

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



**На правах рукописи**

**Сипана Правинкумар**

**Разработка и экспериментальное исследование способов повышения  
эффективности фотоэлектрических электростанций, работающих в  
условиях высоких температур окружающей среды  
(на примере Республики Индия)**

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:** **Кирпичникова Ирина Михайловна**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», г. Челябинск, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения»;

**Тягунов Михаил Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии»;

**Самойленко Владислав Олегович**, кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, доцент кафедры «Автоматизированные электрические системы»

Защита состоится «30» марта 2023 г. в 14:30 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?id=12&rid=4412>

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » февраля 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность работы.**

Развитие возобновляемой энергетики в мире приняло устойчивый характер и имеет в развитых и развивающихся странах 10-20 % ежегодной выработки электроэнергии за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Географическое расположение Индии – приэкваториальные территории, позволяет эффективно использовать наиболее доступный в этом регионе возобновляемый источник – солнечную энергию. Однако, помимо неоспоримых достоинств, у солнечной фотоэлектрической технологии имеется один существенный недостаток: при температуре выше 25°C повышение окружающей среды на 1°C, КПД ФЭП падает на 0,5%. Так, при нагреве поверхности ФЭП до 70°C эффективность выработки снижается на 20-25%.

Настоящая работа направлена на разработку и экспериментальное исследование способов повышения эффективности фотоэлектрических и термодинамических солнечных электростанций, работающих в условиях высоких температур окружающей среды.

Индия занимает третье место в мире по установленной мощности всех генерирующих станций (450 ГВт). Страна является седьмой по величине территории и самой густонаселенной в мире, опередив по населению в 2022 году Китай.

По выработке энергии за счет ВИЭ Индия является третьей страной (около 38%).

Индия в области выработки энергии за счет солнца имеет пока значительное отставание от развитых стран, находящихся в более северных широтах (США и Китай). Правительство Индии в 2003 г. приняло Закон об электроэнергии, который определяет, что к 2070 году использование ВИЭ в Индии должно составить около 100%. Поэтому увеличение доли выработки за счет солнечной энергии представляет научный интерес, а задача разработки способов поддержания и снижения температуры ФЭП является актуальной.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиями по использованию ВИЭ для энергоснабжения и разработкой электростанций на основе солнечной энергии занимались известные российские ученые: Алексеев В.А., Алексеенко С.В., Алферов Ж.И., Амерханов Р.А., Безруких П.П., Бутузов В.А., Елистратов В.В., Кирпичникова И.М., Стребков Д.С., Харченко В.В., Шерьязов С.К., Щеклеин С.Е. и многие другие. Из зарубежных ученых это Аойф Фоули (Королевский университет Белфаста, Великобритания), Сотерис А. Калогирю (Кипрский технологический университет, Кипр), Тара Чандра Кандпал (India Institute of Technology, Дели, Индия), Ранга Питчумани (Политехнический институт Вирджинии и Государственный университет, США), Хенрик Лунд (Ольборгский университет, Дания) и Христос Н. Маркидес (Имперский колледж, Лондон). Однако, никем из учёных не рассматривались вопросы влияния муссонов Индии на степень инсоляции.

**Цель работы:** Разработка и экспериментальное исследование способов повышения эффективности фотоэлектрических электростанций работающих в условиях высоких температур окружающей среды (на примере Республики Индия)

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

1. Исследование инсоляции солнечной энергии в Республике Индия с учетом влияния муссонов в летний период.
2. Расчет эффективности солнечных станций с использованием механизма слежения за солнцем для Южных штатов Индии и технико-экономический анализ этих систем на основе применения прикладной программы System Advisor Model (SAM), Национальной лаборатории ВИЭ, США.
3. Разработка и экспериментальный анализ активных и пассивных способов снижения температуры солнечных фотоэлектрических модулей для повышения их КПД ФЭП в странах с жарким климатом, в т.ч. в южных территориях России.

**Объект исследования** – солнечная энергетика Республики Индии.

**Предмет исследования** – способы повышения эффективности ФЭП на территориях с жарким климатом.

**Научная новизна диссертационного исследования:**

1. Результаты расчет прихода солнечной энергии для территории Республики Индия с учетом влияния муссонов.
2. Разработаны конструкции пяти экспериментальных стендов для исследований повышения эффективности ФЭП с разными (активные и пассивные) способами охлаждения.
3. Результаты экспериментального исследования повышения производительности ФЭП с применением тепловой трубы для охлаждения конструкции, позволившее повысить КПД ФЭП на 3%.
4. Способ термоэлектрического охлаждения ФЭП с использованием термоэлектродгенератора (ТЭГ), что позволило повысить КПД ФЭП на 5%.
5. Экспериментальное исследование активного способа повышения производительности ФЭП с применением теплообменного змеевика, наночастиц из порошка  $Al_2O_3$  и ТЭГ-охлаждения, что позволило повысить КПД ФЭП на 8,5 %.
6. Пассивное охлаждение ФЭП с использованием ребер из алюминия, что позволило повысить КПД на 4%.
7. Пассивное охлаждение ФЭП, использующего алюминиевые отражатели и парафиновый воск, позволившие повысить КПД ФЭП на 14%.

**Теоретическая и практическая значимость исследования** заключается в использовании результатов научных исследований в Республике Индия и странах с жарким климатом с целью повышения эффективности выработки энергии на солнечных станциях.

**Методология и методы исследования** базируются на использовании теории солнечной энергетике, законов возобновляемых источников энергии, практических экспериментальных исследованиях с применением фотоэлектрических преобразователей, а также использовании прикладных программ System Advisor Model (SAM) и Quantum Geographic Information System (QGIS).

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты расчета потенциала солнечной в Республике Индия с учетом влияния муссонов.
2. Расчетные результаты использования механизма слежения за солнцем для Южных региональных штатов Индии и технико-экономический анализ этих систем на основе прикладных программ System Advisor Model (SAM), Национальной лаборатории ВИЭ, США.
3. Результаты разработок и экспериментальный анализ различных активных и пассивных способов снижения температуры солнечных фотоэлектрических модулей и повышения КПД ФЭП для стран с жарким климатом.

**Обоснованность и достоверность результатов исследования, выводов и рекомендаций**, содержащихся в работе, подтверждаются следующим:

- полученные в работе научные результаты базируются на классических положениях теории возобновляемых источников энергии;
- удовлетворительным соответствием результатов, экспериментальных данных расчетов, полученных в ходе исследований на натуральных образцах в дни пика солнечной интенсивности на Урале с известными ранее экспериментальными и теоретическими данными других исследователей;

- хорошим согласованием с теорией и законами в области термодинамики, гидродинамики, солнечной энергии и других ВИЭ, выполненными с использованием прикладных программ для расчета ВИЭ, такими как PVsyst, System Advisor Model (SAM), Quantum Geographic Information System (QGIS), HOMER, RETScreen, а также полученными результатами других авторов и ученых

**Личный вклад.** Автор лично:

1. Предложил наиболее эффективные зоны размещения солнечных станций с учетом периода муссонов в Республике Индия.
2. Разработал и смонтировал 5 экспериментальных стендов, провел серию исследований по повышению эффективности ФЭП с применением различных активных и пассивных способов воздействия.
3. Теоретически и экспериментально обосновал эффективность разработанных активных и пассивных способов повышения КПД ФЭП в условиях высоких температур окружающей среды
4. Выполнил обработку и анализ полученных данных, обобщение и опубликование результатов исследований и рекомендации по применению ФЭП в условиях повышенных температур экваториальных стран.

**Апробация работы.** Результаты исследований были представлены на научных конференциях: Международная конференция «Энергетика, экология, климат 2020, 6 июля — 16 июля 2020 (WCAEE-ICEEC-2020, Москва);

XVII Международная конференция «Возобновляемая и малая энергетика - 2020. Энергоэффективность. Системы автономного энергоснабжения стационарных и мобильных потребителей (НИУ Московский энергетический институт (МЭИ), г. Москва, Россия, 23–24 апреля 2020 г);

Международная конференция по последним тенденциям в области энергетики и инженерии (ICRTESE 2021) в Институте нефтяных технологий Раджива Ганди, Джайс, г. Амети;

Международная конференция по материалам для Новые технологии-2021 (ICMET-21), Lovely Professional University, Пхагвара, г. Пенджаб, Индия, 18–19 февраля 2022 г;

Международная конференция по умным и интеллектуальным системам – ICSIS 2023, Amrita Vishwa Vidyapeetham, г. Ченнаи, Индия, 16–18 марта 2022 г;

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.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 23 научные статьи, в том числе 22 статьи – в рецензируемых научных изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, из них 20 статей – в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и Web of Science.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение, список литературы из 218 наименований и приложения. Всего в диссертации 175 страниц, 97 рисунков и 41 таблица.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

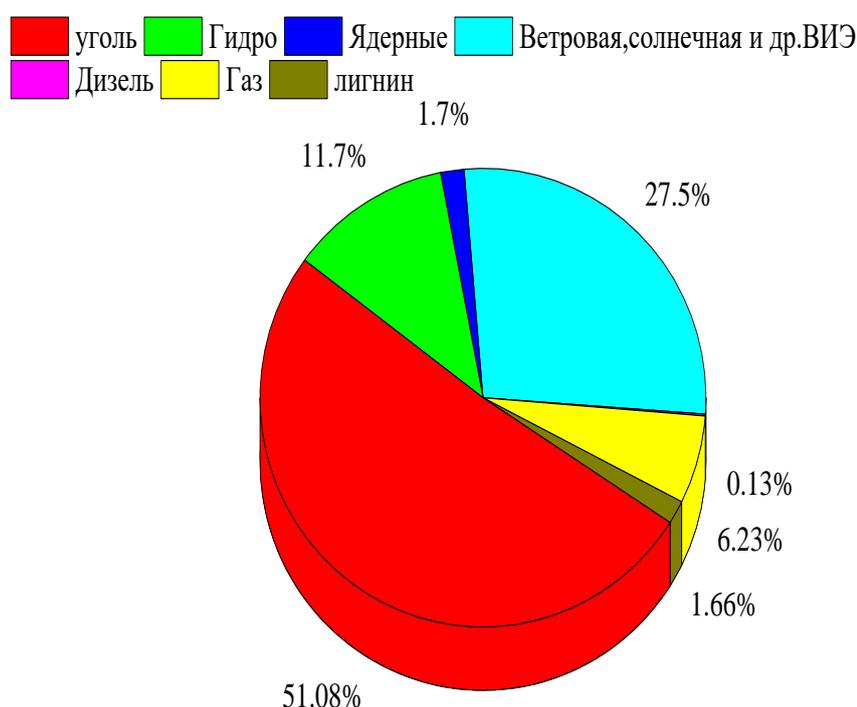
В разделе «Введение» представлена актуальность темы диссертации и цель диссертационного исследования.

**В первой главе** освещаются существующие в настоящее время источники энергии в Индии и доля (по установленной мощности) каждого вида электростанций

Показатели выработки энергии в Индии от разных источников энергии и сравнение их с другими странами представлены в **таблице 1** и на **рисунке 1**.

**Таблица 1-**Показатели выработки энергии в Индии и других странах

Показатель	Характеристика			
	Индия	Китай	США	Россия
Население, (млн.чел)	1417	1402.1	329,5	144,1
Валовый доход на душу населения	\$6390	\$17200	66060	\$10 161
Инсоляция (кВтч/м <sup>2</sup> /день)	5	5	4,12	2,32
Выработка эл. энергии за год (млрд кВт*ч)	1386	7600	4116	1031
Доля Выработки от ядерной энергии (%%)	3,3	4.7	8,43	19,5
Выработка энергии на ветроустановках (ГВтч)	40,06	328,97	132,73	1, 401
Выработка энергии от гидростанций, (ГВтч)	51,56	390,92	101,893	52,56
Выработки энергии от солнечных э/станций (ГВтч)	49,68	306,97	95,20	1,24



**Рисунок 1-** Доля различных источников энергии в выработке электроэнергии в Республике Индия

Население Индии распределено по территории страны довольно неравномерно. Самая большая концентрация жителей характерна для г.Дели (имеет статус национальной территории) — 12617 чел/км<sup>2</sup>, штата Бихар — 1325 чел/км<sup>2</sup>, а наиболее низкая в г.Ладакхе (национальная территория, частично оспариваемая другими странами) — 4,9 чел/км<sup>2</sup>. Численность населения Индии в 2022 году составила 1,437 млрд чел., что делает нашу страну первой по данному показателю, опережая Китай (1,412 млрд чел.). Крупнейшим штатом Индии по численности населения является Уттар-Прадеш (237,9 млн чел.), т. е. один индийский штат в 1,6 раз крупнее по количеству жителей, чем вся Россия. При этом он занимает площадь равную всего 240,9 тыс. км<sup>2</sup>.

Основным законодательством, регулирующим развитие электроэнергетики в Индии, является закон об электроэнергетике 2003 г. В Законе описываются источники энергии, доступные в стране и возобновляемые источники энергии (солнечная, ветровая, волновая и

биоэнергия на основе биомасс). Правительство Индии планирует существенно сократить выбросы парниковых газов к 2070 году. В связи с этим является актуальным повышение КПД существующих СЭС и проектирование новых с учетом данного проведенного исследования.

В первой главе представлены задачи исследования.

**Во второй главе рассмотрены методы исследований и расчет погрешностей измерений.** Основным методом исследований, который представлен в главах 4 и 5, – метод натурального эксперимента. В ходе экспериментов исследовались эффекты при различных активных и пассивных способах снижения температуры панелей фотоэлектрических преобразователей (таблице 2)

**Таблица 2-Устройства для снижения температуры панелей ФЭП**

№	Устройство для охлаждения ФЭП	Потребитель энергии
1	Теплорадиаторы с водой	Насос для подачи воды
2	алюминиевая пластина и термоэлектрический генератор	ТЭГ
3	ТЭГ/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> наножидкость/ U-образная медная трубка	Насос для подачи воды
4	алюминиевые ребра	Отсутствует
5	Отражатели и парафин+ порошок ZnO	Отсутствует

В главе 3 применен метод расчетно-теоретического исследования. Анализ погрешностей помогает оценить ошибки, которые могут быть связаны с экспериментальным процессом. Точность различных инструментов, используемых для записи различных значений, представлена ниже. Процентная неопределенность может быть оценена с помощью следующих соотношений. В ходе экспериментального исследования были установлены различные датчики для регистрации необходимых данных. Однако приборы, используемые в экспериментальных исследованиях, имеют ряд неточностей из-за различных факторов. Учитывалась точность и погрешность всех приборов, поставляемых компаниями-производителями. Датчики термопар, термометров, регистраторы 2K-Digital, токоизмерительные клещи, солнечные пиранометры и цифровые анемометры использовались для записи экспериментальных данных каждые 30 минут. Они были поставлены российской компанией Rusgeoscom Pvt. Ltd. В **таблице 3** показаны погрешности, связанные с каждым датчиком. Из имеющихся данных о точности ( $Z_n$ ), погрешность ( $Y_n$ ) может быть определена, как ( $Y_n = \frac{Z_n}{\sqrt{3}}$ ).

**Таблица 3-Погрешности экспериментов**

№	Используемое оборудование	Единицы измерения	Диапазон измерений	Точность по паспорту $Z_n$ (%)	Погрешность, $Y_n$ (%)
1	APPA 30R токовые клещи	V, A		±2.5	1.44
2	Tenmars TM-207 пиранометр	Вт/м <sup>2</sup>	0 до 1999	±3	1.73
3	4-канальный К регулятор температуры	К	-270 до 353.15	±3	1.72
4	Wind Class анемометр,	м/с	0 до 25	±0.2	0.12
5	GM 1362-EN-01 термометр	К	-243.15 до 343.15	±1.5	0.86
6	К-типа термопары	К	-270 до 1030	±3	1.73

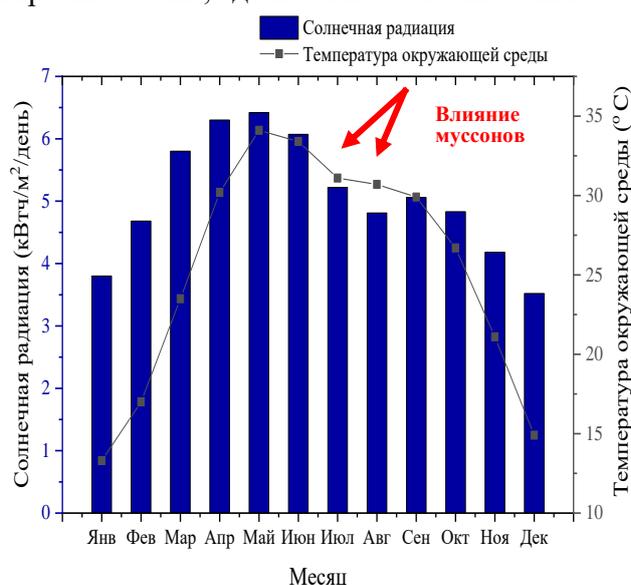
Общий настоящей экспериментальной работы можно рассчитать, используя уравнение (1–2)

$$Y_n = \sqrt{(Y_n1)^2 + (Y_n2)^2 + (Y_n3)^2 + (Y_n4)^2 + (Y_n5)^2 + (Y_n6)^2} \quad (1)$$

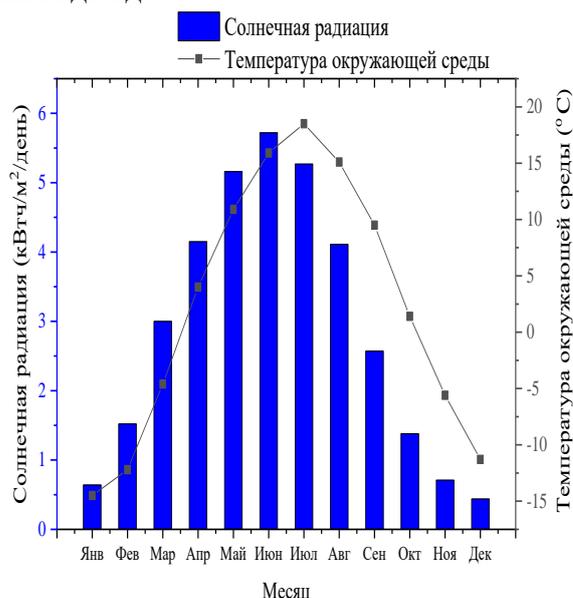
$$Y_n = \sqrt{(1.44)^2 + (1.732)^2 + (1.732)^2 + (0.115)^2 + (0.866)^2 + (1.73)^2} \quad (2)$$

Общая погрешность экспериментальных результатов составила **3,23%**.

В третьей главе приведено расчетно-теоретическое обоснование наиболее эффективных территорий для размещения солнечных станций с учетом муссонов. Важная особенность Индии - наличие сезона дождей в период с июля по август. Этот временной промежуток называется периодом муссонов. На графике (рисунке 2) очевиден спад солнечной активности в период муссонов, что снижает потенциальную выработку энергии на СЭС до 10–15% в месяц. В то же время, на рисунке 3 представлен график солнечной радиации в г. Екатеринбурге, который демонстрирует классическую "картину" инсоляции для стран Европы и Азии, где не бывает масштабных сезонных дождей.



**Рисунок 2-**график солнечной радиации окружающей среды (г.Нью-Дели, Индии)



**Рисунок 3-** график радиации температуры и температуры окружающей среды (г. Екатеринбург, Россия)

Красными стрелками на графике (рисунке 2.) указано снижение до 10% интенсивности прихода солнечной энергии в период муссонов (июнь-август).

Индия располагает большим потенциалом солнечной энергии и может существенно увеличить использование солнечных парогенераторов для выработки электроэнергии. В таблице 4 представлены крупнейшие солнечные станции Индии с использованием стационарных ФЭП.

**Таблица 4-**Крупнейшие действующие станции с ФЭП Индии (без систем слежения)

№	название проекта	Город, Штат	Собственник	Площадь, км <sup>2</sup>	Мощность (МВт)	Пуск (год)
1	Солнечный парк Бхадла	Деревня Бхадла в районе Джодхпур, Раджастхан	Компания по развитию солнечного парка Раджастхана с ограниченной ответственностью	56,65	2245	2011
2	Солнечный парк Гуджарата	Деревня Чаранка в Патанском районе	Гуджарата	19,82	790	2012
3	НП Кунта Ультра	Анантапурам, Андхра-Прадеш	Андхра-Прадеш Солнечная	32,06	978	2016

		Энергетическая Корпорация Лимитед				
4	Проект солнечной энергетики Камути	Камути, район Раманатхапурам, Камути, район Раманатхапурам,	Adani Green Energy Tamilnadu Limited	10	648	2017
5	Солнечный парк Павагада	Павагада талук, район Тумкур, Карнатака	Карнатака Солнечная Энергетика Девелопмент Корпорейшн Лтд	52,60	2000	2018
6	Рева Мега Солнечный Парк, Мадхья- Прадеш	Мадхья-Прадеш Урджа Викас Нигам Лимитед;	Гурх техсил района Рева штата Мадхья-Прадеш, Индия Корпорация солнечной энергии	6,43	750	2018
7	Курнул УльтраМега Солнечный Парк	Паньям, округ курнул, Андхра- Прадеш	Андхра-Прадеш Солнечная Энергетическая Корпорация Лимитед	6,43	1000	2019

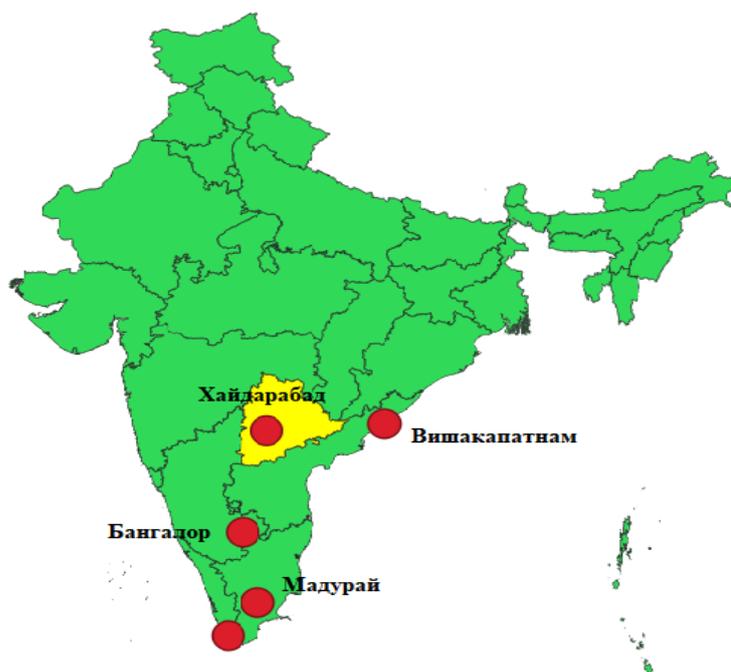
С использованием двух прикладных программ SAM и QGIS, были рассчитаны показатели ФЭП для различных климатических зон южной Индии.

В качестве территорий для оценки эффективности размещения СЭС с ФЭП были рассмотрены мегаполисы: г. Вишакapatнам {(VSKP), 2,28 млн. чел.}, г. Хайдарабад {(HYD), 15,3 млн. чел.}, г. Мадурай {(MDU), 1,8 млн. чел.}, г. Тируванантапурам {(TVC), 2,79 млн. чел.} и г. Бангалор {(SBC), 13,1 млн. чел.} с высокой солнечной радиацией (**рисунке 4**). Расчетно-теоретическое исследование включало в себя три различных варианта установки СЭС: стационарное «на ЮГ», меридиональное отслеживание солнца панелями ФЭП, (одноосное слежение) и двухосное слежение по меридиональным координатам и углу наклона. В **таблице 5** показаны технические и экономические расчетные результаты для пяти городов-мегаполисов в южной Индии.

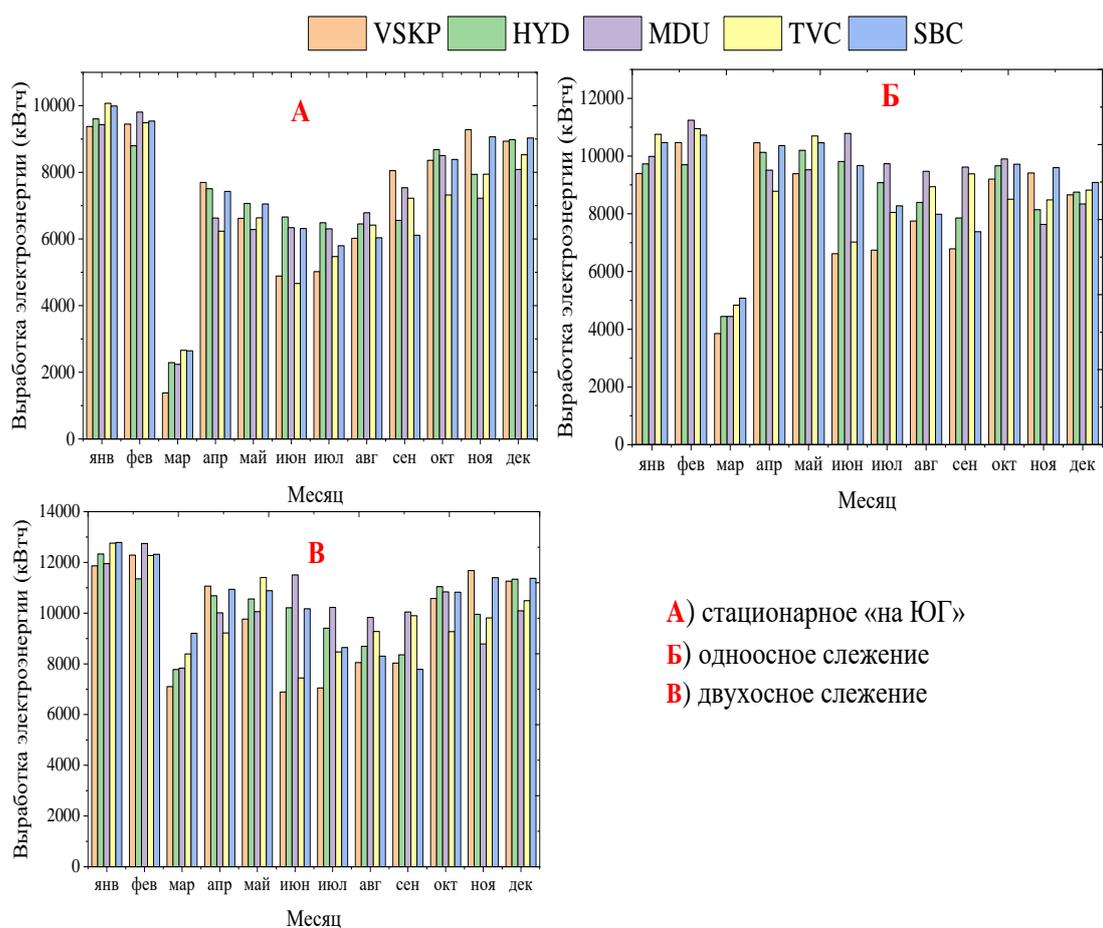
**Таблица 5-**Технические и экономические показатели СЭС на базе ФЭП, рассчитанные в программных пакетах SAM+QGIS для пяти городов-мегаполисов в южной Индии

№	Критерий	стационарное «на ЮГ»	одноосное слежение	двухосное слежение
<b>Приведенная мощность каждой СЭС 20 МВт</b>				
1	выработка энергии, ГВтч	31–33	38–42	44–46
2	Коэффициент мощности, %	18,5 до 19,5	22 до 23	25 до 26,5
3	LCOE <sub>реал</sub> (цент/кВтч)	4,17 до 4,34	3,53 до 3,75	3,06 до 3,44

При варианте двухосевого отслеживания показанные результаты во всех случаях были выше по выработке энергии и LCOE<sub>реал</sub>. Расчетные результаты показали, что мегаполис Хайдарабад (HYD) (желтый цвет на **рисунке 5**) был определен как наиболее эффективная территория для установки крупномасштабного проекта солнечной фотоэлектрической станции в южном индийском регионе.



**Рисунок 4-** Карта с указанием эффективной территории Индии, рассчитанной в программе SAM для размещения СЭС с использованием системы слежения за солнцем



**Рисунок 5-** Производство электрической энергии при разных способах отслеживания Солнца на СЭС с ФЭП для пяти мегаполисов в Южной Индии

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям способов **активного** воздействия на ФЭП по снижению температуры и одновременному повышению эффективности фотоэлектрических панелей.

В главе рассмотрено уравнение Эванса и Флоршюэца (3 и 4), связывающее температуру панели с ее эффективностью. КПД солнечного элемента в стандартных условиях испытаний представлен как  $\eta_{T_{ref}}$ , который для данной ФЭП равен 13-15%,  $\beta_{ref}$  представляет собой температурный коэффициент, который в паспортной характеристике соответствует величине  $0,004\text{ C}^{-1}$ . Температура стандартных условий испытаний указана как,  $T_{ref}$  составляет  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Увеличение электрического КПД модуля солнечной батареи в результате процесса охлаждения можно рассчитать следующим образом:

максимальная мощность ФЭП установки рассчитывается как

$$P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} = V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF \quad (3)$$

$$\text{повышение КПД} = \frac{\eta_{\text{ФЭП охлад.}} - \eta_{\text{ФЭП ст}}}{\eta_{\text{ФЭП ст}}} \times 100\% \quad (4)$$

где,  $P_{mp}$ ,  $V_{mp}$ ,  $I_{mp}$  означает максимальную выходную мощность ФЭП, напряжение (В), сила тока (А),  $FF$  — коэффициент заполнения площади панели солнечными элементами,  $V_{oc}$  напряжение холостого хода в (В), когда ток равен нулю, и  $I_{sc}$  ток короткого замыкания в (А), когда напряжение равно нулю.

В экспериментах по охлаждению модулей ФЭП важно учитывать доступность охладителя, а также техническую и экономическую составляющую конкретного предлагаемого способа. В большинстве случаев исследователи прибегают к использованию воды для охлаждения фотоэлектрических модулей, однако, вода, хотя и дешева, может не быть легко доступна для использования в ряде климатических зон. Например, некоторые страны Северной Африки и Ближнего Востока сталкиваются с нехваткой воды в жарком климате, воздействия конфликтов или экономического спада. Это приводит к тому, что в таких районах солнечные фотоэлектрические модули не будут охлаждаться водой из-за её дефицита.

В первом эксперименте главы 4 представлен **активный** способ охлаждения ФЭП (рисунке 6) с применением радиаторов, закрепленных на задней части панели и погруженных в водный бассейн. Скорость теплопередачи с тыльной стороны ФЭП определяется суммой всех перепадов давления в радиаторе по формуле

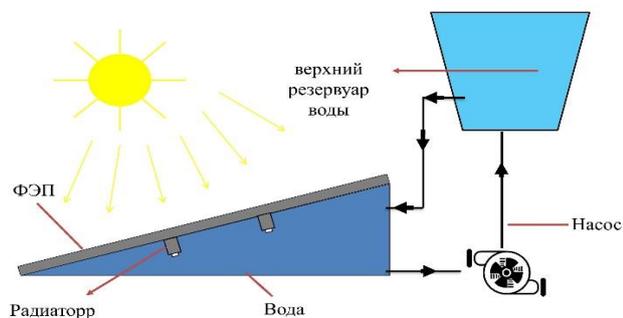
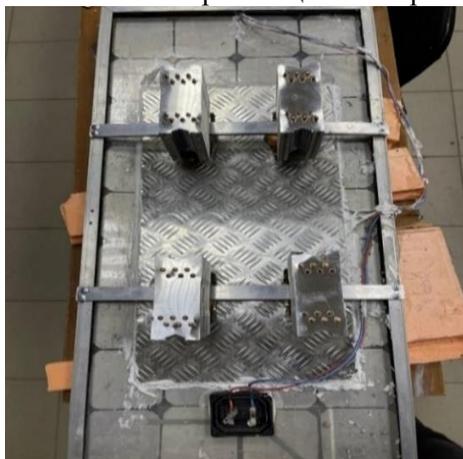
$$\Delta P_c \geq \Delta P_l + \Delta P_v + \Delta P_g \quad (5)$$

где  $\Delta P_c$  -максимальная капиллярная сила внутри конструкции радиатора;

$\Delta P_l$  -перепад давления,

$\Delta P_v$  -необходимый для возврата жидкости из конденсатора в секцию испарения;

$\Delta P_g$  -потенциальная энергия (которая может быть положительной, отрицательной или нулевой в зависимости от ориентации и направления тепловой трубы), соответственно.



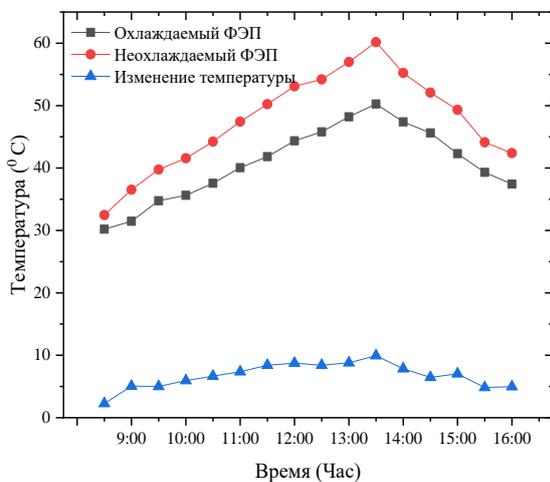
**Рисунок 6-** Экспериментальная установка с размещением радиаторов на тыльной стороне панели ФЭП

Подобная система охлаждения больших поверхностей панелей ФЭП может эффективно применяться на плавучих солнечных станциях, одна из которых строится в Индии (рис.7).

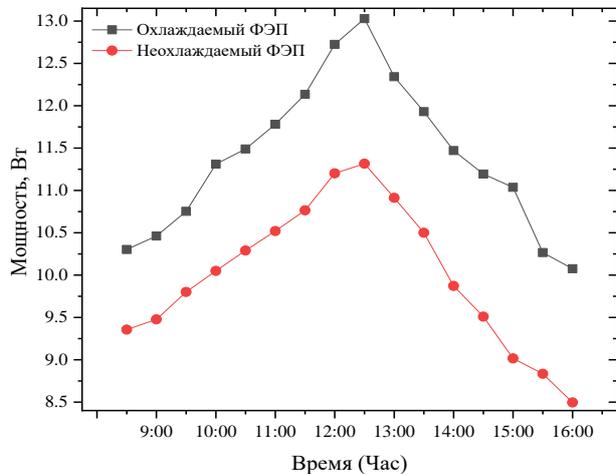


**Рисунок 7** - Строящаяся солнечная станция в г. Рамагундам, штат Телангана, Индия ( $N_{уст.}$  42,5 МВт; планируемый год пуска в эксплуатацию 2023 г.).

Предложенный способ охлаждения приводил к стабилизации температуры панели даже при относительно высоких (50–70 °С) температурах нагрева фотоэлектрического модуля в течение суток. Максимальная температура контрольной панели составляла 60,9 °С в 13:30, в то время как температура охлаждаемой панели в тот же период составляла 50,9 °С, что свидетельствует о положительном влиянии данного способа охлаждения на температуру ФЭП. Сравнение температур экспериментальной и контрольной панелей показаны на **рисунке 8**. При этом среднее повышение температуры при данном способе охлаждения за весь период эксперимента составляет 14,16% по сравнению с неохлаждаемой фотоэлектрической панелью. Средняя мощность - 11,39 Вт была зарегистрирована для охлаждаемой панели по сравнению с 9,73 Вт для неохлаждаемого ФЭП, что указывает на увеличение выходной мощности модуля на 17% (**рисунке 9**). Средний электрический КПД охлаждаемой панели составил 14,05 %, а неохлаждаемого ФЭП 12,76 %, что свидетельствует об улучшении электрического КПД модуля на 2.98 %.



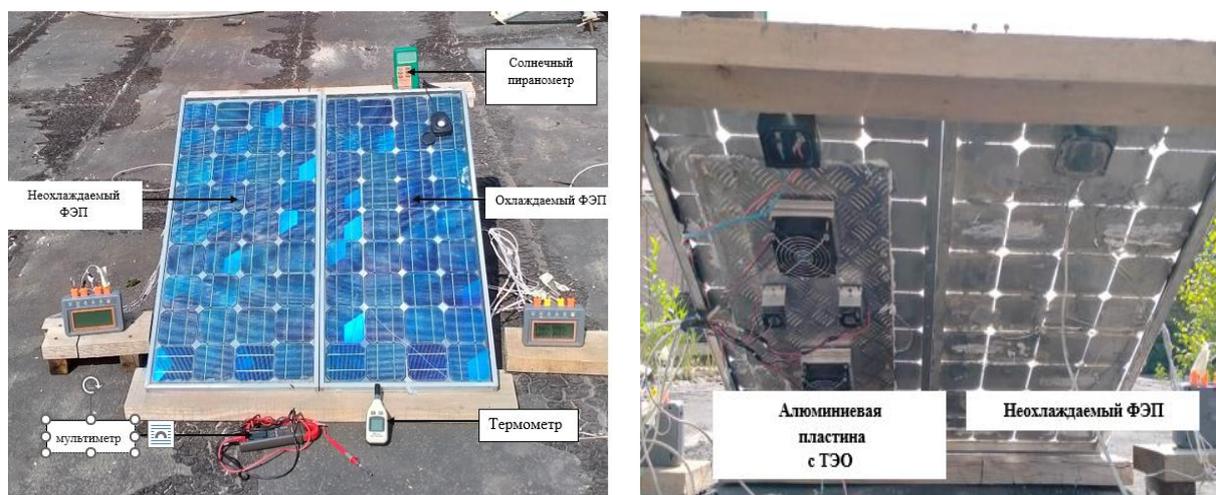
**Рисунок 8**- Температура охлаждаемого и (контрольного)неохлаждаемого ФЭП



**Рисунок 9**-Мощность охлаждаемого и неохлаждаемого ФЭП

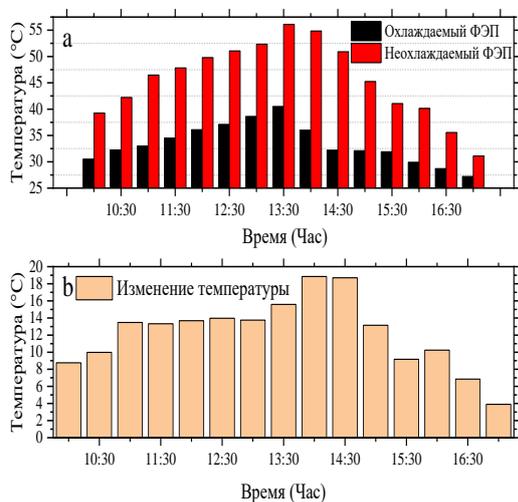
Во втором эксперименте (активный способ, **рисунке 10**) была использована ФЭП с алюминиевой пластиной и термоэлектрический охладитель для снижения температуры фотоэлектрического модуля. Использование разности температур для преобразования в электрическое напряжение и обратное преобразование электрического напряжения в разность температур, известно как термоэлектрический эффект. Термоэлектрический генератор (ТЭГ), также известный как «охладитель Пельтье», использует эффект Пельтье для теплообмена. ТЭГ состоит из пар полупроводников P-типа (полупроводники, такие как германий или кремний, легированные любым из трехвалентных атомов, таких как бор, индий или галлий) и N-типа (полупроводник — это собственный полупроводник, легированный фосфором (P), мышьяком (As) или сурьмой (Sb) в качестве примеси.).

Производительность ТЭГ зависит от градиента температур. Когда напряжение прикладывается между двумя разнородными проводниками, например, А и В, в месте соединения будет происходить нагрев.

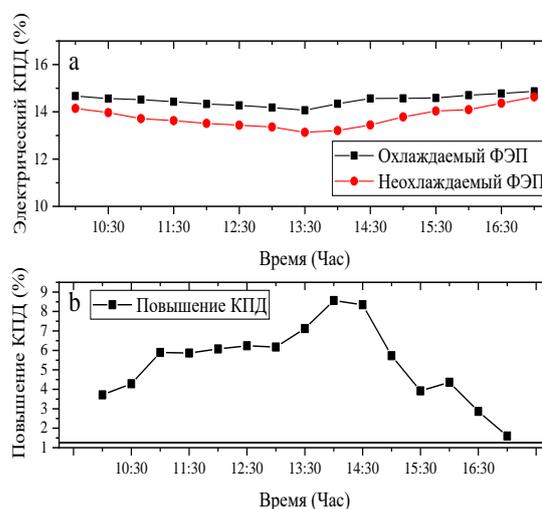


**Рисунок 10-** Экспериментальная установка солнечных ФЭП с алюминиевой пластиной и ТЭГ на тыльной стороне панели

Результаты эксперимента представлены на **рисунке 11**. В течение эксперимента температура контрольной (неохлаждаемой) ФЭП была выше температуры экспериментальной (охлаждаемой) ФЭП на 2–17 °С. Эксперимент показал, что эффективность контрольного фотоэлектрического модуля ниже из-за более высокой температуры, фиксируемой в течение всего периода измерений. Расчетная средняя эффективность охлаждаемой панели и контрольного модуля составляет 14,5 % и 13,8 % соответственно (**рисунке 12**), что свидетельствует об увеличении КПД модуля охлаждаемой солнечной ФЭП на 5,1 %.



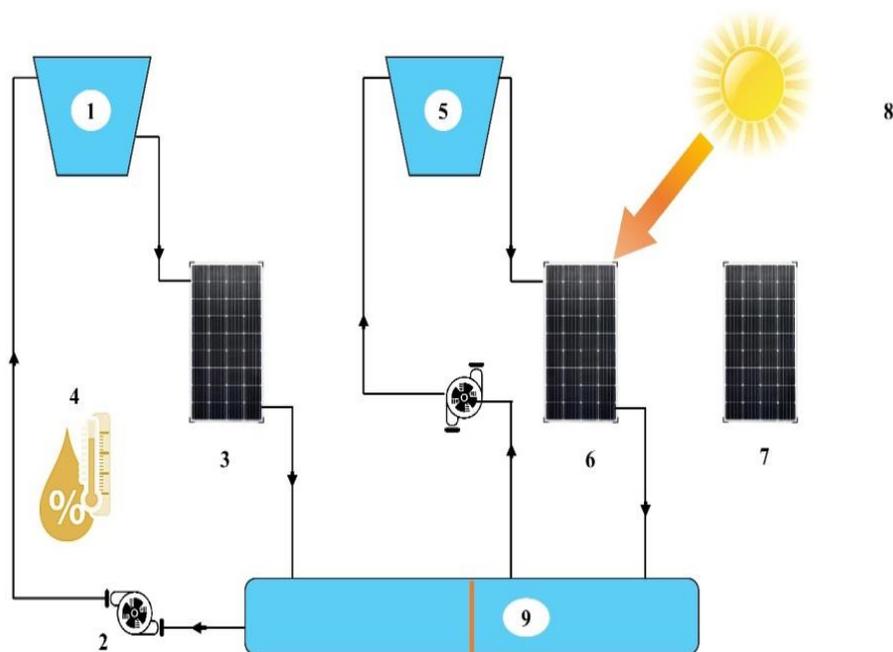
**Рисунок 11-** Температура охлаждаемой и неохлаждаемой ФЭП



**Рисунок 12-** Электрический КПД для охлажденного и неохлаждаемого ФЭП

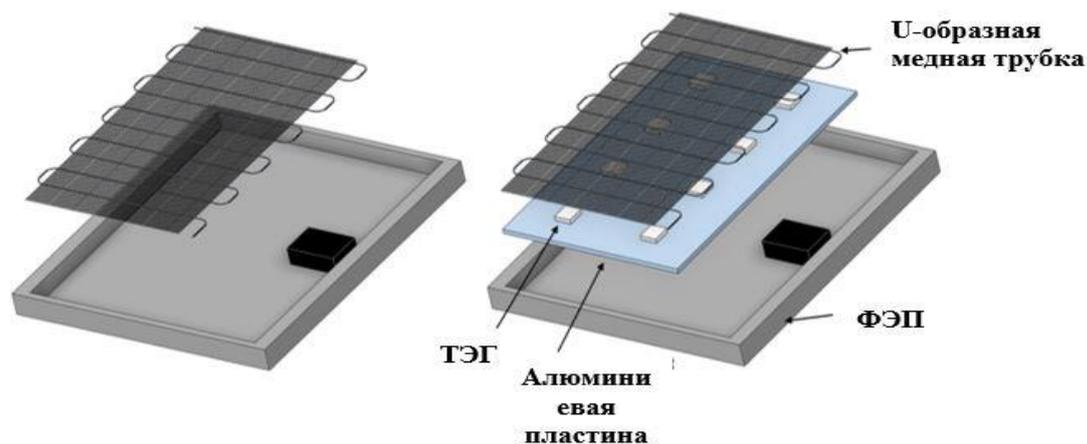
В третьем эксперименте (активный способ) предложена гибридная фотоэлектрическая система, использующая для охлаждения комбинацию термоэлектрического модуля Пельтье (TEC1-12706) и наночастиц оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), подающихся через U-образные медные трубки, которые закреплены на задней стороне ФЭП (**рисунке 13**). Для сравнения использовались три панели ФЭП мощностью по 50 Вт каждая: неохлаждаемый (контрольный) ФЭП, ФЭП охлаждаемый водой, циркулирующей в U-образных медных

трубках и ФЭП с ТЭГ, охлаждаемым наножидкостью  $Al_2O_3$ , циркулирующей в U-образных медных трубках (рисунке 13).



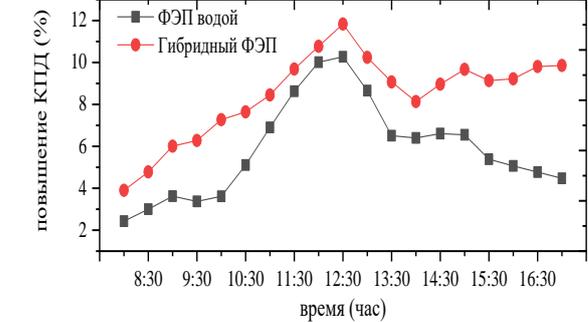
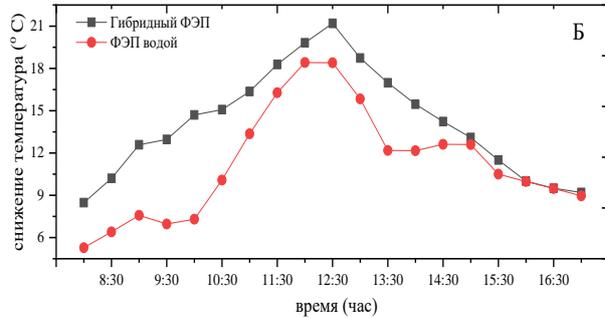
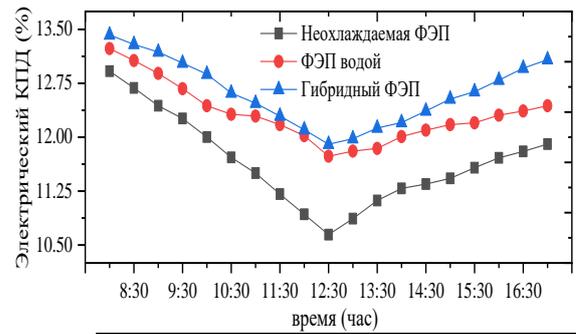
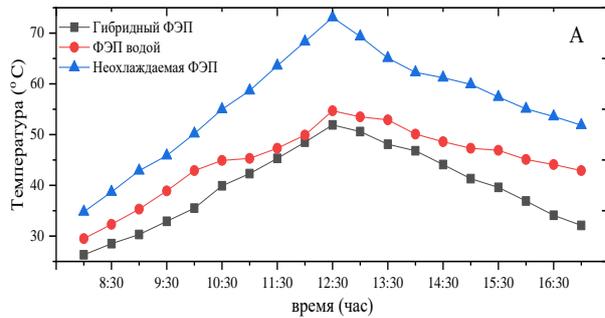
**Рисунок 13** - Экспериментальная установка: 1) резервуар для хранения наножидкости; 2) насос; 3) Гибридная ФЭП (ТЭГ+U-образная медная трубка); 4) индикатор влажности воздуха; 5) верхний резервуар воды; 6) ФЭП с U-образной медной трубкой; 7) неохлаждаемый (контрольный) ФЭП; 8) поток солнечной радиации; 9) нижний резервуар с оребрением.

В ходе эксперимента использовались два водяных микро-насоса для подъема наножидкости из резервуара воды (9) (нагретая вода) в резервуар для сбора воды на верхнем уровне (1 и 5). Схема устройства тыльной стороны ФЭП с U-образными медными трубками + ТЭГ показана на рисунке 14.



**Рисунок 14** - Схема устройства тыльной стороны модифицированных ФЭП

Результаты исследования: температура для неохлаждаемой ФЭП, ФЭП только с водой и гибридной ФЭП (ТЭГ+U-образная медная трубка) с наножидкостью, составляют 56,1 °С, 44,8 °С, 39,7 °С, соответственно (рисунке 15). Повышение электрического КПД для фотоэлектрической панели, охлаждаемой водой и гибридной фотоэлектрической панели с ТЭГ, составляет 5,9% и 8,5%, соответственно (рисунке 16).



**Рисунок 15 - Температура охлаждаемого ФЭП и изменение температуры модифицированного ФЭП**      **Рисунок 16 - Электрический КПД и повышение КПД ФЭП**

В ходе эксперимента создаваемая термоэлектрическим модулем Пельтье ТЕС-12706 с горячей и холодной стороны, температура составляла 39,7 °С и 30,6 °С, соответственно (рисунке 17А). Эффективность ТЭГ рассчитывается по формуле (6). КПД ТЭГ для предложенного способа охлаждения составляет 1,52% (рисунке 17Б).

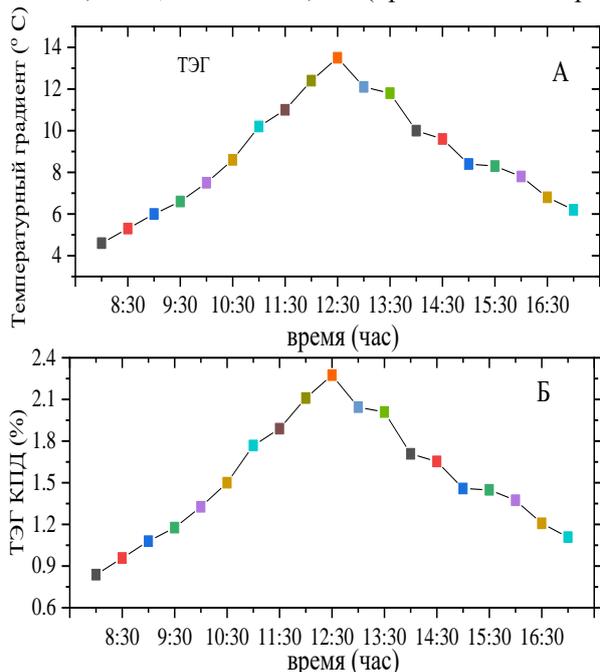
$$\eta_{\text{ТЭГ}} = \left(1 - \frac{T_c}{T_h}\right) \frac{\sqrt{1 + Z\bar{T}} - 1}{\sqrt{1 + Z\bar{T}} + \frac{T_c}{T_h}} \quad (6)$$

где  $Z$ ,  $T_h$ ,  $T_c$  и  $\bar{T}$  означают показатель качества, температуру горячей стороны, холодной стороны и среднюю температуру ТЭГ, т. е.  $(T_h + T_c)/2$ . Значение добротности составляет 0,008/К.

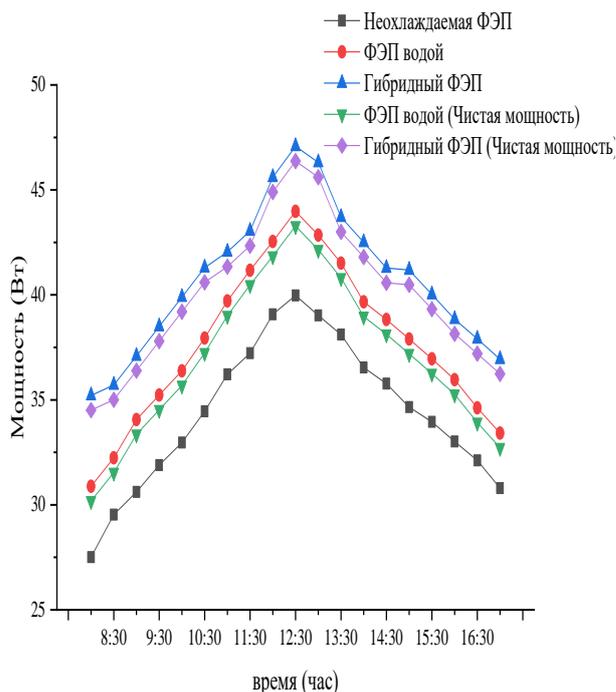
Выходная мощность для трех ФЭП (рисунке 18) составила 34,4 Вт, 37,7 Вт и 40,7 Вт, соответственно, что приводило к повышению КПД на 9,5 % и 18 % по сравнению с контрольным ФЭП. Поскольку внешний источник питания (например, АКБ) использовался для питания водяных насосов (см. рисунке 13), используемых в эксперименте, важно было оценить его влияние на выходную мощность модифицированных фотоэлектрических модулей. Если вычесть мощность двух водяных насосов (см. рисунке 13), то средняя зарегистрированная мощность ФЭП только с водой и гибридной ФЭП (ТЭГ+U-образная медная трубка) составляют 36,97 Вт и 40,0 Вт соответственно, что приводит к увеличению мощности на 7,5 % и 16,42 %, в то время как мощность контрольного ФЭП осталась неизменной (34,4 Вт). Расчет выходной мощности ФЭП, с учетом потребляемой насосами и ТЭГ, представлен в (7).

$$\sum_{t=8:00}^{t=17:00} P_{\text{выходная мощность ФЭП}} = \sum_{t=8:00}^{t=17:00} P_{\text{охл.ФЭП}} - \sum_{t=8:00}^{t=17:00} P_{\text{насоса}} - \sum_{t=8:00}^{t=17:00} P_{\text{ТЭГ}} \quad (7)$$

Где,  $P_{\text{охл.ФЭП}}$ ,  $P_{\text{насоса}}$ ,  $P_{\text{ТЭГ}}$  означают показатель мощность охлаждаемых ФЭП, мощность насосов, мощность ТЭГ, и  $t$  (проведение эксперимента осуществлялось с 08:00 до 17:00)



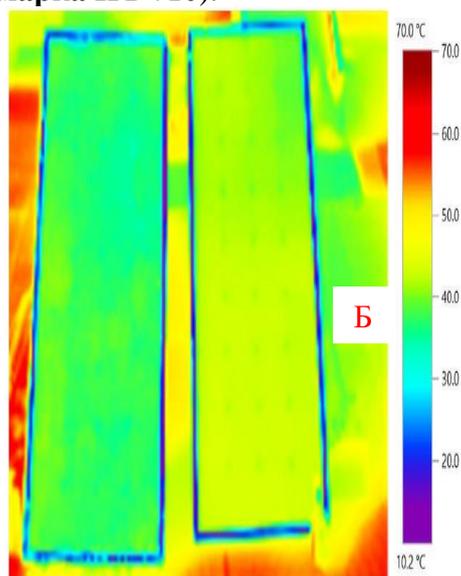
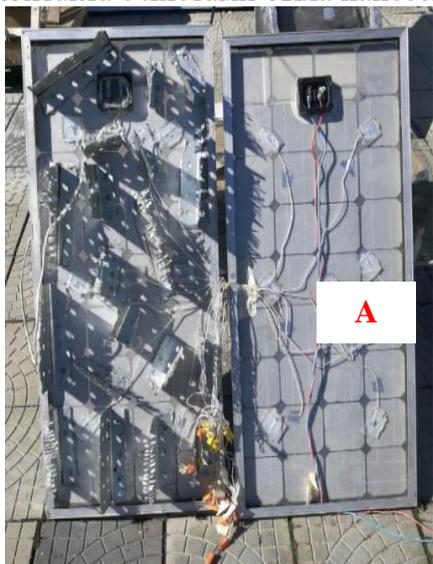
**Рисунок 17- А):** Температурный градиент между горячей и холодной сторонами ТЭГ;  
**Б):** КПД ТЭГ



**Рисунок 18 -** Мощность охлаждаемых и контрольного ФЭП

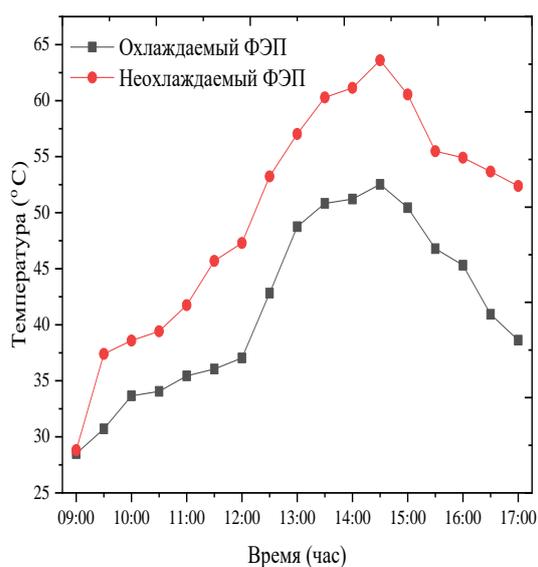
В пятой главе представлены экспериментальные исследования по снижению температуры ФЭП с использованием **пассивного** способа охлаждения.

В первом эксперименте представлен пассивный способ охлаждения ФЭП с перфорированными алюминиевыми ребрами и «щеткообразными» концевиками для ускоренного отвода тепла от фотоэлектрической панели (**рисунке 19А**). С тыльной стороны контрольной панели ФЭП неохлаждаемая фотоэлектрическая панель была без каких-либо модификаций. Для обеспечения надежного контакта и эффективного отвода теплоты от фотоэлектрической панели к алюминиевым листам между панелью и поверхностью контакта с листами была нанесена термопаста (**марка НУ 710**).

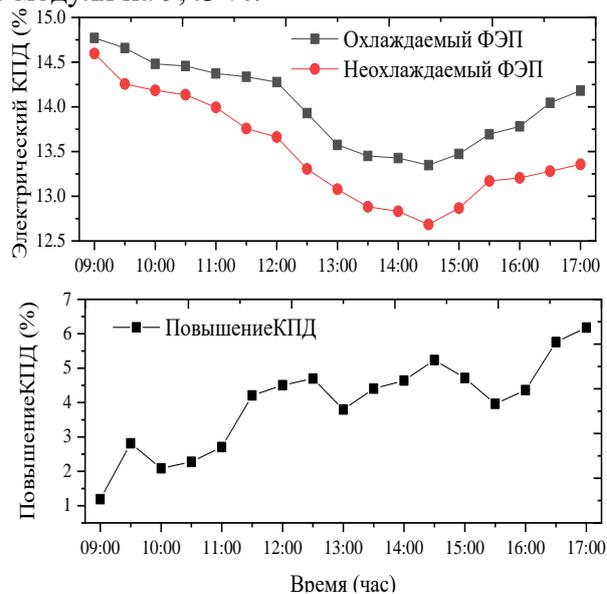


**Рисунок 19 -** Экспериментальная установка ФЭП и термограмма распределения температуры

Для прочного прилегания алюминиевых листов к тыльной стороне ФЭП использовался силиконовый гель (**рисунке 19А**). Змеевики из алюминиевых ребер были расположены равномерно в разных местах с тыльной стороны ФЭП **рисунке 19А**. В результате предлагаемого способа охлаждения с использованием змеевиковых алюминиевых листов, установленных на тыльной стороне охлаждаемой фотоэлектрической панели, зарегистрированная температура охлаждаемой панели ФЭП составила 41,1°С, а неохлаждаемая фотоэлектрическая панель 51,1 °С. Разница температур составила 10 °С (**рисунке 20**). Снижение температуры ФЭП привело к повышению эффективности фотоэлектрического модуля на 4% (**рисунке 21**). Средняя выходная мощность охлаждаемого фотоэлектрического модуля составила 12,19 Вт, в то время как мощность контрольного модуля составила 11,14 Вт. Это соответствует повышению выходной мощности охлаждаемого фотоэлектрического модуля на 9,43 %.



**Рисунок 20-** Температура охлаждаемой и неохлаждаемой (контрольной) ФЭП



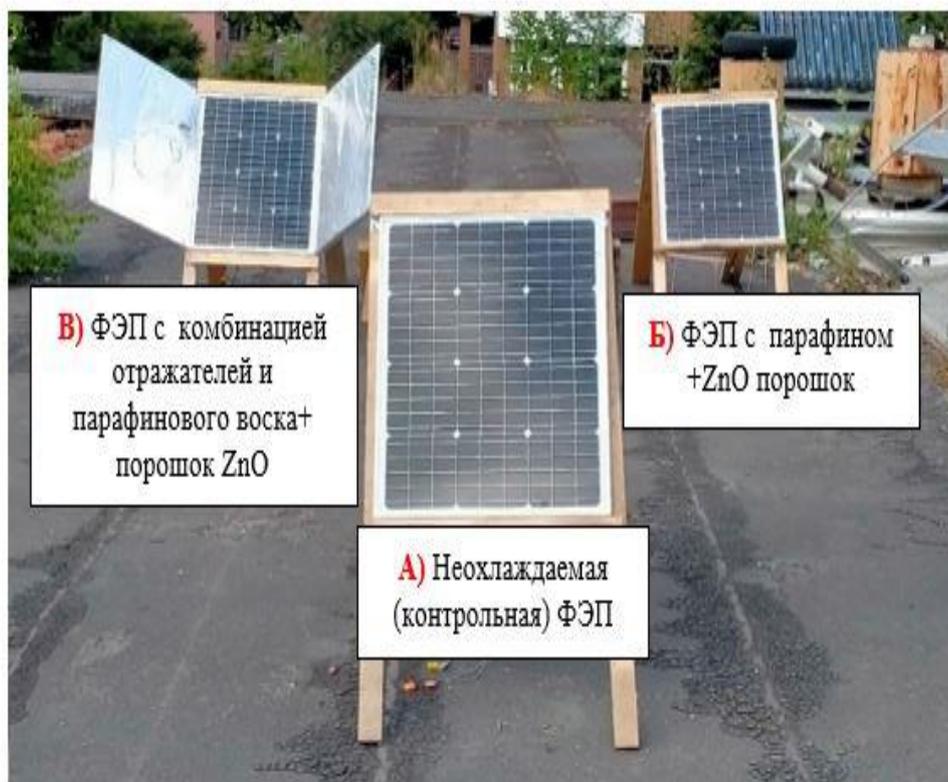
**Рисунок 21-** Электрический КПД для охлаждаемого и неохлаждаемого ФЭП

Во втором (**пассивном**) эксперименте использовалась фотоэлектрическая панель мощностью 50 Вт для изучения характеристик ФЭП в комбинации с алюминиевыми отражателями и термоотводящей пастой, образованной парафиновым воском с перемешанным в нем порошком ZnO. Конструкция экспериментальной установки показана на **рисунке 22 (А, Б)**.



**Рисунок 22-** Элементы экспериментальной ФЭП: **А)** алюминиевые корпуса с парафином; **Б)** корпуса парафина и змеевиковые алюминиевые листы, прикрепленные к тыльной стороне ФЭП

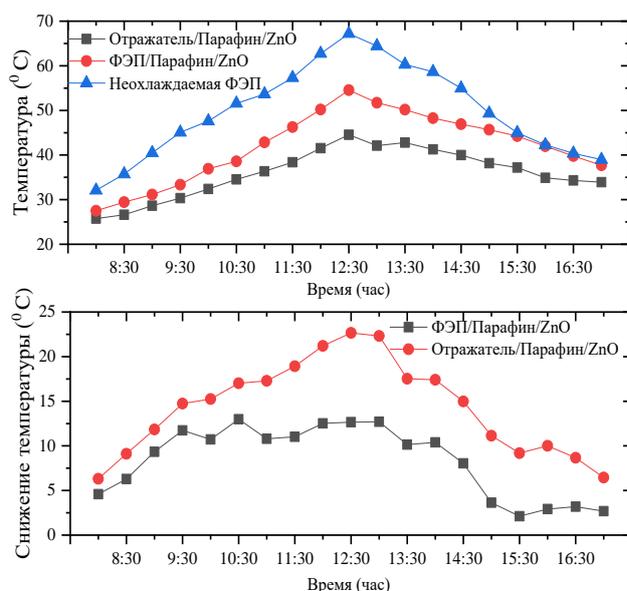
В ходе эксперимента использовались три ФЭП: неохлаждаемая ФЭП (контрольная) (**рисунке 23А**), панель с парафином/ZnO, закрепленные на тыльной стороне ФЭП в алюминиевых коробах и силикон-геле для надежного удержания (**рис.23Б**), и, наконец, панель ФЭП с алюминиевыми отражателями, закрепленными по бокам ФЭП и одновременно с парафиновым воском с тыльной стороны панели (**рисунке 23В**). Все три ФЭП имеют одинаковые габаритные размеры  $650 \times 550 \times 25$  мм, размещены под углом наклона  $45^\circ$  к горизонту и обращены на юг (**рисунке 23**). Отражатели изготовлены с теми же габаритными размерами, как и габариты панели, из недорогой алюминиевой фольги с коэффициентом отражения 0,88 %, закрепленной с обеих сторон фотоэлектрического модуля под углом  $120^\circ$  к нему (**рисунке 23В**).



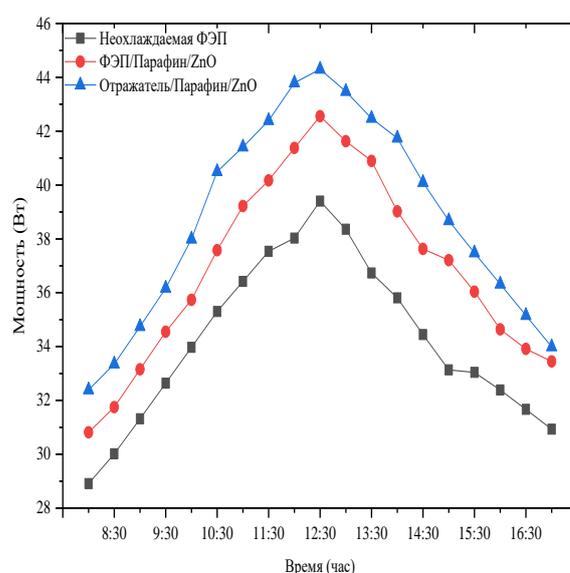
**Рисунок 23-** Экспериментальная установка с тремя ФЭП:

**А)** неохлаждаемая ФЭП (контрольная); **Б)** ФЭП с парафином +ZnO порошок; **В)** ФЭП с комбинацией отражателей и парафинового воска+ZnO порошок

Результаты эксперимента по повышению эффективности ФЭП представлены на графиках (**рисунке 24** и **25**). Снижение температуры (**рисунке 24**) и мощности ФЭП для предлагаемого способа охлаждения (**рис.25**). Из графиков видно, что температура для неохлаждаемой ФЭП (**рис.23А**), ФЭП с парафиновым воском +ZnO порошком (**рисунке 23Б**) и ФЭП с отражателями вкпе с парафином+ZnO порошком (**рисунке 23В**), составляет  $50^\circ\text{C}$ ,  $42^\circ\text{C}$ ,  $36^\circ\text{C}$ , соответственно. В течение эксперимента температура контрольной (неохлаждаемой) ФЭП была выше температуры экспериментальной (охлаждаемой) ФЭП на  $2\text{--}19^\circ\text{C}$ , соответственно в сравнении с неохлаждаемой ФЭП. Электрический КПД неохлаждаемой (контрольной) ФЭП составил 12%; ФЭП с Парафином+ZnO-порошок, 12,5%, ФЭП отражателями с Парафином+ZnO-порошок, 13.5%. Мощность, вырабатываемая ФЭП, составила 34,2 Вт, 36,9 Вт и 39 Вт, соответственно (**рисунке 23А, 23Б, 23В**)



**Рисунок 24-** График температур для охлаждаемой и неохлаждаемой ФЭП



**Рисунок 25-** Мощность для охлаждаемой и неохлаждаемой ФЭП

Проведенные исследования на пяти описанных выше экспериментальных установках **активного** охлаждения ФЭП (четвертая глава) и **пассивного** охлаждения ФЭП (пятая глава) показали повышение эффективности ФЭП при различных способах снижения температуры, что является важным для стран экваториального пояса с высокими значениями средних температур окружающей среды. В **таблице 6** представлена сравнительная характеристика эффективности пяти экспериментальных исследований.

**Таблица 6-** Показатели эффективности различных способов снижения температуры ФЭП

№	Признаки эксперимента	Средняя температура ФЭП, °C		Среднее КПД, %		Средняя мощность, Вт		LCOE, \$/кВтч
		контрольного ФЭП	Охлаждаемого ФЭП	Охлаждаемого ФЭП	контрольного ФЭП	Охлаждаемого ФЭП	контрольного ФЭП	
<b>Способы активного охлаждения ФЭП (четвертая глава)</b>								
1	Применение тепло радиаторов с водой	47,5	40,7	14,05	13,65	11,39	9,73	0,61-0,277
2	алюминиевая пластина и термоэлектрический генератор	45,6	33,6	14,5	13,8	6,33	5,22	0,414-1,247
3	ТЭГ/ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> наножидкость/ U-образная медная трубка	56,1	39,7 - 44,8	12,5 - 12,62	11,64	36,97 – 40,0 (без насоса)	34,39	0,045-0,182
<b>Способы пассивного охлаждения ФЭП (пятая глава)</b>								
1	алюминиевые ребра	51	41	14	13	13,24	12,1	0,42-0,45
2	Отражатели и парафин+ порошок ZnO	50,9	36 - 41,9	12,5 – 13,0	11,9	36,9 -39,0	34,2	0,043-0,149

## Заключение

В работе рассмотрены пути повышения эффективности солнечных фотоэлектрических и термодинамических станций в Республике Индия. Потенциал уже действующих солнечных станций имеет существенный резерв в повышении КПД и выработке энергии, а новые объекты солнечной энергетики могут быть спроектированы с учетом результатов данной работы, однако, их строительство требует значительных затрат.

В **таблице 7** представлен энергетический эффект (прирост установленной мощности) за счет внедрения представленных в работе пассивных способов повышения эффективности ФЭП).

**Таблица 7-Прирост уст. мощностей за счет внедрения пассивных способов повышения эффективности крупнейших действующих ФЭП Индии.**

№	Название действующей СЭС	Город, Штат	Существующая Мощность (ГВт)	Мощность (ГВт) при внедрении пассивного способа повышения КПД (+10%)	Доп. мощность за счет реновации (МВт)	Время на реновацию (месяцы)
1	Солнечный парк	Деревня Бхадла	2,245	2,470	225	23
2	Кунта Ультра	Анантапурам,	0,978	1,08	100	10
3	Солнечный парк	Павагада талук,	2,0	2,20	220	22
4	Рева Мега Солнечный Парк,	Мадхья-Прадеш	0,75	0,825	80	8
5	УльтраМега Солнечный Парк	Курнул, Андхра-Прадеш	1,0	1,10	110	11
6	Рева Мега Солнечный Парк	Мадхья-Прадеш Урджа Викас Нигам Лимитед;	0,75	0,825	80	8
7	Курнул УльтраМега Солнечный Парк	Паньям, округ курнул, Андхра-Прадеш	1,0	1,10	110	11
<b>Итого</b>			8,723	9,6	920	23

### ВЫВОДЫ:

На основании экспериментальных исследований и теоретических расчетов, можно сделать следующие выводы:

1. В ходе анализа выявлено существенное (до 10–15%) влияние муссонов на выработку электроэнергии в летний период (июнь-август), что является устойчивым климатическим фактором для Республики Индия, снижает потенциал выработки и требует внимания при проектировании систем солнечной энергии.
2. Результаты экспериментальных исследований по снижению температуры панелей ФЭП для территорий с высокой температурой окружающей среды (50-65°C) показали существенный потенциал для увеличения выработки энергии.
3. Использование активных способов снижения температуры ФЭП продемонстрировало высокую эффективность в повышении выработки (до 10%), однако признано неэффективным из-за высокой доли затрат на собственные нужды (до 10-15%).
4. Использование пассивных способов снижения температуры ФЭП (интеграция щеткообразных алюминиевых ребер на тыльной стороне ФЭП), позволила понизить

температуру панели на 10 °С, что привело к увеличению выходной мощности ФЭП на 9,43% и является перспективным ввиду отсутствия затрат на собственные нужды.

5. Использование пассивного способа снижения температуры ФЭП (модуль в ФЭП с отражателями с парафином+ZnO-порошком на его тыльной поверхности) позволил снизить температуру панелей на 10–15 °С. Это привело к повышению КПД на 12–13% для модифицированного ФЭП. Показано, что интеграция комбинации парафинового воска и алюминиевых ребер на задней поверхности ФЭП может снизить LCOE ФЭП на 0,043–0,149 центов/кВтч.

**Перспективы дальнейшей разработки темы исследования** заключаются в развитии следующих направлений: применение способов снижения температуры и отслеживания положения солнца на термодинамических СЭС с использованием концентраторов солнечной энергии и использование пассивных способов снижения на СЭС с применением новых разработок.

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Singh S. Implementation of Total Productive Maintenance Approach: Improving Overall Equipment Efficiency of a Metal Industry/ S. Singh, A. Agrawal, D. Sharma, V. Saini, A. Kumar, **S. PraveenKumar**//Inventions. 2022. Vol. 7. P.119. 0,69 п. л / 0,16 п. л (**Scopus, WoS**).
2. Kaldate A. Comparative feasibility analysis of an integrated renewable energy system (IRES) for an urban area/A. Kaldate, A. Kanase-Patil, A. Bewoor, R. Kumar, S. Lokhande, M. Sharifpur, **S. PraveenKumar** //Sustainable Energy Technologies and Assessments. 2022. Vol. 54. P.102795. 0,81 п. л. / 0,11 п. л (**Scopus, WoS**).
3. Tavarov SS. Evaluation of the Operating Modes of the Urban Electric Networks in Dushanbe City, Tajikistan/ SS. Tavarov, I. Zicmane, S. Beryozkina, **S. PraveenKumar**, M. Safaraliev, S. Shonazarova//Inventions. 2022. Vol. 7, P.107. 1,0 п. л. / 0,16 п. л (**Scopus, WoS**).
4. **PraveenKumar.S.** Techno-economic optimization of PV system for hydrogen production and electric vehicle charging stations under five different climatic conditions in India/ **S. PraveenKumar**, E B. Agyekum, J. D. Ampah, S. Afrane, V. I. Velkin, U. Mehmood, A. A. Awosusi// International Journal of Hydrogen Energy. 2022. Vol. 47. P. 38087-38105. 1,18 п. л. / 0,16 п. л (**Scopus, WoS**).
5. **PraveenKumar.S.** Techno-economics and the identification of environmental barriers to the development of concentrated solar thermal power plants in India/ **S. PraveenKumar**, E B. Agyekum, A. Kumar, J. D. Ampah, S. Afrane, F. Amjad, V. I. Velkin// Applied Sciences.2022. Vol.12. P.10400. 2,18 п. л. / 0,31 п. л (**Scopus, WoS**).
6. Qasim A.M. Design and Implementation of a Thermoelectric Power Generation Panel Utilizing Waste Heat Based on Solar Energy/ A.M. Qasim, V. I. Velkin, **S. PraveenKumar**, Y. Du, A. H. Mola, S.E. Shcheklein// International Journal of Renewable Energy Research.2022. Vol.12. P.1234-1241. 0,5 п. л. / 0,16 п. л (**Scopus**).
7. **PraveenKumar. S.** Experimental assessment of thermoelectric cooling on the efficiency of PV module/ **S. PraveenKumar**, E. B. Agyekum, A.M. Qasim, N.T. Alwan, V.I. Velkin, S. E. Shcheklein// International Journal of Renewable Energy Research.2022. Vol.12. P. 1670-1681. 0,75 п. л. / 0,16 п. л (**Scopus, WoS**).
8. **PraveenKumar. S.** Comparative Analysis for a Solar Tracking Mechanism of Solar PV in Five Different Climatic Locations in South Indian States: A Techno-Economic Feasibility/ **S. PraveenKumar**, A. Gulakhmadov, A. Kumar, M. Safaraliev, X. Chen// Sustainability.2022. Vol.14. P.11880. 1,37 п. л. / 0,27 п. л (**Scopus, WoS**).

9. **PraveenKumar.S.** Experimental Study on Performance Enhancement of a Photovoltaic Module Incorporated with CPU Heat Pipe—A 5E Analysis/ **S. PraveenKumar**, A. Gulakhmadov, E.B. Agyekum, N. T. Alwan, V. I. Velkin, P. Sharipov, M. M. Safaraliev, X. Chen // *Sensors*.2022. Vol.22. P.6367. 1,31 п. л. / 0,16 п. л. (**Scopus, WoS**).
10. Patil. S.S. Development of Optimized Maintenance Program for a Steam Boiler System Using Reliability-Centered Maintenance Approach/ S.S. Patil, R. Kumar, M.H. Ahmadi, M. Sharifpur. **S. PraveenKumar** // *Sustainability*.2022. Vol.12. P. 10073. 0,25 п. л. / 0,1 п. л. (**Scopus, WoS**).
11. Andal A.G. Perspectives on the Barriers to Nuclear Power Generation in the Philippines: Prospects for Directions in Energy Research in the Global South/ A. G. Andal, **S. PraveenKumar**, E.G. Andal, A. M. Qasim, V.I. Velkin//*Inventions*. 2022. Vol. 7. P. 53. 1 п. л. / 0,2 п. л. (**Scopus, WoS**).
12. Patil. S.S. A New Approach for Failure Modes, Effects, and Criticality Analysis Using ExJ-PSI Model—A Case Study on Boiler System/ S.S. Patil, A.K. Bewoor, R.B. Patil, R. Kumar, B. Ongar, Y. Sarsenbayev, **S. PraveenKumar**, A. M. M. Ibrahim, M. S. Alsoufi, A.Elsheikh// *Applied Sciences*.2022. Vol.12. P. 11419, 0,25 п. л. / 0,1 п. л. (**Scopus, WoS**).
13. Qasim A.M. MPPT for Hybrid Wind, Solar and Thermoelectric Power Generation Systems for Off-Grid Applications/ A.M. Qasim, V. I. Velkin, N.T. Alwan, **S. PraveenKumar**//*Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2022. Vol. 22. P. 56-68. 0,86 п. л. / 0,2 п. л.
14. A. Kumar. Alternating current losses in superconducting circular/stacked coils used in energy storage systems/A. Kumar, **S. PraveenKumar**, A. Agrawal, V.I. Velkin// *Journal of Energy Storage*.2022. Vol.45. P. 103721, 0,86п. л. / 0,25 п. л. (**Scopus, WoS**).
15. **PraveenKumar.S.** Thermal management of solar photovoltaic module to enhance output performance: an experimental passive cooling approach using discontinuous aluminum heat sink/ **S. PraveenKumar**, E. B. Agyekum, V.I. Velkin, S. J. Yaqoob, T. S. Adebayo//*International Journal of Renewable Energy Research*. 2021. Vol. 11. P. 1700-1712. 0,81 п. л. / 0,17 п. л. (**Scopus**).
16. Qasim A. M. A New Maximum Power Point Tracking Technique for Thermoelectric Generator Modules / A. M. Qasim, N. T. Alwan, **S. PraveenKumar**, V. I. Velkin, E. B. Agyekum // *Inventions*. 2021. Vol. 6. P. 88. 0,69 п. л. / 0,25 п. л. (**Scopus, WoS**).
17. Alwan N.T. Experimental study of a tilt single slope solar still integrated with aluminum condensate plate/ N. T. Alwan, M. H. Majeed, S. E. Shcheklein, O. M. Ali. **S. PraveenKumar** //*Inventions*.2021. Vol. 6. P.77. 0,81 п. л. / 0,17 п. л. (**Scopus, WoS**).
18. Agyekum E.B. Experimental Study on Performance Enhancement of a Photovoltaic Module Using a Combination of Phase Change Material and Aluminum Fins—Exergy, Energy and Economic (3E) Analysis/ E. B. Agyekum, **S. PraveenKumar**, N.T. Alwan, V. I. Velkin, T. S. Adebayo // *Inventions*. 2021. Vol. 6. P. 69. 1,31 п. л. / 0,26 п. л. (**Scopus, WoS**).
19. Agyekum E. B. Experimental Investigation of the Effect of a Combination of Active and Passive Cooling Mechanism on the Thermal Characteristics and Efficiency of Solar PV Module/ E. B. Agyekum, **S. PraveenKumar**, N.T. Alwan, V. I. Velkin, S. E. Shcheklein, S. J. Yaqoob // *Inventions* 2021. Vol. 6. P. 63. 1,0 п. л. / 0,25 п. л. (**Scopus, WoS**).
20. Agyekum E. B. Effect of dual surface cooling of solar photovoltaic panel on the efficiency of the module: experimental investigation/ E. B. Agyekum, **S. PraveenKumar**, N.T. Alwan, V.I. Velkin, S.E. Shcheklein // *Heliyon*. 2021. Vol. 7. P. e0792. 0,56 п. л. / 0,25 п. л. (**Scopus, WoS**).
21. Agyekum E. B. Design and Construction of a Novel Simple and Low-Cost Test Bench Point-Absorber Wave Energy Converter Emulator System/ E. B. Agyekum, **S. PraveenKumar**, A. Eliseev, V. I. Velkin. // *Inventions*. 2021. Vol. 6. P. 20. 0,93 п. л. / 0,25 п. л. (**Scopus, WoS**).

22. PraveenKumar. S. Computational evaluation of thermophysical properties of mixed refrigerant and effect of pressure r-290 and r-600 a at different compositions for VCRS / **S. PraveenKumar**, N. T. Alwan, V. I. Velkin, R. S. Dondapati // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. 2020. №28-30 (350-352). С. 24-31. 0,56 п. л / 0,14 п.л.

**Другие Публикации:**

23. **Velkin V.I.** Optimization of Energy Supply With Use Renewable Energy Sources based on A Cluster Approach / V.I. Velkin, S.E. Shcheklein, E. Agyekum and **S.Praveen Kumar** // In Российские регионы в фокусе перемен. 2020. P. 478-481. 0,25 п. л / 0,1 п. л.