

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



На правах рукописи

Касим Мухаммед Абдулхалик Касим

**Разработка и оптимизация термоэлектрических генераторов и их
интеграция с фотоэлектрической панелью для применения в отдаленных
районах Республики Ирак**

2.4.5. Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2023

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент,
Велькин Владимир Иванович

Официальные оппоненты:

Чолах Сеиф Османович, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, профессор кафедры электрофизики Физико-технологического института;

Куколев Максим Игоревич, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», профессор Высшей школы «Гидротехническое и энергетическое строительство» Инженерно-строительного института;

Мартьянов Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», Г. Челябинск, доцент кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»

Защита состоится «30» марта 2023 г. в 12:00 ч на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=4411>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Постоянный экономический рост, развитие и урбанизация стран сопровождаются увеличением потребления электроэнергии в мире. В настоящее время производство электроэнергии из невозобновляемых источников энергии составляет 71,9 %, из возобновляемых – 28,1%. Развитые страны, такие как США, Китай, Россия, страны ЕС, с каждым годом увеличивают темпы развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. По данным Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA), установленная мощность ВИЭ в 2022 г. достигла 3,064 ГВт.

На данный момент в Ираке только 2% от всей выработанной электроэнергии приходится на возобновляемые источники энергии (установленная мощность гидроэлектростанций составляет 1,864 МВт, солнечных электростанций – 50 МВт), так как страна имеет значительные запасы ископаемого топлива, которое используется для выработки электроэнергии.

В настоящее время, разрыв между спросом и предложением на энергию в Ираке увеличился. Максимальная мощность нагрузки составила 28 ГВт, в то время как генерация составляет только 16 ГВт, и большая её часть приходится на электростанции, работающие на ископаемом топливе. Таким образом, несмотря на большие запасы нефти и газа, в Ираке наблюдается дефицит электроэнергии и ухудшение экологической обстановки. Для увеличения производства электроэнергии могут использоваться традиционные и возобновляемые источники энергии. Ирак расположен в жаркой климатической зоне, поэтому страна имеет возможность более эффективно использовать тепловую и солнечную энергию.

В последнее 5-10 лет наряду с солнечными фотоэлектрическими панелями вызывает интерес применение термоэлектрических генераторов (ТЭГ). ТЭГ модули могут работать автономно, что удобно для использования на удаленных территориях, а также совместно с ФЭП установками для повышения эффективности и снижения воздействия на окружающую среду. ТЭГ работают без промежуточного преобразования энергии, обладают высокой надежностью, бесшумны, экологичны. Важным преимуществом ТЭГ является отсутствие движущих частей, а, следовательно, вибраций. В Ираке используются фотоэлектрические панели для получения электроэнергии, но КПД таких установок зависит от правильного расположения панели относительно солнца, уровня радиации, что для ТЭГ модулей не имеет значения. Таким образом, исследования по повышению эффективности применения ТЭГ являются актуальными.

Степень разработанности темы исследования. Известные российские ученые занимались исследованиями в области использования возобновляемых и гибридных источников энергии для энергоснабжения сельских и отдаленных населенных пунктов и разработки электростанций на основе возобновляемых источников энергии: Алексеев В.А., Алферов Ж.И., Алексеенко С.В., Стребков Д.С., Безруких П.П., Елистратов В.В. Харченко В.В, Щеклеин С.Е., Шерязов С.К. Из зарубежных ученых можно указать известных: Fini M. A. (Технологический университет К. Н. Туси, Иран), Zhang J. (Нанкинский университет аэронавтики и астронавтики, Китай), R. Monnier (Лаборатория физики твердого тела, ИТН Цюрих). Gao Min (Университет Кардиффа, Соединенное Королевство).

Цель исследования: Разработка и оптимизация системы ТЭГ с использованием солнечной энергии для применения в отдаленных районах Республики Ирак

Для достижения этой цели были определены следующие **задачи**:

1. Разработать, создать и исследовать конструкцию термоэлектрических генераторов на основе использования солнечной энергии, линз Френеля и теплообменника для повышения эффективности ТЭГ.
2. Разработать и создать конструкцию ТЭГ из последовательных и параллельных массивов панелей (2×10 ТЭГ, 15×10 ТЭГ) для исследования эффективности выработки электроэнергии за счет использования водопроводной воды и солнечного нагревателя.

3. Разработать, создать и исследовать конструкцию гибридной системы в составе ФЭП и ТЭГ (HPVTEG) с использованием водяного теплообменника для повышения КПД установки.
4. Провести теоретический и численный анализ параметров (КПД, мощность - характеристики) в разработанном модуле ТЭГ с использованием программы ANSYS на основе кода (CFD).
5. Выполнить теоретический анализ и исследование системы, состоящей из солнечной панели и термоэлектрического генератора (ФЭП-ТЭГ) для повышения эффективности и стабильности системы с использованием алгоритмов поиска максимальной точки мощности (MPPT) на базе MATLAB SIMULINK.

Объект исследования: термоэлектродгенератор на основе эффекта Зеебека для производства электроэнергии.

Предмет исследования: Эффективность модулей ТЭГ с использованием различных видов ВИЭ и типов охлаждения

Методы исследования: В основу исследований были положены фундаментальные законы возобновляемой и нетрадиционной энергетики. В ходе экспериментов по исследованию процессов электрической генерации ТЭГ и ФЭП использовались основы и теория эффектов Зеебека и фотогальванического эффекта. Для оценки производительности и эффективности ТЭГ и фотоэлектрических систем, проведения экспериментальных исследований использовались способы рекуперации и переноса отработанного тепла. Для проведения теоретических расчетов использовались алгоритмы в программах MATLAB и ANSYS. Теоретическая модель системы основана на алгоритмах и коде CFD.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального исследования использования панелей для генерации и оптимизация электрической энергии с использованием солнечной энергии и линз Френеля и теплообменники.
2. Результаты экспериментальных панелей 2x10 ТЭГ, 15x10 ТЭГ из последовательных и параллельных конфигураций массивов ТЭГ для получения электрической энергии с использованием в качестве охладителя воды с двухслойным теплообменником.
3. Результаты экспериментального исследования гибридной системы HPVTEG для повышения КПД установки с использованием водяного теплообменника.
4. Результаты теоретического и численного анализа теплообменных процессов в ТЭГ с использованием программы ANSYS на основе кода CFD.
5. Результаты теоретического исследования при моделировании гибридной системы ФЭП-ТЭГ для повышения эффективности и стабильности системы с использованием алгоритмов MPPT.

Научная новизна диссертационного исследования

- 1- Впервые предложен способ для увеличения мощности и эффективности ТЭГ модулей с использованием солнечной энергии и фотоэлектрических преобразователей (ФЭП).
- 2- Впервые предложен способ для увеличения мощности и эффективности ТЭГ с использованием двухслойного теплообменника и водопроводной воды.
- 3- Предложена экспериментальная гибридная система из фотоэлектрического преобразователя и термогенератора HPVTEG для повышения КПД установки с использованием водяного теплообменника.
- 4- На базе программы ANSYS и кода CFD выполнен теоретический анализ ТЭГ и расчет повышения КПД в зависимости от толщины нагреваемой пластины, обращенной к солнцу, и скорости потока воды на охлаждаемой поверхности ТЭГ.
- 5- Разработана и предложена с применением программ MATLAB SIMULINK гибридная система ФЭП-ТЭГ с использованием алгоритмов поиска максимальной мощности (MPPT).

- 6- Показано, что электрическая мощность модулей ТЭГ уменьшается, если используется одна линза Френеля с большой площадью, и наоборот, мощность увеличивается, если применяется несколько линз Френеля с малой площадью.
- 7- Разработан и реализован метод охлаждения солнечных фотоэлектрических модулей с использованием в комбинации с ТЭГ и теплообменника, что позволило повысить эффективность ФЭП на 10-16%.

Теоретическая и практическая значимость: работа связана с проектированием различных видов ТЭГ панелей, изготовленных из последовательного и параллельного соединения модулей для получения требуемого напряжения и мощности. Экспериментально были реализованы механизмы получения тепловой энергии напрямую от солнечной радиации или от трубопроводов, которые используются для бытовых нужд, далее тепловая энергия преобразуется в полезную электрическую. Гибридная система ФЭП-ТЭГ может быть использована в удаленных регионах, лишенных централизованного энергоснабжения.

Достоверность и обоснованность подтверждается тем, что полученные научные результаты базируются на известных теоретических законах возобновляемой и нетрадиционной энергетики, математическом моделировании на базе известных прикладных программ и удовлетворительными результатами экспериментов, согласующихся с данными других авторов.

Личный вклад автора:

1. Предложена комбинация ТЭГ с использованием линз Френеля и солнечных фотоэлектрических преобразователей для повышения производства энергии из модуля ТЭГ.
2. Проведено исследование ТЭГ различных геометрий (ТЭГ 2x10 и 15x10) с использованием двухслойного теплообменника.
3. Проведены экспериментальные исследования эффективности разработанных методов повышения КПД ФЭП с использованным ТЭГ в условиях высоких температур окружающей среды.
4. Выполнен теоретический анализ моделей ТЭГ с использованием программ ANSYS.
5. Разработана теоретическая модель гибридной системы ФЭП-ТЭГ с использованием программы MATLAB.

Апробация работы: результаты представлены и обсуждены на следующих конференциях: Первая международная конференция по достижениям в области физических наук и материалов (ICAPSM 2020), Коимбатур, Тамил Наду, Индия, 13–14 августа 2020 г; Международный молодежный Даниловский энергетический форум «Энерго- и ресурсосбережение», «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», «Атомная энергетика» (Екатеринбург, УрФУ, 2022); Всероссийская конференция с международным участием Ural Project of Energy Conference, (УрФУ, 19 декабря 2022 г); Выставка научно-исследовательских работ и инженерных разработок молодых ученых (Екатеринбург, 29 ноября 2022). XIX международная конференция «Возобновляемая и малая энергетика – 2022». Энергосбережение. Автономные системы энергоснабжения стационарных и подвижных объектов, НИУ Московский Энергетический Институт (МЭИ), г. (Москва, Россия, 20-21 октября 2022 г.); Третья международная конференция по достижениям в области физических наук и материалов, (ICAPSM 2022) (Коимбатур, Индия, 18-19 августа 2022 г.); Вторая глобальная конференция по последним достижениям в области устойчивых материалов (GCRASM 2022), (Мангалуру, Индия, 28-29 июля 2022 г.); Международная конференция по новым технологиям в области электроэнергетики, электроники и вычислительной техники (ICE4CT2022) (Малайзия, 28-29 декабря 2022 г.).

Публикации: Результаты диссертации опубликованы в 25 статьях, в том числе 19 статей опубликовано в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 17 статей индексируются в международных базах

цитирования Scopus, Web of Science; 6 статей в сборниках международных и российских научных конференций.

Структура и объём диссертации: Диссертации содержит 160 страниц, 98 рисунков и 21 таблиц, включает вступление, 5 глав, выводы, 208 литературных ссылок и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ:

Во вводной части представлена актуальность темы, практическая значимость результатов.

Первая глава содержит обзор текущего состояния энергетики в Ираке и потенциал возобновляемых источников энергии, описание различных доступных и возможных в стране возобновляемых источников энергии: солнечной энергии для выработки электроэнергии, энергии ветра, биомассы, биотоплива и гидроэнергетики. Представлен Закон о возобновляемых источниках энергии (Закон об электричестве № 53 от 2017 года), принятый Министерством энергетики и правительством Ирака, который направлен на активизацию и использование возобновляемых источников энергии, защиту окружающей среды и смягчение последствий изменения климата. Показана организационная структура электроэнергетического сектора страны, а также описано очень слабое развитие ВИЭ в настоящее время. Поставлены задачи исследования.

Во второй главе представлены две экспериментальные установки для оптимизации и разработки методов увеличения мощности, получаемой от ТЭГ в зависимости от эффекта Зеебека за счет увеличения разности температур, создаваемой на двух поверхностях ТЭГ. В первом эксперименте использовалась линза Френеля, во втором был использован теплообменник с двухходовым потоком. Приведены описания основных структур, методы проведения экспериментальных работ и результаты обработки. Пилотные установки были установлены на крыше здания в Багдаде (Рис. 1, 7 и 10).

Значение разности температур (ΔT) обеспечивает передачу тепла и возникающий поток электронов от полупроводников n-типа к полупроводникам p-типа, а генерируемое напряжение вычисляется следующим образом:

$$V_{oc} = \alpha \times \Delta T \quad (1)$$

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2)$$

$$\alpha = (\alpha_p - \alpha_n) \quad (3)$$

где V_{oc} - напряжение разомкнутой цепи, α - коэффициент эффекта Зеебека (В/К), где α_p и α_n - коэффициенты Зеебека для ветвей ТЭГ p-типа и n-типа соответственно.

Первый эксперимент. Для получения соответствующего уровня извлекаемой мощности панель ТЭГ имеет 15 линий ТЭГ, соединенных параллельно. В каждой линии расположено по 10 модулей, соединенных последовательно. Таким образом, панель состоит из 150 модулей для того, чтобы увеличить выходное напряжение панели ТЭГ.

Источником тепла является солнечное излучение. Источником низкой температуры является водопроводная вода. Горячая поверхность панели покрыта стеклом толщиной 4 мм. Расстояние между стеклянной крышкой и горячей поверхностью ТЭГ панели составляет 5 см. Стеклянная крышка подвергается воздействию солнечного излучения, увеличивая получаемое тепло на горячей поверхности. Также имеется пластина, изготовленная из алюминия толщиной 16 мм и окрашенная в черный цвет. Эта пластина монтируется непосредственно над ТЭГ панелью для увеличения теплопроводности. На другой стороне ТЭГ панели расположены 30 радиаторов, где через каждый проходит водопроводная вода. Тип используемого радиатора - "Алюминиевый блок водяного охлаждения CLYXGS". Его размер составляет 40 x 160 x 10 мм, а материал - алюминиевый сплав. Вода поступает в каждый радиатор параллельно, чтобы обеспечить равномерное распределение низкой температуры на низкотемпературной стороне ТЭГ панели. С обеих сторон ТЭГ панели расположено 12 датчиков температуры. Для обеспечения наилучшей теплопроводности на каждой стороне ТЭГ панели используется термопаста между горячей стороной и алюминиевой пластиной, а также между холодной

стороной панели и радиатором. Эксперимент был проведен в жаркий около 45°C и солнечный день в июле в Ираке, как показано на Рис.1:

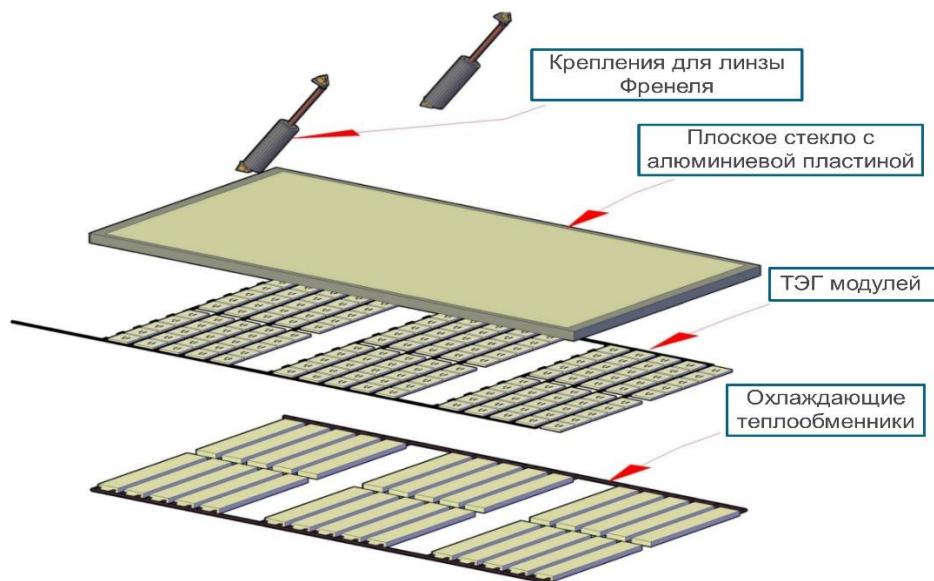


Рис. 1. Схема ТЭГ системы

Первая конструкция (падающее на ТЭГ-панель солнечное излучение через линзу Френеля (L-TEG)). Рис. 2 (а): в эксперименте использована точечная линза Френеля. Панель ТЭГ располагалась под объективом на расстоянии фокуса. Линза Френеля была закреплена металлической оправой. Размеры линзы Френеля составили (1100 × 1100) мм. Для регулировки фокусного расстояния использовался линейный двигатель постоянного тока. Угол наклона регулировался с помощью микроконтроллера Arduino Mega через драйвер.

Вторая конструкция (падающее солнечное излучение на ТЭГ-панель без линзы (NL-TEG)). В этом эксперименте ТЭГ панель подвергалась воздействию прямого солнечного излучения. Вся панель была ориентирована к солнцу в течение дня. Так как Ирак находится в северном полушарии, ТЭГ панель без линзы Френеля должна быть обращена к солнцу в направлении географического юга или к Южному полюсу. Рис. 2 (b):

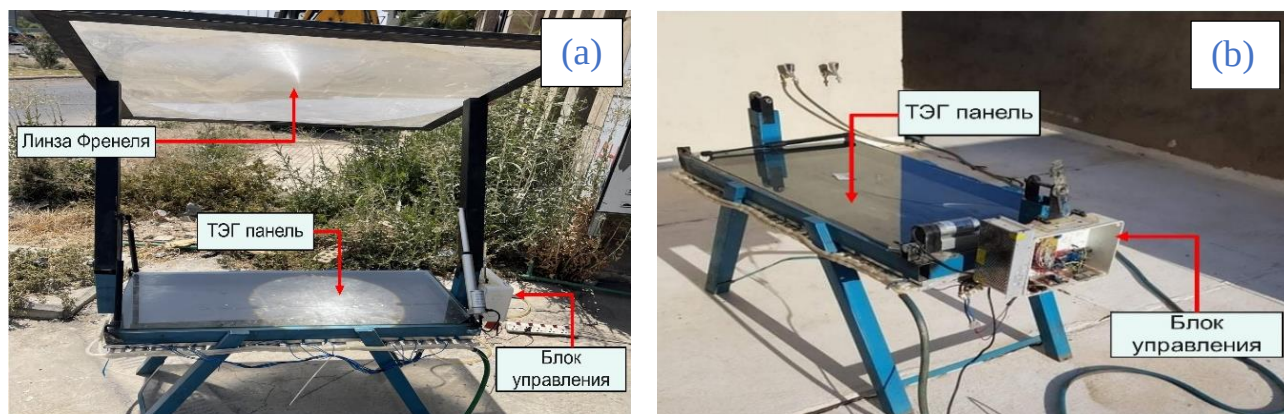


Рис. 2. (а) ТЭГ панель через линзу Френеля(L-TEG), (b) ТЭГ панель без линзы Френеля (NL-TEG)

Как видно из графиков на рис.3, среднее значение ΔT для панели NL-TEG во время экспериментов составило 31,6 °C и 25,8°C для L-TEG. NL-TEG модификации величина разницы температур увеличилась на 5,8 °C. Система без линзы Френеля работала стабильно даже при высоких температурах окружающей среды.

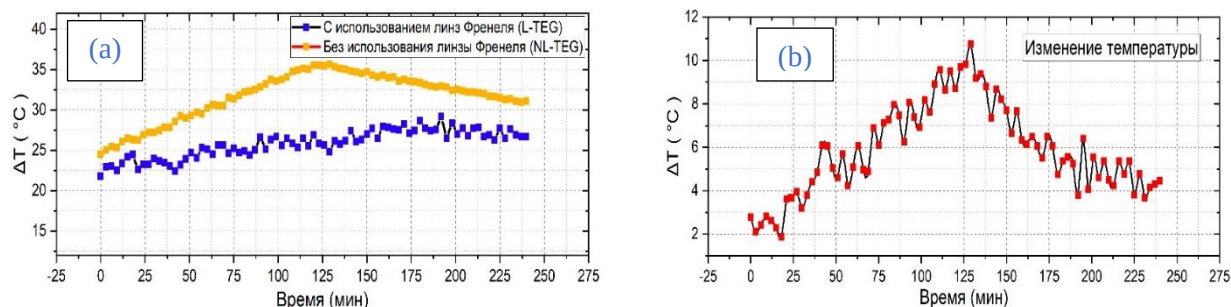


Рис. 3. (a) ΔT для NL-TEG и L-TEG систем, (b) Изменение температуры для NL-TEG и L-TEG систем

NL-TEG панель зафиксировала средний ток 1,68 А, в то время как панель L-TEG зафиксировала 1,36А. Изменение незначительно, так как ток для обеих панелей оставался почти одинаковым до полудня. Когда температура окружающей среды резко повысилась - изменилась температура системы. Среднее напряжение для системы NL-TEG составило 10,33 В, в то время как панель L-TEG - 8,74 В. Следовательно, разница составила 1,59 В, что показало значительное снижение напряжения L-TEG панели. Результаты показаны на рис. 4. Как видно из графиков на рис. 5. Средняя мощность NL-TEG составила 14,37 Вт против 9,26 Вт для панели L-TEG. Таким образом, между панелями была разница в 5,10 Вт. Это означает, что увеличение выходной мощности на 35,52% произошло из-за различного температурного профиля панели NL-TEG. Рассчитанный средний максимальный КПД, реализованный для панелей NL-TEG и L-TEG, составил 1,49% и 1,25% соответственно. Значение КПД ТЭГ модуля увеличилось до 16,09%.

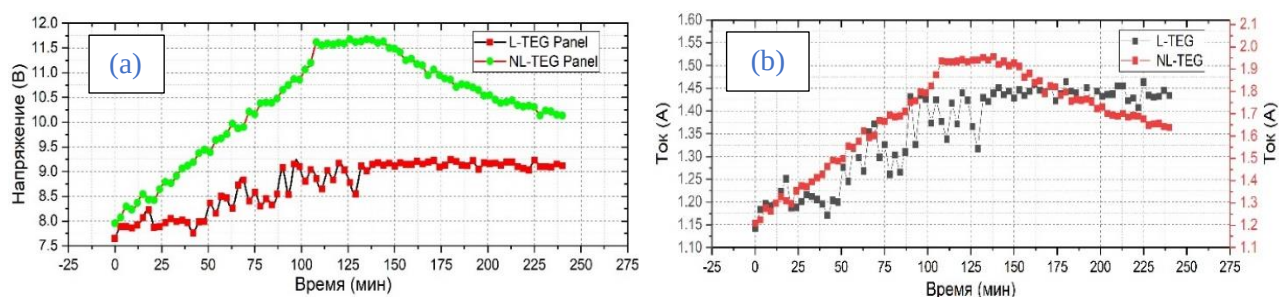


Рис. 4. (a) Напряжение для L-TEG и NL-TEG систем, (b) ток для L-TEG и NL-TEG систем

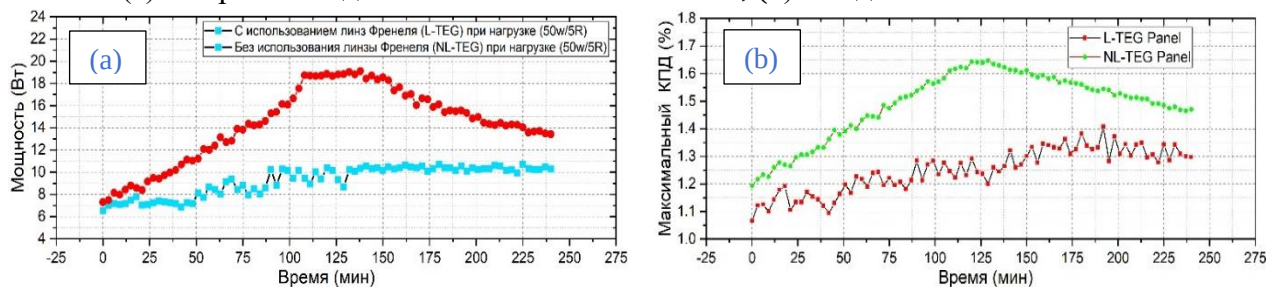


Рис. 5. (a) Мощность для NL-TEG и L-TEG систем при нагрузке 5 Ом/50 Вт, (b) КПД для NL-TEG и L-TEG систем

Во втором эксперименте спроектированы и исследованы две панели ТЭГ с использованием двухходового потока воды для снижения температуры панели. Первая панель состоит из 20 модулей ТЭГ, расположенных в виде массива 2×10 , а вторая состоит из 150 модулей, расположенных в виде массива 15×10 .

Источником тепла для ТЭГ являлась горячая вода, подаваемая от солнечного водонагревателя. Активный охлаждающий эффект достигался за счет водопроводной воды, которая подавалась по трубам с соответствующими сторонами ТЭГ-панели. Для обеспечения равномерного распределения температуры на каждой стороне панели ТЭГ использовалась термопаста.

Кроме того, с обеих сторон ТЭГ панели используются теплоизоляторы для уменьшения потерь тепла из системы. Акриловое стекло покрывало обе стороны панели. На другой стороне ТЭГ использовался алюминиевый блок водяного охлаждения CIYXGS. Вода поступала в каждый теплообменник параллельным потоком, обеспечивая равномерное распределение низкой температуры на холодной стороне панели (Рис. 6).



Рис. 6. Схема система ТЭГ (с использованием двухслойного теплообменника)

Первая конструкция второго эксперимента (2x10 ТЭГ-панель), изображенна на рисунке 7. Последовательные соединения 10 ТЭГ модулей соединены параллельно, образуя две линии ТЭГ модулей.

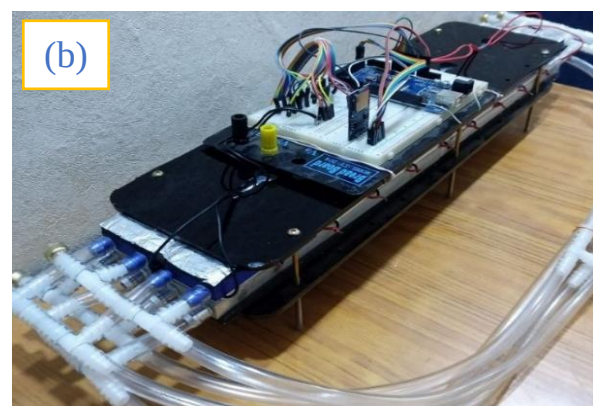


Рис. 7. Экспериментальная реализация разработанной ТЭГ панели: (а) вид сбоку, показывающий различные слои панели, (b) подключение к микроконтроллеру Arduino Mega и измерительным устройствам

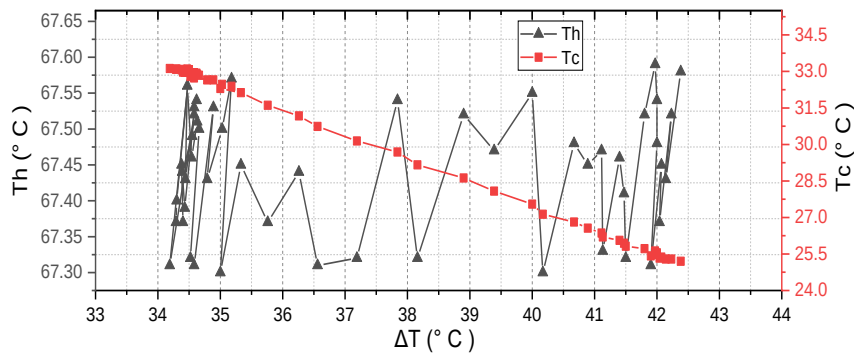


Рис. 8, ΔT , T_h , и T_c для 2 x 10 ТЭГ панели

Температуры горячей (T_h) и холодной сторон (T_c) показаны на рис. 8. Панель зафиксировала среднюю температуру 67,4 °C на горячей стороне (T_h). На холодной стороне (T_c) наблюдалась средняя температура 29,8 °C. Термопары микроконтроллера зафиксировали среднюю разницу температур на поверхности панели 37,5 °C. Эти результаты были получены с использованием термопар, которые находились в непосредственном контакте с поверхностями панелей, обеспечивая более точные результаты.

На рис. 9 представлена зависимость выходной мощности и КПД от ΔT . Среднее значение выходной мощности составило 3,04 Вт. Расчетная средняя эффективность панели- 1,77%. Его максимальный и минимальный КПД составляют 1,99% и 1,6% соответственно, что приемлемо для небольших систем, подобных этой.

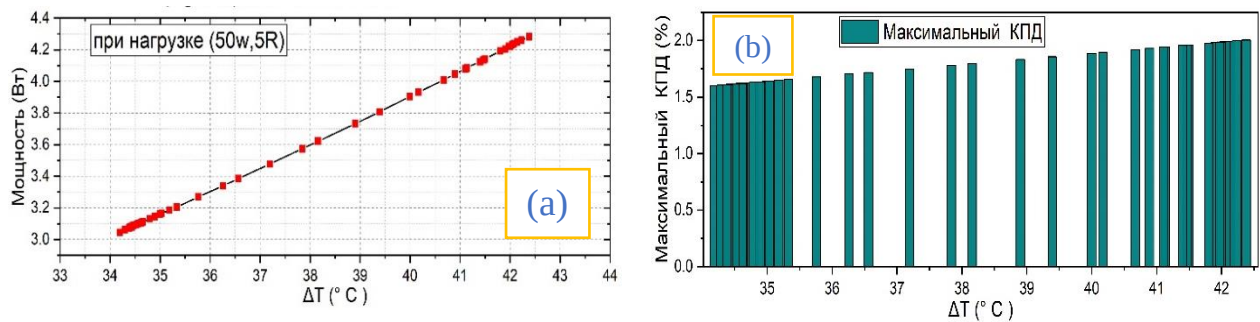


Рис. 9. (a) Мощность нагрузки для 2 x 10 ТЭГ панели от ΔT , (b) КПД для 2 x 10 ТЭГ панели

Вторая конструкция второго эксперимента (15x10 ТЭГ панель) показана на рис. 10. Последовательные соединения 10 модулей ТЭГ соединены параллельно, чтобы получить 15 линий. Целью предлагаемой системы является генерация и увеличение максимальной выходной мощности термоэлектрических модулей.

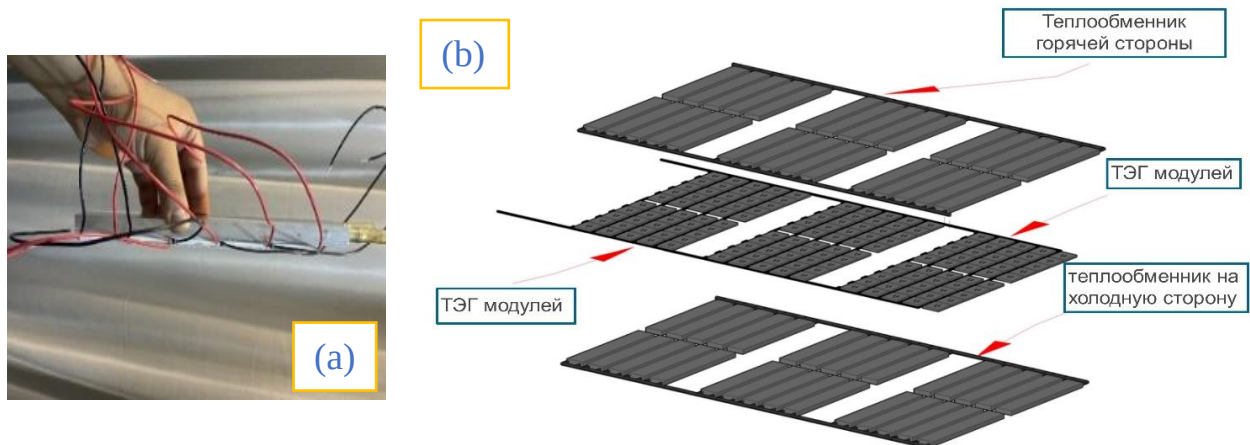


Рис. 10. (a) Одна линия многослойной панели и (b) схема панели размером 15x10 ТЭГ

На рис. 11 показана зависимость разницы температур от температур поверхностей панели. На горячей стороне панели средняя температура составила 67,6 °C, на холодной стороне 29,9 °C. На поверхностях панели зафиксирован перепад температур в 37,6 °C.

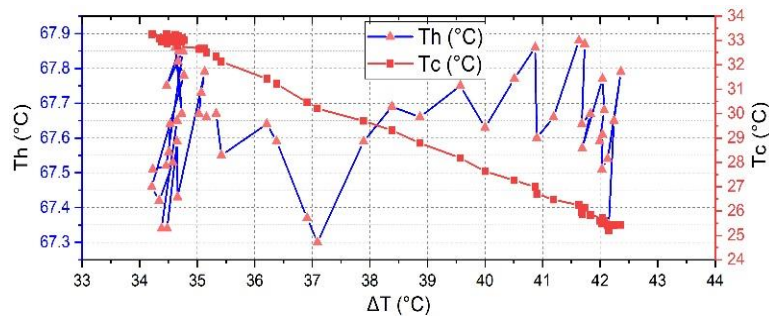


Рис. 11, ΔT , T_h , and T_c для панели размером 15×10 ТЭГ

Рис. 12 показывает выходную среднюю мощность средней 23,92 Вт для панели 15×10 во время экспериментов, где сопротивление используемой нагрузки составляет 5 Ом. На Рис. 13 показано, что средняя максимальная эффективность, достигнутая панелями ТЭГ, составила 1,77%. Самые низкие и самые высокие значения, полученные в ходе экспериментов, составили 1,6 % и 2,1% соответственно.

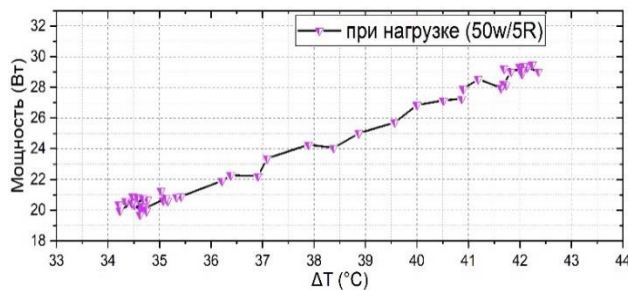


Рис.12. Мощность панели 15x10 ТЭГ при нагрузке 50Вт/5Ом

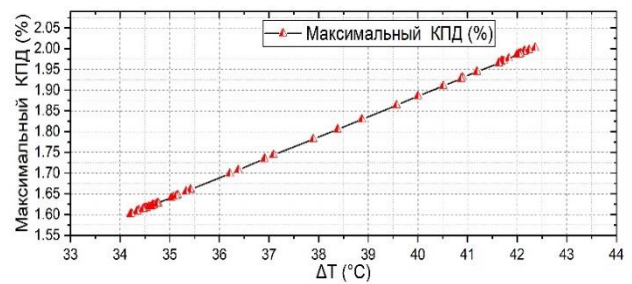


Рис. 13. КПД панели 15x10 ТЭГ при ΔT

На Рис.14 ниже показаны улучшения электрических характеристик трех панели (L-TEG, NL-TEG, и 15×10 ТЭГ) а также наиболее выгодные конструкции работы при одинаковой нагрузке и количестве ТЭГ модулей.

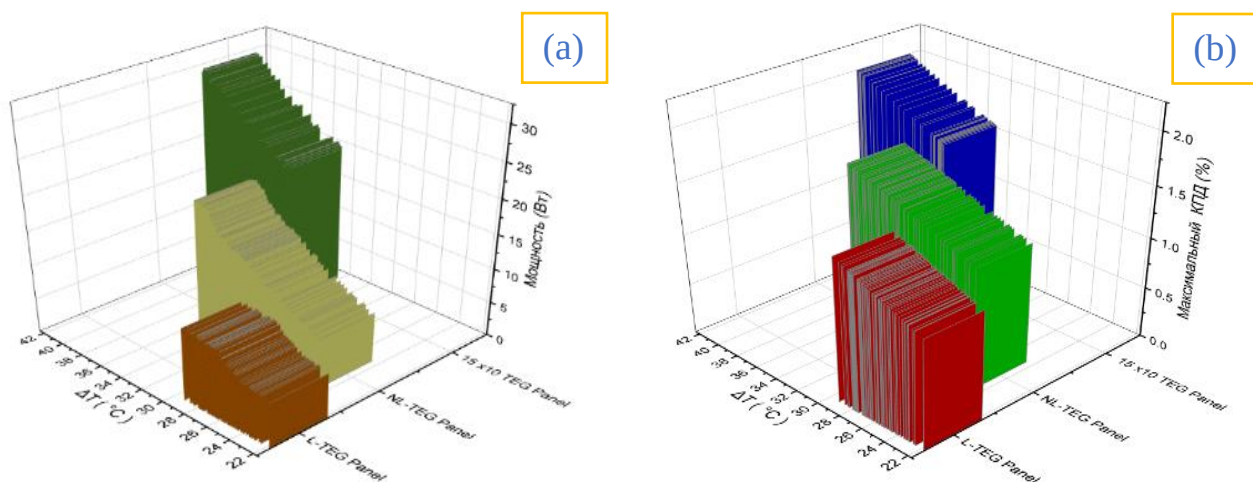


Рис. 14. (a),(b), Выходная мощность и КПД, для трех систем ТЭГ панелей

Третья глава. Для рекуперации тепла и охлаждения фотоэлектрической панели и большего поглощения солнечных лучей была создана экспериментальная гибридная система, состоящая из ФЭП и ТЭГ (HPVTEG) в паре с теплообменниками. Солнечная энергия питает фотоэлектрический элемент, который вырабатывает электричество. Тепло, которое не используется фотоэлементом, попадает на горячую сторону панели, преобразуя его в дополнительную электрическую мощность. Тепло отводится от системы через холодную сторону панели.

Уравнения (4) и (5) показывают общую выходную мощность и эффективность

$$p_{tot} = P_{pv} + P_{teg} \quad (4)$$

$$\eta_{tot} = \frac{P_{tot}}{Q} \quad (5)$$

где Q - энергия солнечного излучения, равная $G \cdot A$, где G , A - интенсивность солнечного излучения и площадь солнечного модуля. Увеличение электрического КПД модуля солнечных элементов в результате интеграции ТЭГ с фотоэлектрической панелью может быть рассчитано следующим образом:

$$Improvement = \frac{\eta_{tot} - \eta_{refrenced PV(Stand-alone)}}{\eta_{refrenced PV(Stand-alone)}} \times 100\%$$

Рис. 15: установка выполнена из двадцати модулей ТЭГ, прикреплённых к листу алюминия, закреплённому к задней стороне фотоэлектрической панели с помощью термопасты. Четыре радиатора прикреплены под каждым 5 модулями, которые закреплены с помощью термопасты для увеличения теплопередачи, соединение фиксируется рамой. Для подключения радиаторов к воде используются водяные кремниевые трубки. Холодная вода в доме не требует насоса для циркуляции и подходящего теплообмена, имеет низкую стоимость и высокую теплоемкость. В ходе эксперимента вода использовалась с постоянным расходом 2,56 л/мин и температурой около 23 °С. Вода циркулирует через теплообменник и снова возвращается в дома. По завершении эксперимента было обнаружено, что средняя температура падает на 16,01 °С. Система HPVTEG имеет большее среднее КПД - 13,86 %, чем автономная фотоэлектрическая система - 11,90 %, что представляет собой разницу в 1,96 % или на 16,4 % выше, чем электрическая эффективность автономной фотоэлектрической системы (Рис. 16 (a), (b)). Кроме того, с использованием гибридной системы HPVTEG было лучше с финансовой точки зрения (LCOE) по сравнению с автономной ФЭП (Рис. 16 (c))

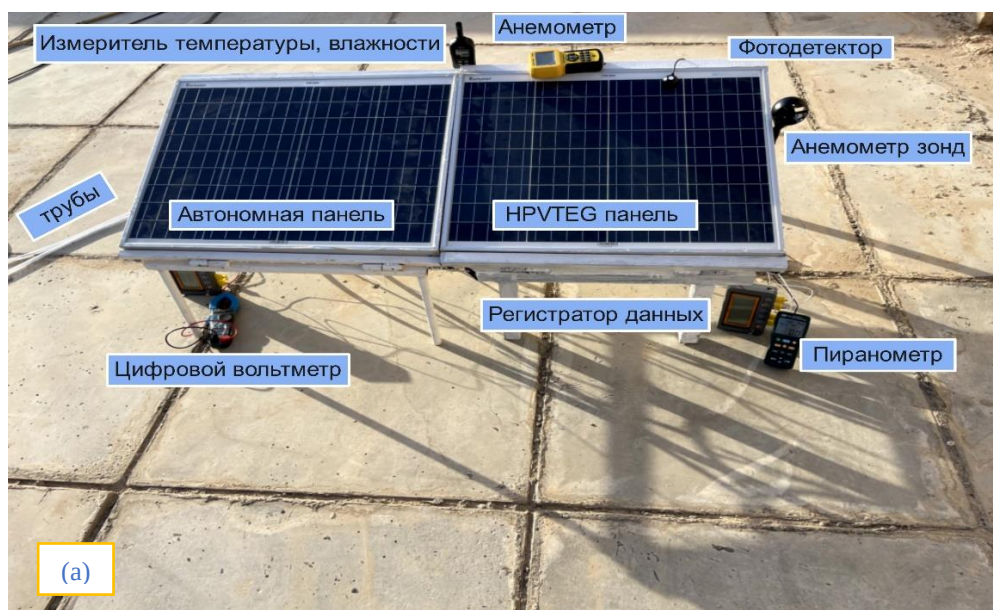


Рис. 15.(a) Вид экспериментальной установки системы HPVTEG

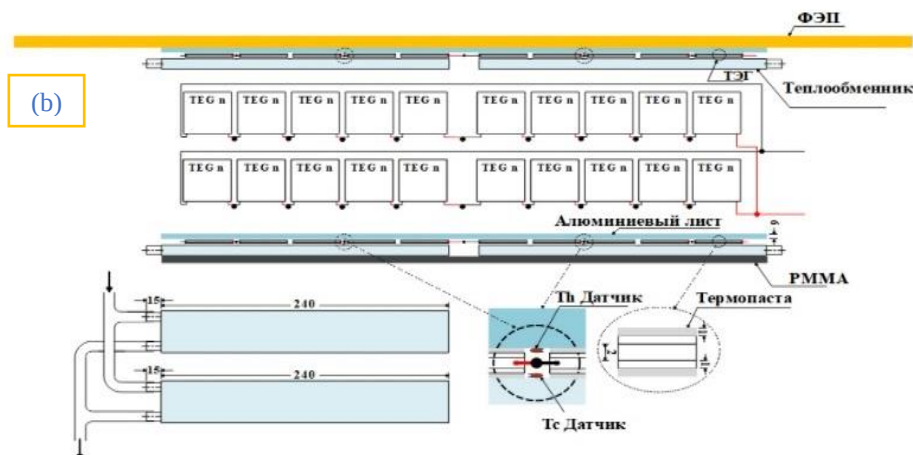


Рис. 15.(б) схема экспериментальной установки

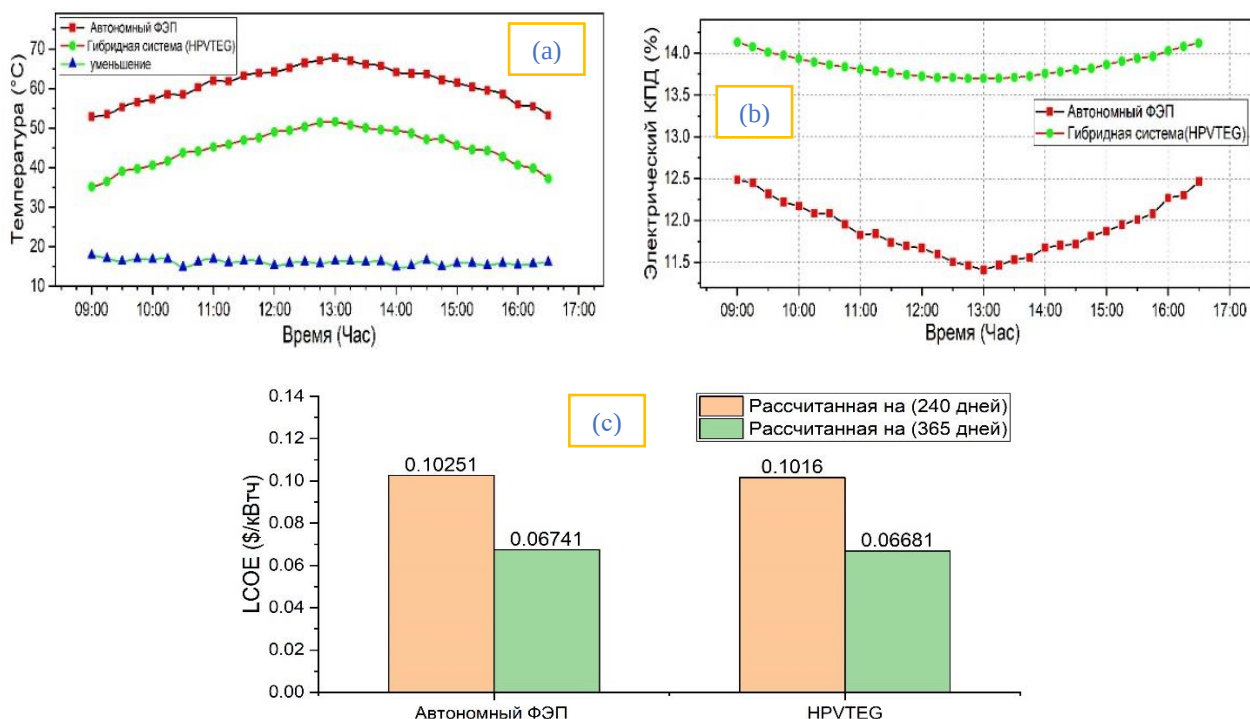


Рис. 16. (а) Температурный график системы HPVTEG и автономной системы ФЭП, (б) электрические КПД системы HPVTEG и автономной системы ФЭП, (с) финансовый LCOE системы (HPVTEG) в сравнении с автономной ФЭП

В четвертой главе изучены параметры и характеристики теплопередачи, а также влияние изменения толщины верхней (горячей) пластины и расхода воды, на извлекаемую мощность и эффективность. Для проверки ранее полученных практических результатов был использован код ANSYS PROGRAM CFD. В этом исследовании для построения модели ТЭГ использовалась программа Workbench ANSYS. Панель состоит из пластины, собирающей солнечное тепло, 5 ТЭГ модулей и теплоотвода из алюминиевого блока с водяным охлаждением (Рис. 17). Верхняя часть устройства представляет собой блок из алюминиевого сплава, типа 6061, с размерами 240 мм x 40 мм x 10 мм (Д, Ш, В), и он действует горячей поверхностью системы. Средняя часть содержит модули ТЭГ, равномерно распределенные с расстоянием между модулями 5 мм. Нижняя часть (теплообменника) представляет собой кубовидный блок из алюминиевого сплава с размерами 240 мм x 40 мм x 10 мм (Д, Ш, В). Он имеет внутренний М-образный канал для подачи воды, чтобы максимально увеличить площадь теплообмена для лучшего эффекта охлаждения.

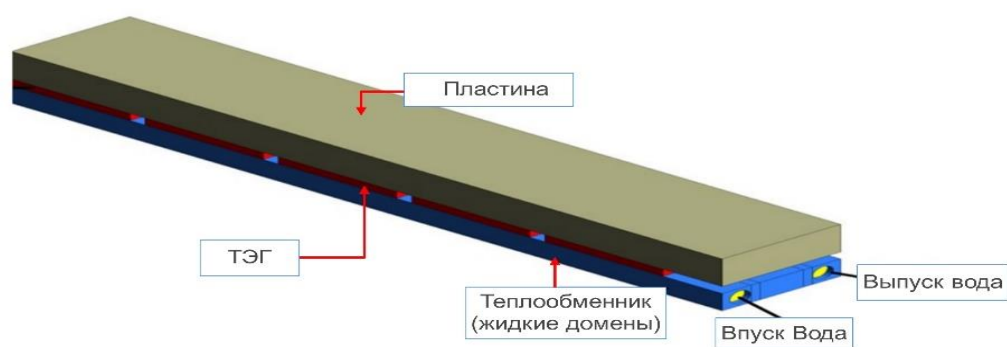


Рис. 17. Вид моделируемой в программе Workbench ANSYS конструкции ТЭГ

В таблице 1 представлено сравнение между экспериментальными и теоретически полученными данными для температуры горячей и холодной поверхностей системы (ТЭГ) и разности температур между двумя поверхностями, полученными в разное время суток.

Таблице 1: Сравнение экспериментальных и теоретических данных по температуре двух поверхностей ТЭГ

Время	Экспериментальные данные			Теоретические данные			Diff. (%)
	T_h (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	T_h (°C)	T_c (°C)	ΔT (°C)	
11:30 a.m.	51	27	24	51	29	22	8.3
12:30 p.m.	62	32	30	62	31	31	3.3
1:30 p.m.	72	37	35	72	35	37	5.7
3:30 p.m.	63	32	31	63	31	32	3.2

Рис. 18 демонстрирует значительное **влияние толщины солнечной пластины** на разницу тепловых потоков между горячей и холодной поверхностями модуля. Большая толщина пластины приводила к более высокому тепловому потоку. Это объясняется повышенной теплоемкостью более толстой солнечной пластины по сравнению с холодной пластиной.

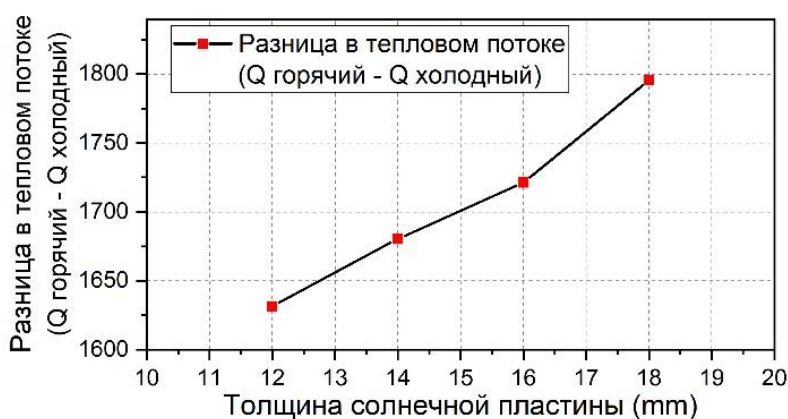


Рис. 18. Соотношение между толщиной солнечной пластины и тепловым потоком между горячей и холодной поверхностями модуля

Влияние скорости потока охлаждающей воды на температуру поверхностей модуля представлено на Рис. 19. Результаты показывают более заметное влияние скорости потока на холодную поверхность, чем на горячую. Соответственно, большие перепады температур были достигнуты при более высоких скоростях потока (Рис. 20)

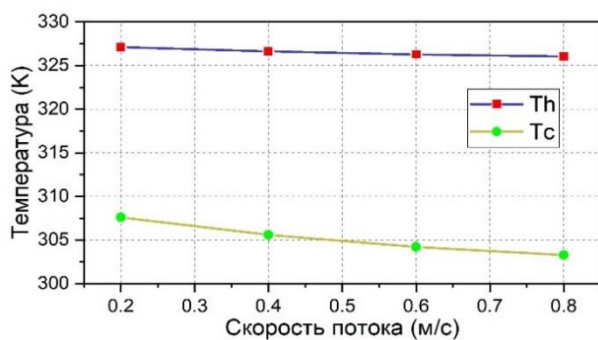


Рис. 19. Соотношение между скоростью потока и температурой горячей и холодной поверхности модуля ТЭГ

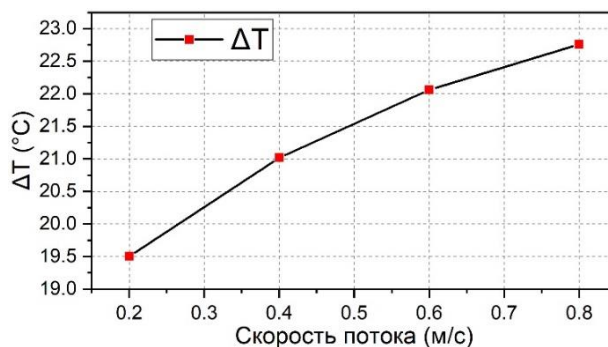


Рис. 20. Влияние скорости потока на разницу температур между горячей и холодной поверхностями модуля ТЭГ

Влияние скорости потока на выходное напряжение и КПД ТЭГ представлено на рисунках 21 и 22 соответственно. Результаты показывают положительное влияние скорости потока на выходное напряжение и КПД.

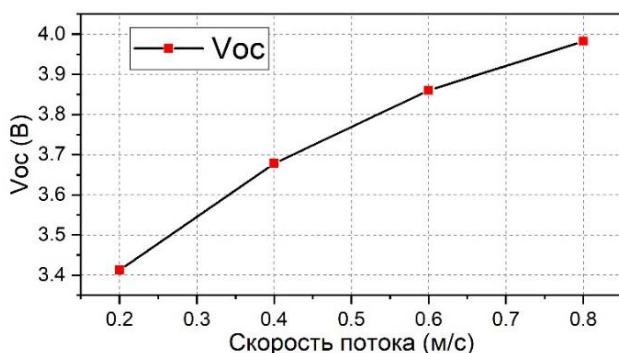


Рис. 21. Соотношение между скоростью потока и выходным напряжением

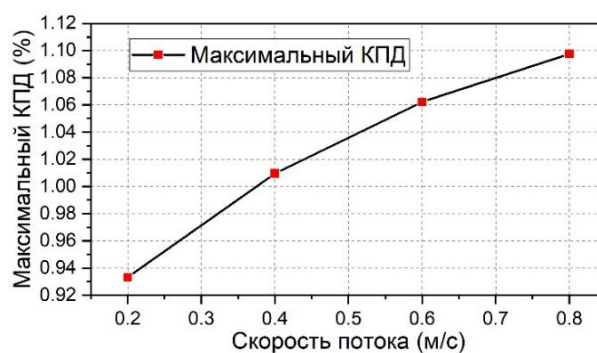


Рис. 22. Соотношение между скоростью потока и КПД ТЭГ

Профиль скоростей холодной воды представлен на рис. 23. Самая высокая скорость потока была на входе. Однако из-за поворотов в канале образовались области высокого давления, что привело к снижению скорости на выходе из канала.

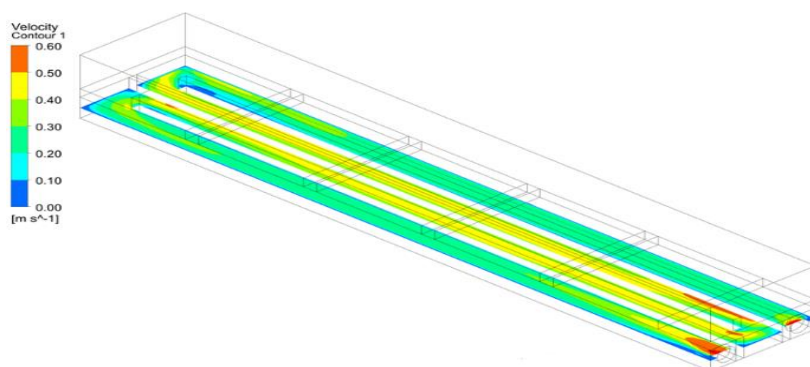


Рис. 23. Профиль скорости потока воды в теплообменнике ТЭГ

В пятой главе были разработаны системы ФЭП и ТЭГ в программе MATLAB SIMULINK для получения максимальной мощности гибридной системы ФЭП-ТЭГ. Для определения лучшего алгоритма был выбран метод отслеживания точки максимальной мощности (MPPT).

ФЭП-ТЭГ система изображена на Рис. 24(а). Тепло, выделяемое от ФЭП, поглощается горячей стороной ТЭГ панели. Эта тепловая энергия будет преобразована в электрическую с помощью ТЭГ.

Гибридная система ФЭП-ТЭГ, изображенная на Рис. 24(б) состоит из ФЭП с характеристиками 30 Вт пиковой мощности и КПД 10.53%, $A = 0.284 \text{ м}^2$, и 32 модулей ТЭГ.

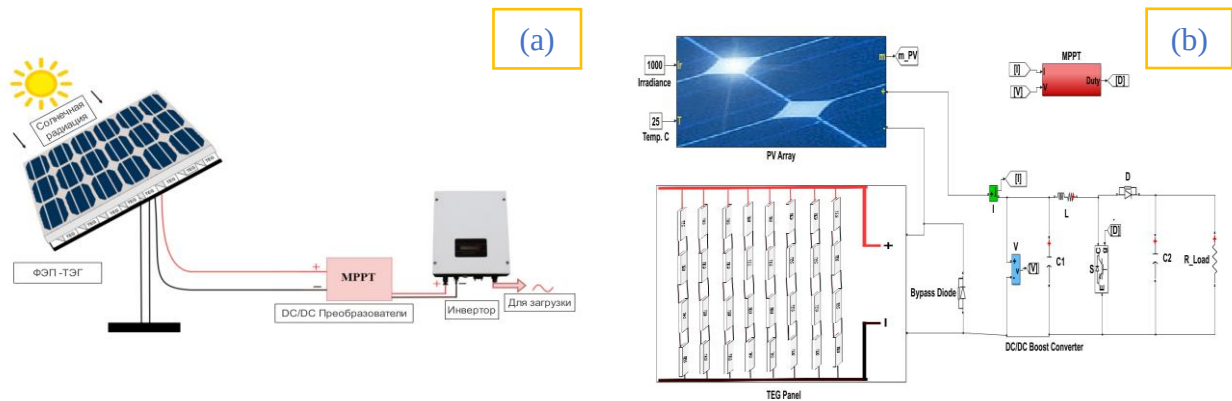


Рис. 24. (а) Предполагаемая гибридная система, (б) Предложенная модель системы ФЭП-ТЭГ в Simulink

Результаты моделирования представлены на Рис. 25. Максимальные мощности ТЭГ и ФЭП составляют 7,2 Вт (при $\Delta T = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$) и 30 Вт соответственно. Таким образом, благодаря гибридной системе ФЭП-ТЭГ общая и максимальная мощности, КПД увеличиваются до 35,5 Вт и 12,44%. Это показывает повышение эффективности ФЭП-ТЭГ на 18,13% по сравнению с автономной фотоэлектрической панелью.

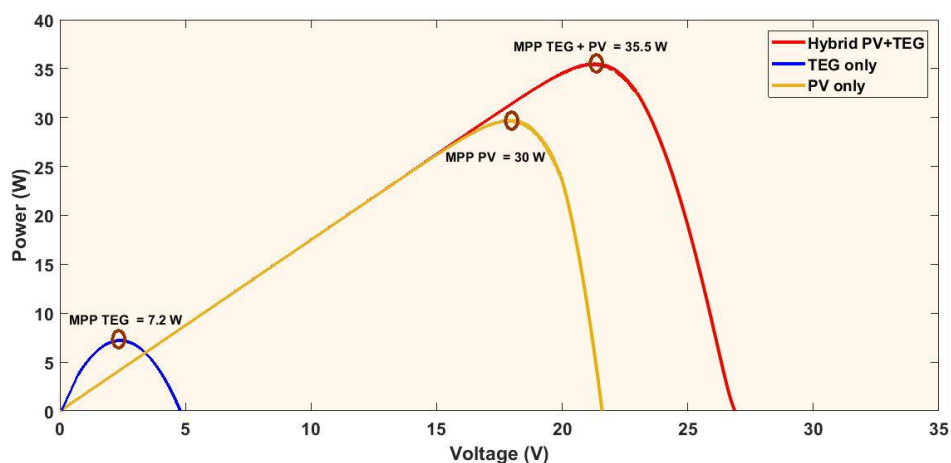


Рис. 25. Кривые P-V для ТЭГ панели, ФЭП панели, гибридной системы ФЭП-ТЭГ

Моделирование выполняется с использованием четырех методов MPPT (алгоритм P & O, алгоритм IC, FLC и IT2FLC). На Рис. 26 показана реакция системы для каждого метода. Самый быстрый отклик системы достигается с помощью метода IT2FLC, затем FLC, алгоритм P&O и, наконец, алгоритм IC. Кроме того, в установившемся состоянии плавный отклик входной мощности (P_i) для всей системы лучше всего подходит для метода IT2FLC, затем алгоритмы FLC, IC и, наконец, алгоритм P & O. Для каждого метода значение нагрузки составляет 30 Ом. На Рис. 27 показаны результаты моделирования выходного напряжения повышающего преобразователя. Наилучшая стабильность выходного напряжения достигается

при использовании метода IT2FLC, затем FLC, IC и, наконец, метод P&O. При идентичной нагрузке выходное напряжение предлагаемой гибридной системы составляет 32 В, что на 9,21% выше, чем в случае автономной фотоэлектрической панели, которая составляет 29,3 В.

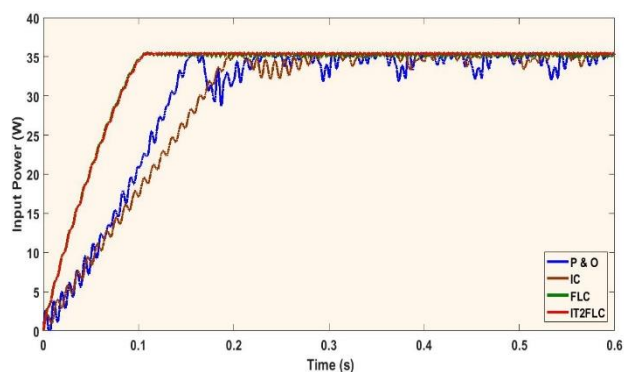


Рис. 26. Входная мощность гибридной системы ФЭП-ТЭГ при различных алгоритмах MPPT

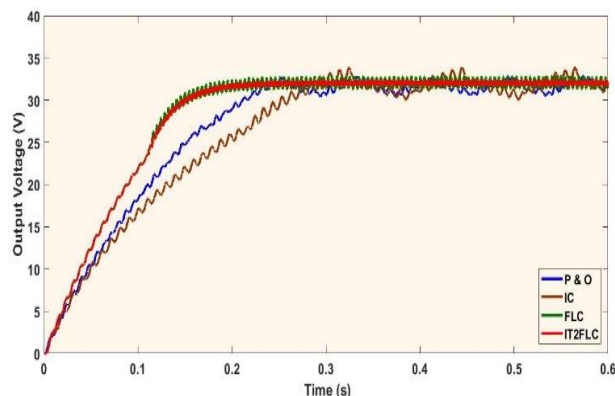


Рис. 27. Выходное напряжение гибридной системы ФЭП-ТЭГ при различных алгоритмах MPPT

В **Заключении** приведены основные результаты работы:

В этом исследовании использовались ТЭГ для выработки электроэнергии на основе солнечной энергии в сочетании с ФЭП в качестве гибридной системы для повышения общей эффективности. Расчеты и демонстрационные тесты показывают, что:

1. В системе L-TEG изменение ΔT неравномерно, поскольку линза Френеля концентрирует солнечное излучение на небольшой площади. Это создает неравномерное распределение температуры на горячей стороне панели. Таким образом, выходная мощность NL-TEG на 35,52% выше, чем у L-TEG.
2. Эффективность системы без использованием линз Френеля (NL-TEG) на 16,09% выше, чем системы с использованием линз Френеля (L-TEG). КПД может быть увеличен за счет более эффективного охлаждения.
3. В панелях (2×10 ТЭГ и 15×10 ТЭГ), используется активный метод охлаждения с использованием двухходового потока воды, что привело к увеличению КПД ТЭГ до 2.1 % и является перспективным ввиду использования просто водопроводной воды и солнечной энергии.
4. Использование ТЭГ с активным охлаждением теплообменника для снижения температуры ФЭП позволила понизить температуру панели на 16 °С, что привело к увеличению КПД ФЭП на 16,4 % и является перспективным ввиду низкой себестоимости системы.
5. Использование гибридной системы HPVTEG (комбинации ТЭГ на задней поверхности ФЭП) было эффективнее с финансовой точки зрения (LCOE) по сравнению с автономной ФЭП, где стоимость кВт*ч составила 0.06681 US \$/kWh, а для автономной ФЭП - 0.06741 US \$/kWh, в расчете на 365 дней производства электроэнергии.
6. Результаты CFD кода демонстрируют, что скорость потока охлаждающей теплообменник воды (М-образный) оказала положительное влияние на разницу температур между поверхностями ТЭГ-модуля, что, привело к увеличению напряжения и КПД на 0.4 - 0.6 %
7. Увеличение толщины пластина на величину более 12 мм привело к более высокому тепловому потоку между горячей и холодной сторонами ТЭГ.

8. В результате применения алгоритма MPPT в программе MATLAB SIMULINK для гибридной системы ФЭП-ТЭГ были зарегистрированы: мощность 35,5 Вт и КПД 12.44%. Таким образом, КПД системы ФЭП-ТЭГ увеличилось на 18.13% в сравнении с автономной системой ФЭП.

Рекомендации по использованию материалов научного исследования:

Для сокращения разрыва между спросом и предложением на энергию в Ираке и увеличения использования возобновляемых источников энергии более существующего (2%) уровня, рекомендуется следующее:

1- Получение электроэнергии от гибридной системы ФЭП-ТЭГ. Предложенные конструкции подходят для климатических условий Ирака и стран с жарким климатом. Материалы исследований дают возможность инвесторам и правительству оценить потенциальные возможности развития различных секторов возобновляемой энергетики Ирака.

2- Создание благоприятной инвестиционной среды для содействия переходу частного сектора к производству и использованию возобновляемых источников энергии. Также возможно предусмотреть различные инвестиционные стимулы, конкурентоспособные льготные тарифы и налоговые льготы при покупке оборудования для использования возобновляемых источников энергии.

3- В условиях действующей фотоэлектрической электростанции в Республике Ирак необходимо провести исследование, которое может быть использовано для снижения стоимости электричества и увеличения выработки электроэнергии на 8-10 МВт, а также для снижения затрат на производство электроэнергии, выбросов углекислого газа, сокращения использования ископаемого топлива.

4- Возможность использования материалов исследования для освещения улиц, дорог и мостов, где подключение к электросетям невозможно. Управление дорог и мостов провинции Дияла в Ираке разрешило применение материалов исследования на практике в соответствии с законом о возобновляемых источниках энергии (Закон об электричестве № 53 от 2017 года), принятым Министерством энергетики Ирака. Закон нацелен на активное использование возобновляемых источников энергии, защиту окружающей среды и смягчение последствий изменения климата.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ:

1. **Qasim M.A.**, The Experimental Investigation of a New Panel Design for Thermoelectric Power Generation to Maximize Output Power Using Solar Radiation / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein // *Energies*. 2022. Vol. 15. No. 9. P. 3124. 1 п.л. / 0.6 п.л. (**Scopus, WoS**)
2. **Qasim M.A.**, Seebeck Generators and Their Performance in Generating Electricity / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin, A.K. Hassan // *Journal of Operation and Automation in Power Engineering*. 2022. Vol. 10. No. 3. P. 200-205. 0.4 п.л. / 0.24 п.л. (**Scopus**)
3. **Qasim M.A.**, Design and Implementation of a Thermoelectric Power Generation Panel Utilizing Waste Heat Based on Solar Energy / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin, S. Praveenkumar, D. Yang, A.H. Mola, S.E. Shcheklein // *International journal of renewable energy research*. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 1234-1241. 0.53 п.л. / 0.32 п.л. (**Scopus**)
4. **Qasim M.A.**, Experimental and Implementation of a 15×10 TEG Array of a Thermoelectric Power Generation System Using Two-Pass Flow of a Tap Water Pipeline Based on Renewable Energy / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein // *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12. No. 15. P. 7948. 0.93 п.л. / 0.65 п.л. (**Scopus, WoS**)

5. **Qasim M.A.**, Development of a Computational Fluid Dynamics (CFD) Numerical Approach of Thermoelectric Module for Power Generation / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein // Crystals. 2022. Vol. 12. No. 6. P. 828. 0,93 п.л. / 0,65 п.л. (**Scopus, WoS**)
6. **Qasim M.A.**, Conversion of Heat Generated During Normal PV Panel Operation into Useful Energy via a Hybrid PV-TEG Connection / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein, S.A. Salih, B. A. Aljashaami, A. A. Sammour // International journal of renewable energy research. 2022. Vol. 12. No. 4. P. 1779-1786. 0,53 п.л. / 0,32 п.л. (**Scopus**)
7. **Qasim M.A.**, MPPT for hybrid wind, solar and thermoelectric power generation systems for off-grid applications / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin, N.T. Alwan, S. Praveenkumar // Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2022. Vol. 22. No 2. P. 56-68. 0,87 п.л. / 0,48 п.л.
8. **Qasim M.A.**, Design and simulation of a solar-wind stand-alone system with a seven-level inverter / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein, I. Hossain, Y. Du. Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering. 2022. Vol. 22. No. 3. P. 5-17. 0,87 п.л. / 0,52 п.л.
9. **Qasim M.A.**, A Numerical Analysis of Fluid Flow and Torque for Hydropower Pelton Turbine Performance Using Computational Fluid Dynamics / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein, A.O. Hanfesh, T.Z. Farge, F.A. Essa. // Inventions. 2022. Vol. 7. No. 1. p. 22. 0,87 п.л. / 0,52 п.л. (**Scopus, WoS**)
10. Du Y., Effect of blade width on ultra-low specific speed axial turbines / Y. Du, **M.A. Qasim**, Y. Li, V.I. Velkin, D. Chen // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2022. Vol. 44. No. 3. P. 6063-6077. 1,07 п.л. / 0,48 п.л. (**Scopus, WoS**)
11. Mohammed M.F., Single Phase T-Type Multilevel Inverters for Renewable Energy Systems, Topology, Modulation, and Control Techniques: A Review / M.F. Mohammed, **M.A. Qasim** // Energies. 2022. Vol. 15. No. 22. P. 8720. 1,6 п.л. / 1,28 п.л. (**Scopus, WoS**)
12. Praveenkumar S., Experimental assessment of thermoelectric cooling on the efficiency of PV module / S. Praveenkumar, E.B. Agyekum, **M.A. Qasim**, N.T. Alwan, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein // International journal of renewable energy research. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 1670-1681. 0,8 п.л. / 0,32 п.л. (**Scopus**)
13. Abbas F.A., An efficient energy-management strategy for a DC microgrid powered by a photovoltaic/fuel cell/battery/supercapacitor / F.A. Abbas., A.A. Obed, **M.A. Qasim**, S.J. Yaqoob., and S. Ferahtia. // Clean Energy. 2022. Vol. 6. No. 6. P. 827-839. 0,87 п.л. / 0,35 п.л. (**Scopus**)
14. Waleed I.B., Speed Control of a Multi-Motor System Based on Fuzzy Neural Model Reference Method / I.B. Waleed, A.L. Saleh, K. A. Mohamad, S.J. Yaqoob, **M.A. Qasim**, N.T. Alwan, A. Nayyar, J.F. Al-Amri, M. Abouhawwash // Actuators. 2022. Vol. 11. No. 5. P. 123. 1,07 п.л. / 0,43 п.л. (**Scopus, WoS**)
15. Grace A.A., Perspectives on the Barriers to Nuclear Power Generation in the Philippines: Prospects for Directions in Energy Research in the Global South / A.A. Grace, S.P. Kumar, E.G. Andal, **M.A. Qasim**, V.I. Velkin // Inventions. 2022. Vol. 7. No. 3. P. 53. 1,07 п.л. / 0,43 п.л. (**Scopus, WoS**)
16. **Qasim M.A.**, PWM effect on MPPT for hybrid PV solar and wind turbine generating systems at various loading conditions / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2021. Vol. 9. No 2. P. 581-592. 0,80 п.л. / 0,64 п.л. (**Scopus**)
17. **Qasim M.A.**, A New Maximum Power Point Tracking Technique for Thermoelectric Generator Modules / **M.A. Qasim**, N.T. Alwan, S. Praveenkumar, V.I. Velkin, E.B. Agyekum // Inventions. 2021. Vol. 6. No. 4. P. 88. 0,73 п.л. / 0,44 п.л. (**Scopus, WoS**)
18. **Qasim M.A.**, Maximum Power Point Tracking Techniques for Micro-Grid Hybrid Wind and Solar Energy Systems - a Review / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin // International Journal on Energy Conversion (IRECON). 2020. Vol. 8. No. 6. P. 223-234. 0,80 п.л. / 0,64 п.л. (**Scopus**)

19. **Qasim M.A.**, Experimental investigation of power generation in a microgrid hybrid network / **M.A. Qasim**, V.I. Velkin // Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing. 2020. Vol. 1706. No. 1. P. 012065. 0,47 п.л. / 0,37 п.л. (**Scopus**)

ПУБЛИКАЦИИ В ДРУГИХ НАУЧНЫХ ИЗДАНИЯХ:

20. Mohammed M.F., Stand-alone transformer-less multilevel inverter fed by solar energy for irrigation purposes / M.F. Mohammed, **M.A. Qasim**, V.I. Velkin // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 2. No. 5. P. 51. 0,53 п.л. / 0,32 п.л.
21. **Qasim M.A.**, Experimental Study of Thermoelectric Generator to Enhancement Performance Using Waste Heat and Heat Exchangers / **M.A. Qasim**, B. Lyubomudrov, A.A. Sammour, Y. Du, X. Chen, V.I. Velkin // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика», Уральский энергетический институт. 2022. С. 484-491. 0,8 п.л. / 0,32 п.л.
22. **Qasim M.A.**, Study of an autonomous wind-solar power generation system using a seven-level inverter / **M.A. Qasim**, I. Hossain, S.A. Salih, A.H. Mola, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика», Уральский энергетический институт. 2022. С. 444-451. 0,8 п.л. / 0,32 п.л.
23. **Qasim M.A.**, Methods for producing electricity by using TEGs from free energy sources / **M.A. Qasim**, Y. Du, X. Chen, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика», Уральский энергетический институт. 2022. С. 452-459. 0,8 п.л. / 0,32 п.л.
24. Du Y., Icing of wind turbine blade / Y. Du, X. Chen, **M.A. Qasim**, A.A. Sammour, V.I. Velkin // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика», Уральский энергетический институт. 2022. С. 560-567. 0,25 п.л. / 0,15 п.л.
25. Chen X., Solar-hydro Hybrid Renewable Energy Systems: Feasibility Analysis / X. Chen, Y. Du, **M.A. Qasim**, A.A. Sammour, V.I. Velkin // Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. Атомная энергетика», Уральский энергетический институт. 2022. С. 552-559. 0,25 п.л. / 0,15 п.л.