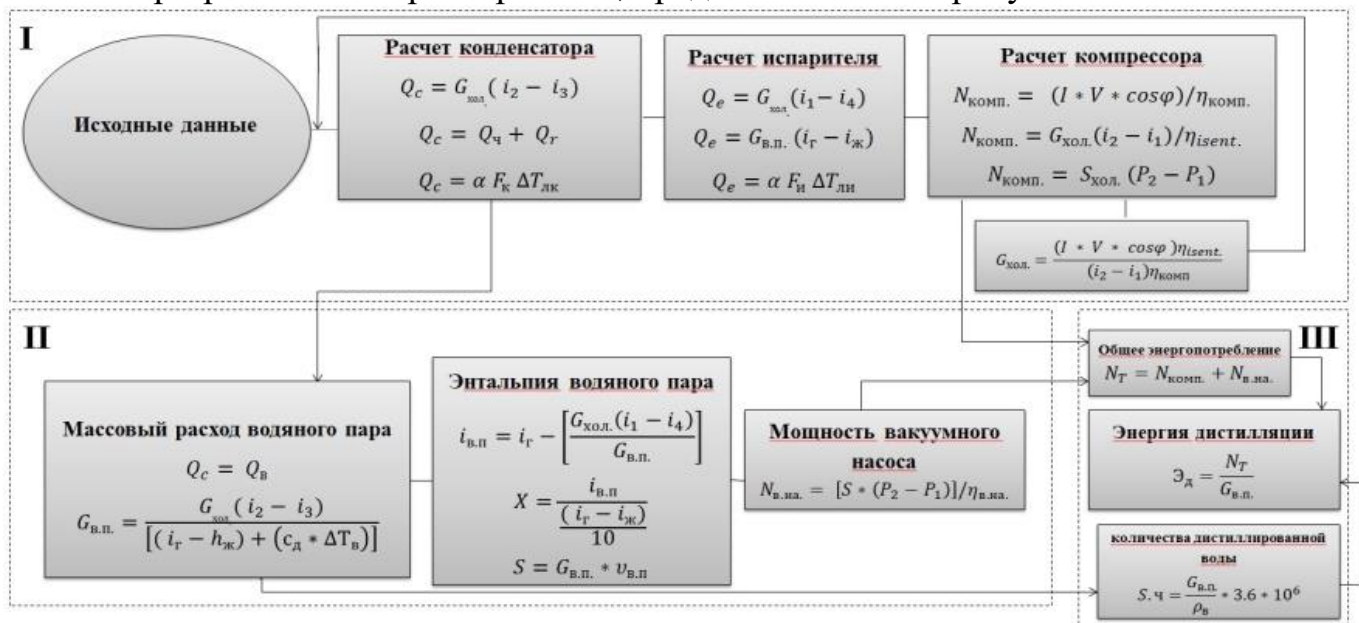


Рис. 2. Алгоритм расчета по математической модели системы дистилляции воды

В системе используется солнечная энергия в качестве дополнительного источника. Ирак - одна из стран с высокой интенсивностью солнечной радиации. Среднемесячные значения солнечной радиации, показаны на рисунке 3. На рисунке 4 показано распределение интенсивности среднегодового солнечного излучения на территории Ирака. Эти значения достаточно высоки и составляют от 120 до 200 кВт·ч/м².

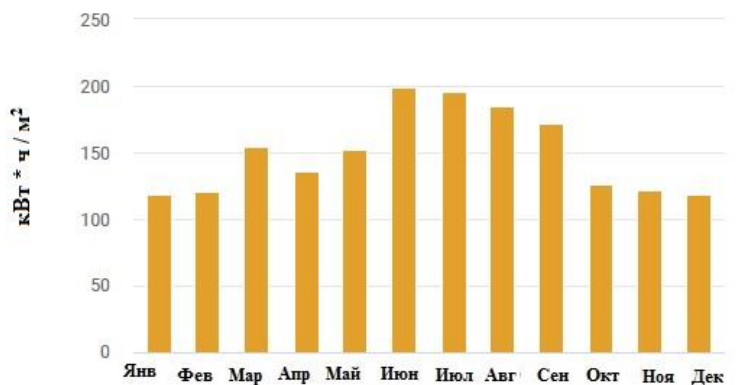


Рис. 3 Среднемесячные значения солнечной радиации в Ираке

Исследования процесса дистилляции воды с применением теплового насоса и солнечного коллектора производилось на лабораторном стенде (рис. 5),

изготовленном в техническом колледже Мосула, входящем в состав Северного технического университета (Ирак). Результаты проведенных исследований представлены в виде графических зависимостей влияния отношений давления P_c/P_e на основные параметры работы дистилляционной системы.

Исследования производились и релевантны для диапазона давлений фреона в конденсаторе теплового насоса (8 - 10 бар) и диапазона давлений фреона в испарителе теплового насоса (0,35 – 5,5 бар).

Связь между отношением давлений и коэффициентом производительности горячей стороны теплового насоса НСОР обратно пропорциональна, поскольку приращение отношения давлений увеличивает энергию, необходимую для перекачивания хладагента из испарителя в конденсатор. Характер этого влияния, определенный в

результате математического моделирования, представлен на рисунке (6а), для различных температур фреона в конце процесса конденсации. Коэффициент производительности холодной стороны теплового насоса ССОР представляет собой ту же зависимость, что и коэффициент производительности горячей стороны теплового насоса, потому что они оба зависят от отношения давлений в системе (рис. 6б).

На рисунке 7а показано, что коэффициент производительности горячей стороны теплового насоса обратно пропорционален отношению давлений P_c/P_e , а на рисунке 7б отражено, что коэффициент производительности

Карта солнечных ресурсов

Прямое нормальное облучение
Ирак

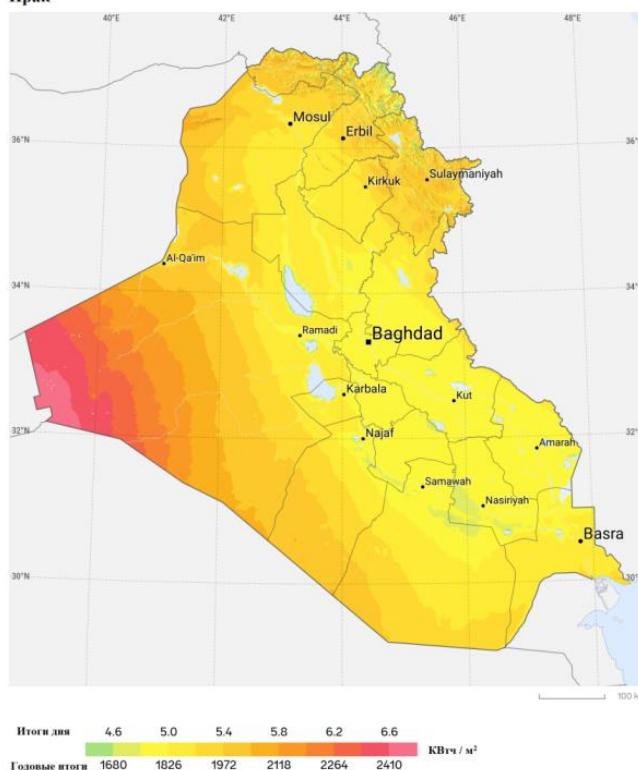


Рис. 4. Среднегодовое значение солнечной радиации в Ираке.



Рис. 5. Лабораторный стенд для исследования процесса дистилляции

холодной стороны теплового насоса также обратно пропорционален отношению давлений P_c/P_e .

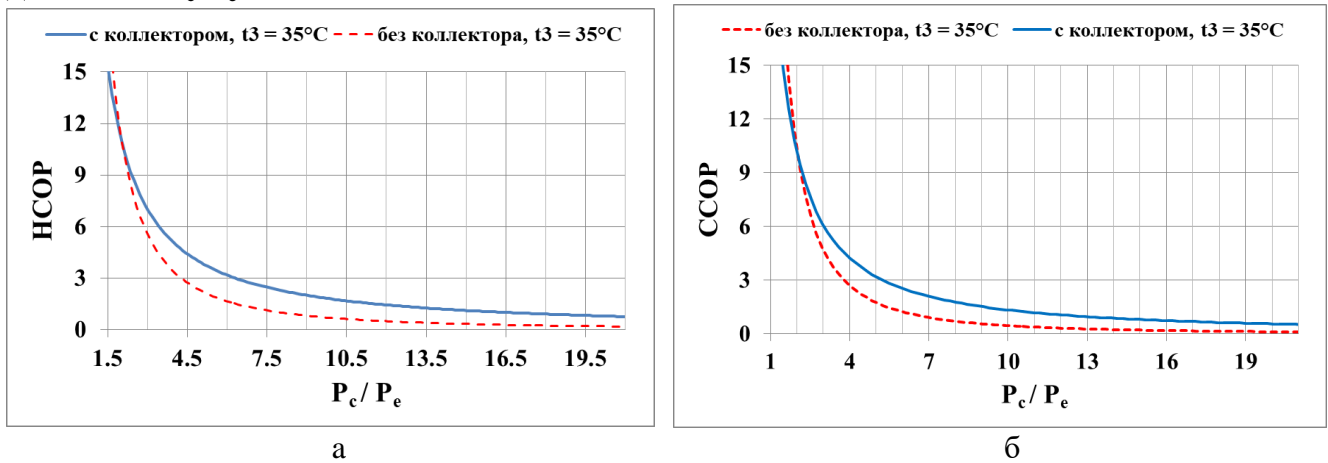


Рис. 6. а) Влияние отношения давления на коэффициент производительности горячей стороны теплового насоса; б) Влияние отношения давления на коэффициент производительности холодной стороны теплового насоса.

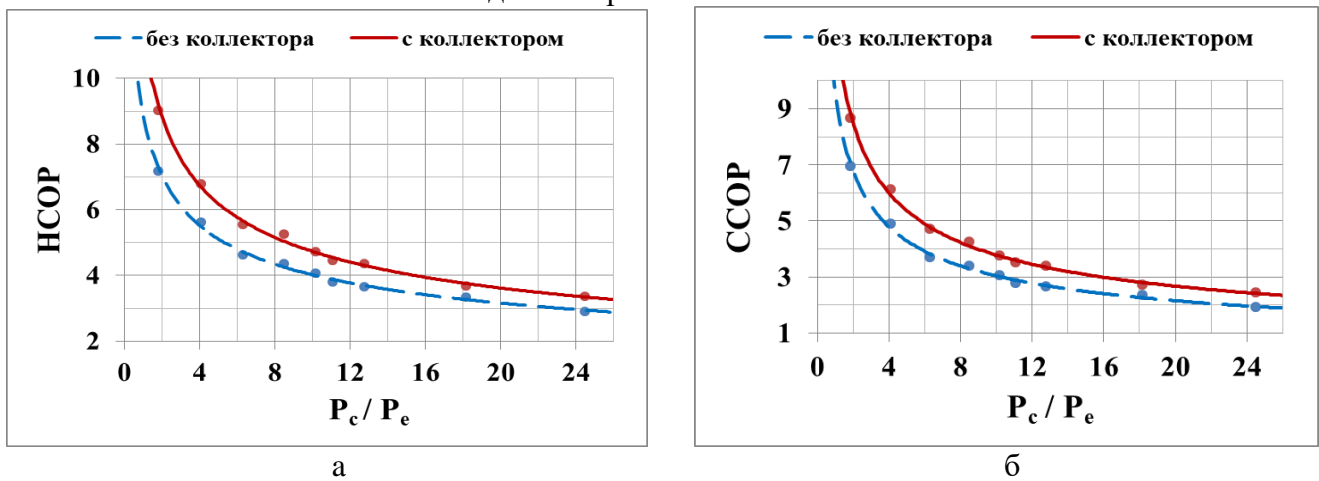


Рис. 7 а) Влияние отношения давления на коэффициент производительности горячей стороны теплового насоса. б) Влияние отношения давления на коэффициент производительности холодной стороны теплового насоса.

Результаты математического моделирования влияния изменения отношения давлений на массовый расход дистиллированной воды при разных температурах фреона на выходе из конденсатора представлены на рисунке 8. Результаты лабораторных исследований проиллюстрированы на рисунке 9.

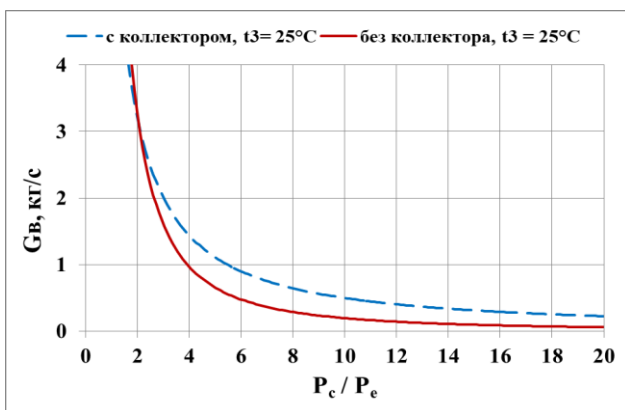


Рис. 8. Результаты математического моделирования влияния отношения давления на массовый расход дистиллированной воды

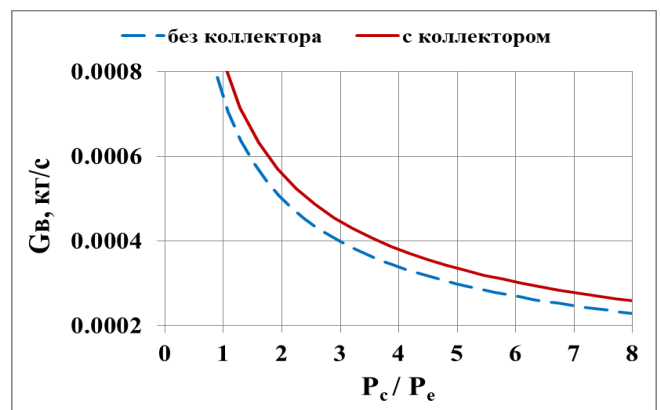


Рис. 9. Результаты лабораторного исследования влияния отношения давления на массовый расход дистиллированной воды

Общее энергопотребление системы складывается из энергии потребляемой компрессором теплового насоса и вакуумным насосом. При постоянной мощности, компрессора теплового насоса общее энергопотребление изменяется в зависимости от объемного расхода водяного пара, проходящего через вакуумный насос. Кривые на рисунке 10 дают информацию о потреблении энергии системой.

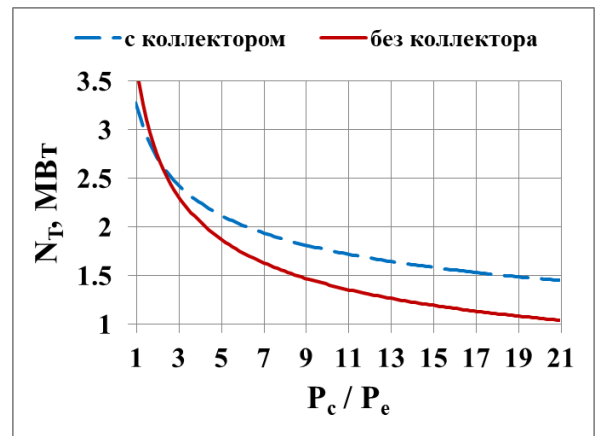


Рис. 10. Влияние отношения давления на потребляемую мощность системой

В данной системе вода испаряется и конденсируется в одном и том же контуре, поэтому общая потребляемая энергия включает энергию, необходимую для обоих процессов. Энергия дистилляции прямо пропорциональна отношению давлений. На рисунке 11 представлены результаты сравнения затрат энергии на дистилляцию традиционными системами дистилляции без использования теплового насоса и разработанной в данной работе системой с тепловым насосом и солнечным коллектором. Анализ кривых показывает увеличение энергоэффективности процесса дистилляции, что приводит к энергосбережению и снижает затраты энергии почти в 2 раза.

Рисунок 12 показывает влияние отношения давлений на производительность дистилляционной системы.

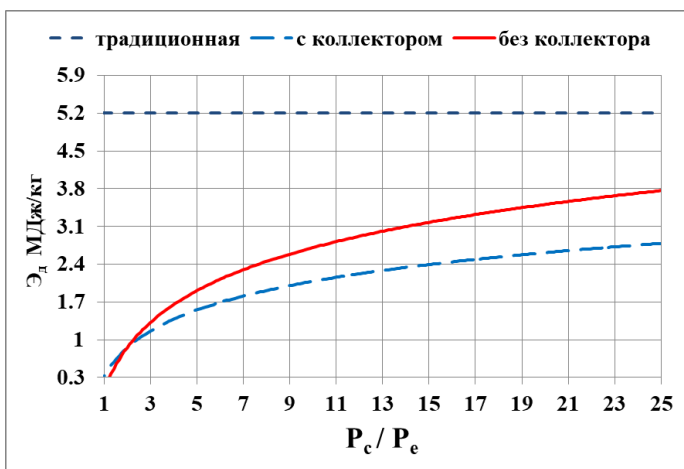


Рис. 11. Влияние отношения давления на энергию, необходимую для дистилляции

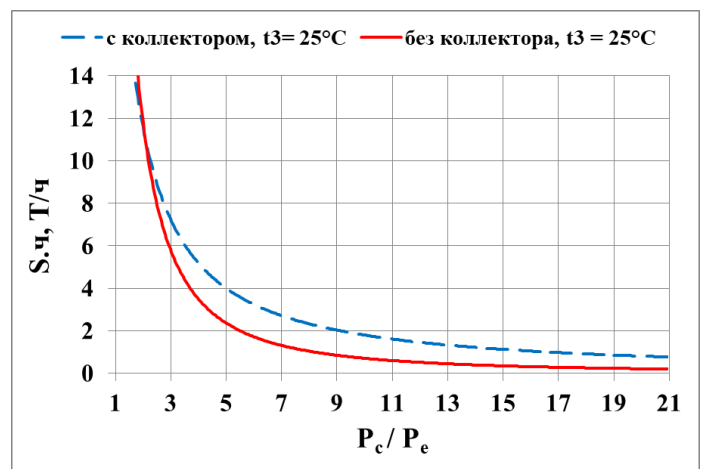
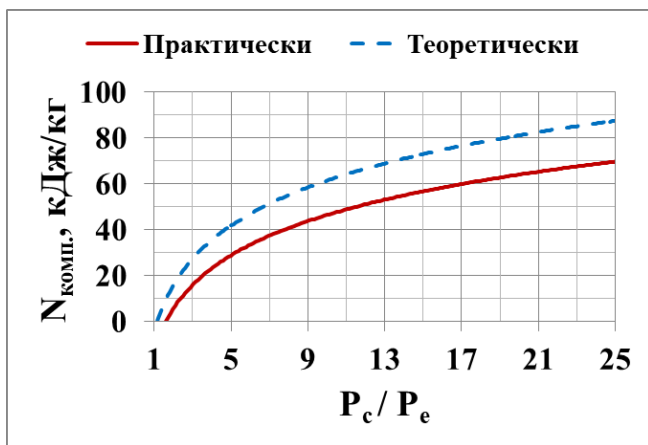
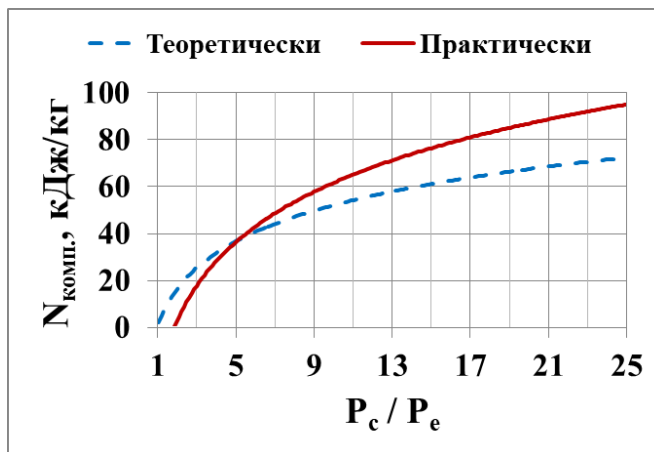


Рис. 12. Влияние отношения давления на производительность системы

Для определения адекватности разработанной математической модели проведено сравнение результатов математического моделирования с результатами лабораторных экспериментов. На рисунке 13 представлено сравнение результатов математического моделирования и результатов лабораторных экспериментов для систем с дополнительным подводом тепла от солнечного коллектора и без него.



а



б

Рис. 13 а) Соотношение между отношением давлений и потреблением энергии компрессором теплового насоса без использования солнечного коллектора; б) Соотношение между отношением давлений и потреблением энергии компрессором теплового насоса с солнечным коллектором.

На рисунке 14 представлена схема промышленной установки для дистилляции воды, разработанная на базе проведенных исследований. Расчетная производительность установки составляет до 17,6 т/ч дистиллированной воды.

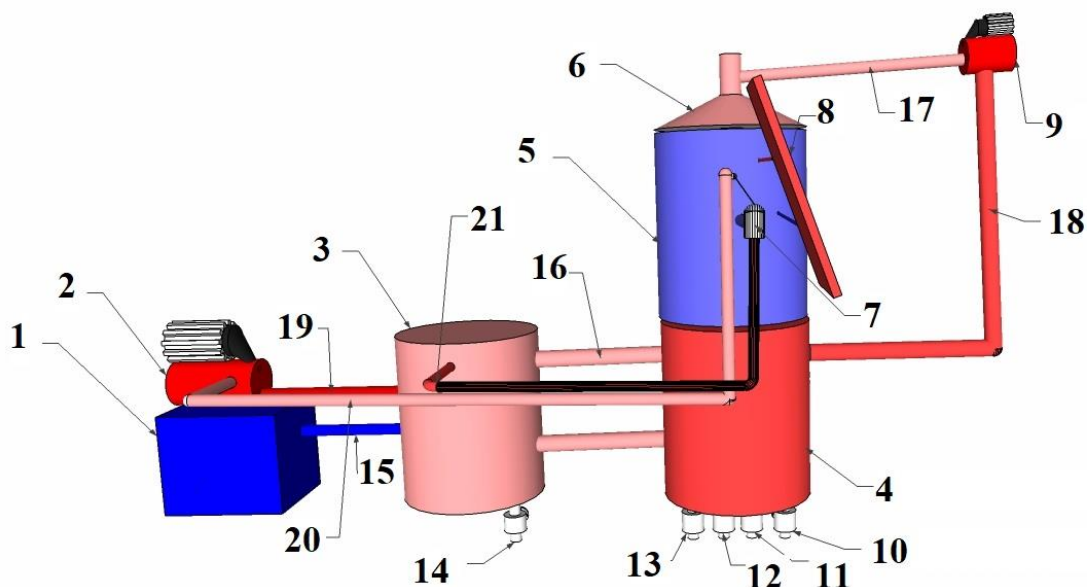


Рис. 14. Схема промышленной установкой дистилляции воды с производительностью 17.6 т/ч
 1- система предварительной обработки воды, 2- компрессор фреона, 3- колонна предварительного нагрева воды, 4- испаритель воды, 5- охладитель водяного пара, 6- конус сбора водяного пара, 7- расширительное устройство фреона, 8 - солнечный коллектор, 9 - вакуумный насос, 10 - клапан водяного конденсатора первой ступени, 11 - клапан водяного конденсатора второй ступени, 12 - клапан водяного конденсатора третьей ступени, 13 - клапан отвода соленой воды, 14 - клапан водяного конденсатора четвертой ступени, 15 - впускная труба сырой воды, 16 - передающая труба предварительно нагретой сырой воды, 17 - всасывающая труба водяного пара, 18 - труба отвода водяного пара, 19 - фреон трубка для выпуска газа, 20 - трубка для всасывания фреона, 21 - трубка для выпуска жидкого фреона.

На рисунке 15 приведено сравнение срока окупаемости разработанной промышленной системы дистилляции с традиционными системами дистилляции воды. Из рисунка 15а видно, что многоступенчатая дистилляция воды (MED) должна проработать около 8500 часов, чтобы достичь точки окупаемости, система

многоступенчатой флэш-дистилляции (MSF) имеет период окупаемости около 6000 часов, а разработанная нами система имеет период окупаемости около 3200 часов при установленной на рынке стоимости воды (584 руб. / м³).

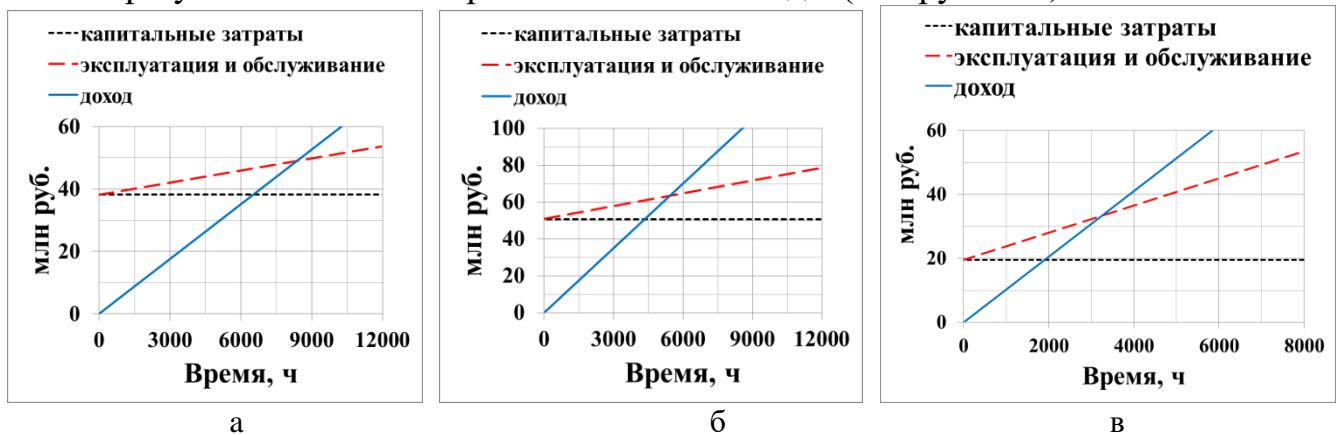


Рис. 15 а) MED технология (производительность до 10 т/ч). б) MSF технология (производительность до 20 т/ч). в) Усовершенствованная система (производительность до 17,6 т/ч)

Основные результаты исследования и выводы.

- 1) Разработано и экспериментально подтверждено математическое описание процессов теплопереноса, протекающих при вакуумной дистилляции воды с использованием теплонасосной установки и внешнего источника тепла в виде теплового солнечного коллектора.
- 2) Тепловой насос можно улучшить за счет дополнительного теплообменника, использующего солнечную энергию для нагрева хладагента, поступающего в компрессор.
- 3) Разработана схема установки вакуумной дистилляции воды с использованием теплового насоса и солнечного коллектора.
- 4) Определено, что отношение давлений фреона в конденсаторе и испарителе теплового насоса, является комплексным показателем, позволяющим оценить уровень энергосбережения в процессах дистилляции воды с применением теплового насоса.
- 5) Зависимость между отношением давлений и коэффициентом производительности теплового насоса является обратно пропорциональной, поскольку приращение отношения давлений увеличивает сопротивление потоку, что приводит к росту затрат энергии, необходимой для перекачки хладагента из испарителя в конденсатор.
- 6) Определена рациональная величина относительного давления, для теплонасосных систем дистилляции воды с применением солнечных коллекторов, находящаяся в диапазоне от 2,25 до 6, которая обеспечивает максимальное энергосбережение при процессе дистилляции воды.
- 7) Разработанная технология дистилляции воды с применением теплового насоса позволяет снизить энергопотребление процесса дистилляции воды в 2,5-3,2 раза по сравнению с традиционными дистилляционными установками.

Основные публикации по теме работы.

Статьи в журналах, входящих в перечень ВАК.

1. Альмохаммед О.А.М., Тимербаев Н.Ф., Мазаров И.Ю. Применение теплового насоса для дистилляции воды// Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019, № 3. С. 57-66.
2. Тимербаев Н.Ф., Али А.К., Альмохаммед Омар Абдулхади Мустафа, Корякин А.Р. Моделирование влияния продольного прямоугольного оребрения на эффективность теплообмена в двухтрубном теплообменнике// Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2019. Т 21. № 4. С. 48-57.

Статьи в журналах, входящих в перечень SCOPUS.

3. Timerbaev N. F., Almohammed O. A. M., Ali A. K. Longitudinal Fin Effect on Effectiveness of Double Pipe Heat Exchanger. Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. 2018. Pp. 605-614. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_63.
4. Almohammed O. A. M., Timerbaev N. F., Ahmad B. I., Heat Pump Application for Water Distillation, 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), Vladivostok, Russia, 2019, pp. 1-5, DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934168.
5. Almohammed O. A. M., Philippova F. M., Alhajj Hassan F. I., Timerbaev N. F., Fomin A. A. Practical study on heat pump enhancement by the solar energy. E3S Web Conf. Vol. 288, 2021, International Symposium "Sustainable Energy and Power Engineering 2021" (SUSE-2021) DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801069>.

Статьи в прочих сборниках и материалах.

6. Тимербаев Н. Ф., Али. А. К., Алмохаммед О. А. М. Численное исследование улучшения двухтрубного теплообменника с помощью продольного ребра// Всероссийская научно-практическая конференция «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» сборник 2019, С. 191-197.
7. Тимербаев Н.Ф., Альмохаммед О.А.М., Филиппова Ф.М., Насырова Э. Н. The heat pump enhancement by the solar collector and using in effective distillation system construction// «XXIV Всероссийский аспирантско - магистерский научный семинар» сборник 2020. С. 99-101.

Патенты.

8. Пат. 2723858 Российская Федерация, МПК7. Устройство для опреснения воды/[Текст] / Альмохаммед О. А. М., Тимербаев Н. Ф., Касимов А. М. российский патент №. 2723858 в 17.06.2020.
9. Пат. 2743154 Российская Федерация, МПК7. Градирня низкого давления для дистилляции воды /[Текст] / Альмохаммед О. А. М., Тимербаев Н. Ф., Касимов А. М., Салих Ясин Х. Н. российский патент №. 2743154 в 15.02.2021.