

*На правах рукописи*



**МАХСУМОВ Илхом Бурхонович**

**РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ТРУДНОДОСТУПНЫХ РАЙОНОВ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ**

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения».

Научный руководитель –  
**Кирпичникова Ирина Михайловна**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» ФГАОУ ВО «ЮУрГУ» (НИУ).

Официальные оппоненты:  
**Тягунов Михаил Георгиевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Гидроэнергетика и возобновляемые источники энергии» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», г. Москва;

**Зайнутдинов Рустем Ахтямович**, кандидат технических наук, заместитель генерального директора ООО научно-производственное предприятие "Астраханский региональный обучающий центр энергетической эффективности "Астраэнергоэффект"(ООО НПП «Астраэнергоэффект»), г. Астрахань.

**Ведущая организация** федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина**», г. Екатеринбург.

Защита состоится *12 марта 2021 г.*, в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.05 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1007.


С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» и на сайте ЮУрГУ:

<https://www.susu.ru/ru/dissertation/d-21229805/mahsumov-ilhom-burhonovich>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, д. 76, гл. корпус, Учёный совет ЮУрГУ, тел./факс: +7(351)-267-91-23, e-mail: [grigorevma@susu.ru](mailto:grigorevma@susu.ru)

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д212.298.05,  
доктор технических наук, профессор

 М.А. Григорьев

**Актуальность работы.** Обеспечение надежного электроснабжения отдаленных и труднодоступных районов любой страны является серьезной технической задачей. Для Республики Таджикистан это более чем актуально, поскольку на ее территории проживает значительная часть населения, которой недоступно централизованное электроснабжение и резервные источники энергии. Вместе с тем, данные территории обладают огромным запасом природных возобновляемых энергетических ресурсов и использование только энергетического потенциала солнечной энергетики является более экономичным и реалистичным по сравнению с другими видами энергии. Солнечная энергетика в современном мире приобретает все большую популярность и становится ключевым видом по сравнению с другими видами зеленой энергетики для получения электрической и тепловой энергии. Рассматриваемые в работе районы республики отличаются высокой температурой окружающей среды в летний период, которая является серьезной проблемой для эффективного использования солнечной радиации при получении электрической энергии. Повышенная температура уменьшает выработку электрической энергии солнечными модулями, приводит к их преждевременной деградации и выходу из строя. Применительно к условиям Таджикистана актуальность работы заключается в оценке потенциала солнечной энергии с целью создания энергокомплекса на базе ВИЭ, обеспечивающего надежность и бесперебойность электроснабжения отдаленных объектов и качественную и эффективную работу солнечных электростанций в условиях жаркого климата республики с использованием устройств термозащиты модулей от перегрева.

**Степень научной разработанности вопроса.** Значительный вклад в развитие методов защиты солнечных модулей от перегрева для повышения их энергетической эффективности внесли такие зарубежные ученые как M. Victoria Collados, Sanjeev Jakhar, Ying Du, J. Siecker, Linus Idoko, Catalin George Popovici, Manuel Lämmle, Adam M. Palumbo, Henrik Zsiboracs, Zeyad A. Haidar, Zainul Abidin Jaffery, B.J. Huang, Diego Vittorini, Claudio Del Pero, Swapnil Dubey, и др. Плодотворно трудились в этой области ученые из России и стран бывшего Советского Союза: Д.С. Стребков, П.П. Безруких, В.И. Виссарионов, М.Г. Тягунов, В.В. Елистратов, И.М. Кирпичникова, В.М. Андреев, В.В. Русакова А.С. Литвиненко, Л.А. Назаренко, Б.Т. Шахзода, Зайнутдинов Р.А., В.Н. Гульков, И.Д. Колесниченко, К.Е. Коротков, А.Я. Джумаев, и др. Однако несмотря на множество исследований по данным вопросам, в них не уделено серьезного внимания повышению эффективности работы и защите солнечных модулей от перегрева в странах с жарким климатом.

Предложенные в работах методы являются эффективными, но, как правило, конструктивно сложными и дорогими. В связи с этим, данная диссертационная работа посвящена исследованию, и анализу методов снижения перегрева поверхности солнечных модулей и разработке на этой основе недорогой и надежной технологии термозащиты для повышения генерации электроэнергии.

**Целью данной работы** является разработка энергокомплекса на базе солнечной энергии для труднодоступных районов Республики Таджикистан с

использованием термозащиты солнечных модулей от перегрева и повышения их эффективности при выработке электроэнергии в условиях высоких температур окружающей среды.

**Основные задачи, решаемые в работе:**

1. Анализ современного состояния энергетики Республики Таджикистан.
2. Определение энергетического потенциала и разработка карты солнечной энергетики Республики Таджикистан.
3. Анализа влияния высоких температур на энергетические характеристики и эффективность работы солнечных модулей.
4. Экспериментальные исследования энергетических характеристик солнечных модулей с использованием призматических концентраторов солнечной энергии.
5. Разработка математической модели термозащиты солнечных модулей.
6. Обоснование и выбор основного электрооборудования солнечной электростанции для труднодоступных районов Республики Таджикистан с учётом разработанного термозащитного концентратора солнечной энергии.

**Объектом исследования** диссертационной работы являются энергетические характеристики солнечного модуля с использованием термозащитной голографической пленки на основе призмаконов – концентраторов солнечной энергии.

**Предметом исследования** является влияние термозащитной голографической пленки на температуру нагрева солнечных модулей и их энергетическую эффективность.

**Методы и средства исследования.** Для решения поставленных задач в работе использовано математическое моделирование процесса генерации электроэнергии солнечными модулями. Разработанная термозащита апробирована в процессе экспериментальных исследований работы солнечных модулей. Задачи диссертационной работы решались с применением компьютерного моделирования в программном пакете MATLAB/Simulink, PVsyst, экспериментальные исследования проводились с использованием лабораторного оборудования и в реальных условиях местности в Таджикистане.

**Достоверность результатов** научных положений, результатов и выводов обосновываются корректностью постановки задач, применением математического аппарата, методик экспериментов и подтверждением адекватности математического моделирования, выполненного в программных пакетах MATLAB/Simulink результатам лабораторных и натурных исследований.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты расчета валового, технического и экономического потенциала солнечной энергии Республики Таджикистан.
2. Карта солнечного потенциала территории Республики Таджикистан.
3. Методика расчета энергетических характеристик солнечных модулей при повышенных температурах их эксплуатации.

4. Результаты лабораторных и натурных испытаний солнечных модулей с использованием голографической термозащитной пленки.

5. Структура термозащитной пленки на основе призматических концентраторов солнечной энергии.

6. Результаты моделирования и выбора основного энергетического оборудования солнечной электростанции для удаленных районов Республики Таджикистан.

#### **Научная новизна**

1. Впервые получены карты солнечного потенциала Республики Таджикистан.

2. Разработана методика расчета энергетических характеристик солнечных модулей при их эксплуатации в жарком климате.

3. Впервые предложено использование недорогой и надежной термозащиты на основе призматических концентраторов для повышения эффективности работы солнечных модулей.

4. С использованием программного пакета PVsyst впервые смоделирована эффективная автономная фотоэлектрическая система для одного из труднодоступных районов Таджикистана, с внедрением эффективной термозащиты солнечных модулей.

#### **Практическая значимость**

1. Данные расчета валового, технического и экономического потенциала солнечной энергии Республики Таджикистан могут быть использованы энергетическими организациями для определения целесообразности строительства солнечных энергоустановок в различных районах Республики Таджикистан.

2. Карта солнечного потенциала Республики Таджикистан позволяет оценить перспективы выработки электроэнергии в конкретном районе республики.

3. Разработанная методика определения энергетических характеристик солнечных модулей может быть использована проектными и эксплуатирующими организациями при выборе солнечных модулей и определении эффективности их работы в условиях повышенных температур.

4. Использование термозащиты на основе призматических концентраторов солнечной энергии на солнечных электростанциях позволит снизить процент деградации солнечных модулей из-за их перегрева и повысить энергетическую эффективность электростанций.

#### **Реализация результатов работы**

1. Разработанная методика расчета энергетических характеристик солнечных модулей при их эксплуатации в условиях повышенных температур воздуха и другие исследования внедрены в учебный процесс на кафедре «Электрические станции» Института энергетики Таджикистана и на кафедре «Электрические станции, сети и системы электроснабжения» Южно-Уральского государственного университета (национального исследовательского университета).

2. Разработанная термозащита в виде призмаконов на основе голографической пленки, обеспечивающая концентрацию солнечных лучей видимой

части электромагнитного спектра для повышения генерации электрической энергии, и другие результаты исследования, используются в ОАО «Системаавтоматика», г. Душанбе (организация занимается строительством солнечных станций на территории Республики Таджикистан).

3. Научные данные по разработанной схеме генерации автономной солнечной электростанции с выбором необходимого электрооборудования в программном пакете PVsyst, используются в ОАО «Душанбинские городские электрические сети» для создания солнечной электростанции с целью обеспечения электроэнергией собственных нужд предприятия и экономии электроэнергии в условиях осенне-зимнего периода.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных научно-технических конференциях: Международная научно-техническая конференция студентов, аспирантов, ученых «Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере», г. Челябинск, май 2017; Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной памяти профессора Данилова Н.И. (1945–2015) «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», г. Екатеринбург, 11-15 декабря 2017 г; X научная конференция аспирантов и докторантов ЮУрГУ, «Секция технических наук» г. Челябинск, 06-07 февраля 2018 г; 70-я научная конференция профессорско-преподавательского состава ЮУрГУ, «Секция технических наук», г. Челябинск, 25 апреля 2018 г; «IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), г. Магнитогорск, 4-5 октября 2019 г; «International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS) и др.

**Соответствие научной специальности.** Исследование, проводимое в рамках диссертационной работы, полностью соответствуют формуле п. 1, 2, 4, области исследований, приведенной в паспорте специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы».

**Публикации по теме диссертационной работы.** По результатам выполненных исследований по теме диссертации опубликовано **18** печатных работ, в том числе **5** в изданиях, рекомендованных **ВАК РФ**, **7** в сборниках докладов и трудах российских и международных конференций **РИНЦ**, **5** статей в материалах конференций **IEEE**, входящих в международные системы цитирования **SCOPUS**, **1** патент РФ на полезную модель.

**Личный вклад автора** заключается в:

– постановке цели, конкретных задач и методов исследования по повышению эффективности выработки электроэнергии солнечными модулями и их защиты от перегрева в условиях повышенных температур Республики Таджикистан;

– разработке методики оценки потенциала солнечной энергии Таджикистана;

– разработке устройств термозащиты солнечных модулей и экономической оценке его эффективности на СЭС;

– моделировании и анализе эффективности автономной системы электроснабжения с применением компьютерной программы PVsyst для труднодоступных районов республики.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка литературы из 197 наименований (отечественных и зарубежных авторов) и 7 приложений. Общий объем диссертации составляет 209 страниц, в том числе 171 страница основного текста, включающего в себя 70 рисунков, 29 таблиц и 38 страниц приложений.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, степень разработанности вопроса, сформулирована цель и задачи исследования, идея работы, отражена научная новизна и практическая ценность результатов исследования, методы и средства исследования, достоверность результатов, полученных в работе, представлены основные научные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Состояние вопроса и задачи исследований»** на основе изучения научно-технических и литературных источников проанализировано современное состояние энергетики Республики Таджикистан. Исследован энергетический потенциал возобновляемых источников энергии (ВИЭ) республики. Исследование энергетического потенциала ВИЭ показало, что наиболее эффективной для электроснабжения отдалённых объектов является солнечная энергия, потенциал которой оценивается выше, чем других видов энергии. Показано, что для труднодоступных (горных) и отдалённых децентрализованных районов республики существует серьёзная проблема с надёжным электроснабжением. Исходя из этого, для одного из таких районов произведён расчёт валового, технического и экономического потенциала солнечной энергии с целью определения целесообразности строительства там солнечных электростанций с учетом особенностей и существующих проблем использования солнечной энергии.

На основании природно-климатических условий и существующей энергетической ситуации местности установлено, что серьёзным препятствием для широкомасштабного использования солнечной энергии является высокая температура окружающей среды, которая в летний период достигает от +35 до +48 °С.

На основе проведённого обзора и анализа современного состояния энергетики и потенциала ВИЭ Республики Таджикистан были сделаны следующие выводы:

1. Удалённые и труднодоступные районы республики в настоящее время не имеют централизованного электроснабжения и нуждаются в качественной и бесперебойной поставке электроэнергии.

2. Наиболее перспективным и целесообразным энергоресурсом для таких районов является солнечная энергия, имеющая среднегодовой энергетический потенциал 7500-8000 МДж/м<sup>2</sup>/год.

**Во второй главе «Создание карты солнечного энергетического потенциала Республики Таджикистан»** на основе анализа существующих методик создания карт солнечного потенциала, для оценки и создания аналогичной карты Таджикистана предложена методика многокритериального подхода принятия решений и аналитическая иерархия процесса (АИП).

Для оценки потенциала солнечной энергии, поступающей на всю поверхность территории республики, использовались климато-географические и метеорологические данные о среднемноголетних, среднемесячных и часовых данных солнечной радиации с баз данных NASA и Meteoporm.

Для оценки солнечного потенциала в реальном времени в ходе исследования были использованы данные POWER (Prediction of Worldwide Energy Resources), Global Solar Atlas всемирного банка. На основе этих данных были проведены исследования и обосновано использование солнечной энергии с целью бесперебойного энергоснабжения отдаленных и горных местностей Таджикистана.

**Определение критериев выбора.** Для определения оптимальной площади установки солнечной электростанции вся территория Таджикистана была классифицирована по критериям, которые позволяют характеризовать и количественно оценить альтернативы в процессе принятия решений. С учетом двух уровней критериев и точных альтернатив определялась пригодность территории для строительства солнечных электростанций (рис.1).



Рисунок 1 – Критерии и альтернативы принятия решения для выбора оптимальной площади строительства солнечной электростанции

**Описание генерации солнечной энергии.** Методы расчета солнечной энергии в целом классифицированы в соответствии с оценками теоретического, технического и экономического потенциала. Теоретический потенциал был определен с использованием инструментов ГИС и метода АИП как общая годовая солнечная инсоляция в области, пригодной для установки крупной



солнечной электростанции (за пределами застроенной территории). В этом случае предлагаемая площадь для установки фотоэлектрической электростанции оценивается солнечными лучами ГГО - глобального горизонтального облучения (GHI) и ДГО - диффузного горизонтального излучения (DNI).

**Результаты исследования.** Обработка комбинации инструментов ГИС и АИП, позволила определить подходящее место для расположения солнечных электростанций. Индекс пригодности места рассчитывался на основе матрицы парного сравнения, полученной методом АИП и определения весовых коэффициентов и альтернатив для оценки наиболее целесообразного места для выработки электрической энергии с помощью фотоэлектрических систем и систем CSP.

В результате окончательного сравнения солнечных и фотоэлектрических карт, по данным излучения GHI и DNI, была получена карта потенциала солнечной фотоэлектрической мощности Республики Таджикистан. Кроме того, получены карты глобального солнечного излучения для оптимального угла наклона солнечных модулей; нормального прямого солнечного излучения; диффузного горизонтального излучения; температур в солнечную погоду (2 м над уровнем земли); солнечного оптимального наклона фотоэлектрических модулей для максимальной выработки электроэнергии. Данные этих карт были использованы при выборе электрооборудования солнечной электростанции.

**В третьей главе «Разработка методики расчета энергетических характеристик солнечных модулей при повышенных температурах эксплуатации»** теоретически и экспериментально исследовано снижение эффективности работы солнечных модулей при перегреве их поверхности. Выявлено, что процесс генерирования электроэнергии фотоэлектрических модулей во многом зависит от баланса тепла, определяемого количеством, вырабатываемым модулем и теплом, уходящим в окружающую среду.

При дисбалансе тепла наступает перегрев поверхности солнечного модуля, что приводит к снижению эффективности его работы и сокращению срока службы в результате его деградации. Перегрев солнечного элемента вызывает уменьшение ширины запрещенной зоны кремниевого материала, ток насыщения будет увеличиваться, т.к., для образования электронно-дырочных пар требуется меньше энергии.

При этом наблюдается незначительное увеличение тока короткого замыкания, а напряжение холостого хода уменьшается, что ведет к снижению выходной мощности.

Оценить влияние температуры окружающей среды на работу СМ можно по температурному коэффициенту мощности (ТКМ), который показывает, на сколько процентов снизится мощность модуля при повышении температуры на каждый градус относительно ее стандартного значения, равного 25 °С. В диссертационной работе были проведены расчеты энергетических характеристик фотоэлектрического модуля типа Delta SM 100-24M производства Delta battery.

Результаты расчета вольтамперных и мощностных характеристик солнечного модуля при температуре окружающей среды 35, 45 и 55 градусов представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчетные данные для построения энергетических характеристик солнечного модуля

№	$T_{о.с.}, ^\circ\text{C}$	$T_{сэ}, ^\circ\text{C}$	$U_{х.х.}, \text{В}$	$P_P, \text{Вт}$
1	35	58	19,99	70,18
2	45	68	18,2	63,9
3	55	78	15,94	55,79

Данные таблицы подтвердили, что повышение температуры негативно сказывается на выходной мощности солнечного модуля и может снизить ее значение до 50 % и более. ВАХ и мощностные характеристики солнечного модуля при стандартной температуре ( $25^\circ\text{C}$ ) и повышенных температурах показаны на рис. 2. Таким образом, характеристики солнечных модулей от завода-изготовителя отличаются от характеристик в реальных условиях эксплуатации.

Для того, чтобы эта разница была минимальной, а работа солнечного модуля была эффективной вблизи точки максимальной мощности, было предложено предусмотреть термозащиту поверхности модулей от перегрева с использованием голографической пленки, которая имеет хорошие эксплуатационные характеристики и защищает модуль не только от перегрева, но и от механических повреждений.

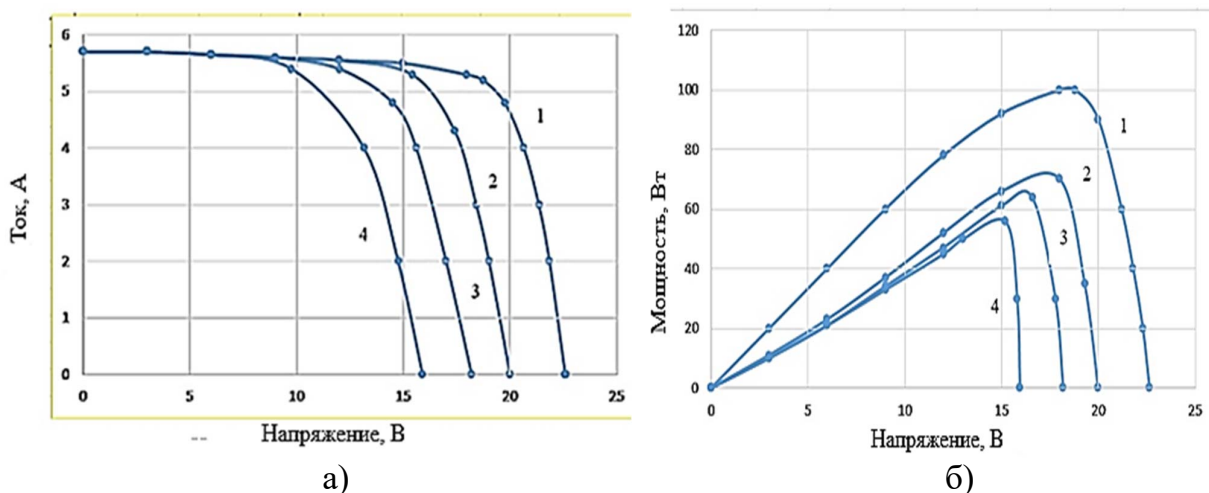


Рисунок 2 – Вольтамперные (а) и мощностные (б) характеристики солнечного модуля при различных температурах окружающей среды: 1 – ( $25^\circ\text{C}$ ); 2 – ( $35^\circ\text{C}$ ); 3 – ( $45^\circ\text{C}$ ); 4 – ( $55^\circ\text{C}$ )

Структурная схема определения энергетических характеристик с термозащитой в условиях эксплуатации выглядит следующим образом (рис. 3).

В данной схеме построения энергетических характеристик термозащита модуля представлена блоком ТЗМ. Она является дополнительным параметром,

влияющим на температуру солнечного элемента, и ее применение определяется как производителем, так и потребителем в зависимости от условий окружающей среды. Предлагаемое устройство термозащиты снижает температуру поверхности СМ за счет отражения инфракрасной составляющей солнечного спектра.

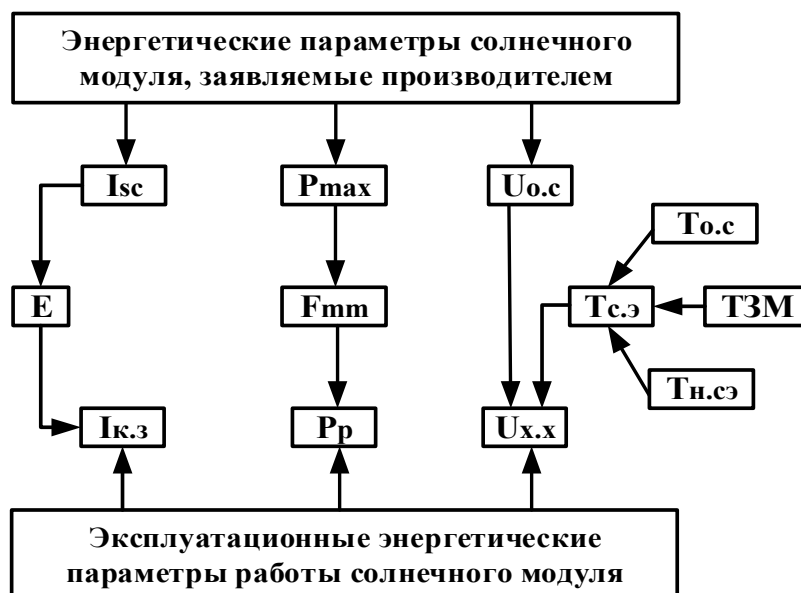


Рисунок 3 – Структурная схема определения энергетических параметров солнечного модуля

Для подтверждения теоретических предпосылок о целесообразности использования термозащитной пленки были проведены исследования эффективности работы солнечных модулей в лаборатории и в условиях реальной эксплуатации.

**В четвертой главе «Разработка термозащиты солнечных модулей от перегрева»** были рассмотрены и проанализированы существующие методы и технологии защиты солнечных модулей от перегрева. На основании анализа предложено в условиях повышенных температур использовать голографическую пленку, обладающую специальным слоем, отражающим инфракрасные лучи солнечного спектра. Натурные испытания предложенного метода термозащиты проводились в 2019 году в южной части Республики Таджикистан, г. Курган-Тюбе, в самое жаркое летнее время года (июль), 3 дня подряд, в период с 8 часов утра до 18 часов вечера. Результаты эксперимента показали, что использование термозащитной голографической пленки снижает температуру нагрева поверхности солнечного модуля в среднем на 3-4 градуса, при этом выработка увеличивается на 1,5-2%. По результатам натурного эксперимента были построены зависимости температуры нагрева передней поверхности фотоэлектрических модулей с пленкой и без нее от температуры окружающей среды в течение дня. На рис. 4 представлены результаты измерений температуры солнечного модуля без голографической пленки и с ней для различных значений температуры окружающей среды.

Результаты эксперимента послужили основой для разработки математических моделей зависимости температуры модуля от температуры окружающей

среды для обоих случаев. Разработанные модели были получены с помощью регрессионного анализа методом наименьших квадратов в программе Microsoft Excel. Полученные уравнения регрессии показаны на этом же рисунке.

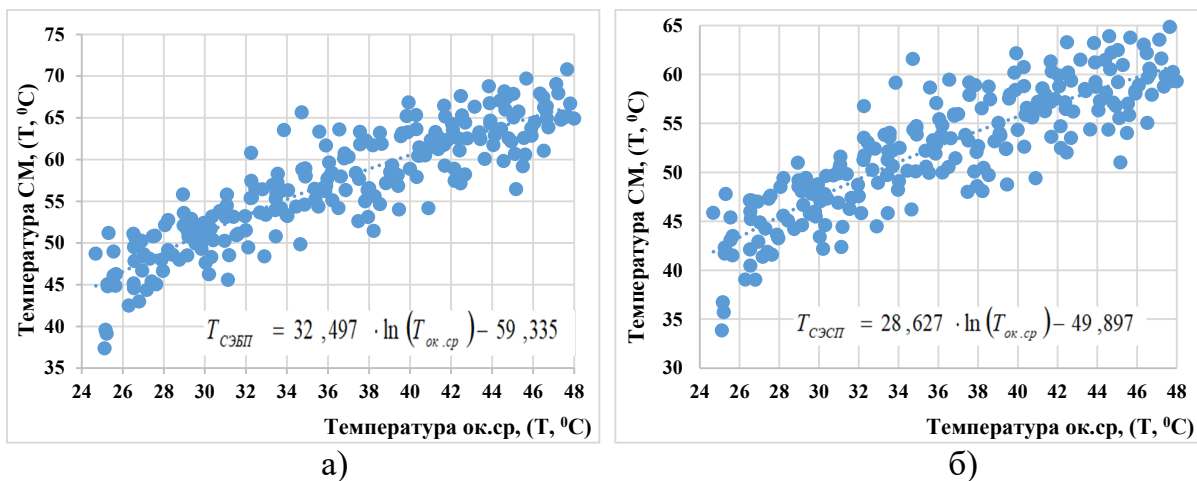


Рисунок 4 – Зависимость температуры нагрева поверхности модулей от температуры окружающей среды: а) без плёнки, б) с плёнкой

Далее, по экспериментальным данным была разработана регрессионная модель термозащиты с использованием голографической плёнки. Модель представляет собой уравнение регрессии, полученное методом наименьших квадратов по измеренным значениям разницы температур для различных температур окружающей среды. Графическое представление разницы температур в зависимости от температуры окружающей среды и уравнение регрессии показаны на рисунке 5. Полученное уравнение регрессии является математической моделью термозащиты с использованием голографической плёнки. Эта модель была использована для последующего анализа солнечной электростанции в среде Simulink.

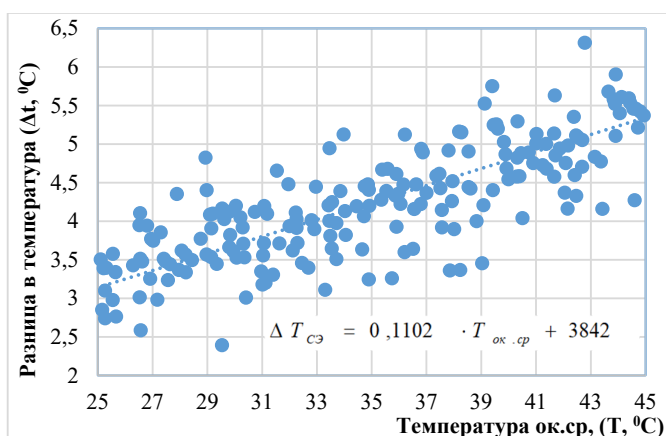


Рисунок 5 – Регрессионная модель разницы температур солнечных модулей с плёнкой и без неё

Для повышения эффективности преобразования солнечных лучей в электроэнергию было предложено голографический рисунок пленки сделать в виде объемных призмаконов – концентраторов солнечных лучей видимого диапазона спектра. Призмаконы имеют равносторонние грани, соединенные между собой по сторонам оснований. Для реализации эффекта концентрации

необходимо, чтобы луч света, пройдя через одну (воспринимающую) грань призмакона, не выходил наружу за отражающую грань, а концентрировался на выходной грани. При этом угол при вершине призмы (угол полного внутреннего отражения) должен быть не меньше 17,1 или 28,4 градусов в зависимости от используемого материала пленки, т.е., коэффициента преломления  $n$ .

Были рассчитаны коэффициенты концентрации при указанных геометрических параметрах, зависимость которых от угла падения солнечных лучей показала, что максимальное значение степени концентрации будет при угле  $10 \geq \beta \geq -10$ . При этом степень концентрации солнечных лучей дает увеличение солнечного потока в 3-3,5 раза. (рис. 6).

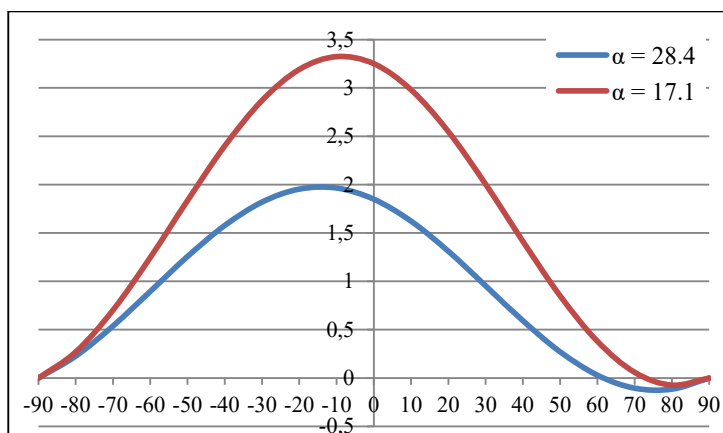


Рисунок 6 – Зависимость степени концентрации лучей в призмаконе от угла падения лучей

Далее в работе была построена математическая модель процесса генерирования электроэнергии солнечными модулями с использованием разработанных призматических концентраторов солнечных лучей на основе голографической плёнки с помощью программного пакета MATLAB/Simulink.

Исходные данные для моделирования: значение солнечной радиации, равное стандартной =  $1000 \text{ Вт/м}^2$ ; сопротивление нагрузки принималось переменным во времени; внутреннее сопротивление =  $0,5 \text{ Ом}$ ; стандартная температура =  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; температура поверхности солнечного модуля =  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Были созданы модели с термозащитной пленкой и без нее.

**Модель солнечной установки без термозащитной пленкой.** Как показано на рис. 7, блок «Регрессионная модель» в зависимости от температуры окружающей среды определяет температуру солнечного элемента, то есть при  $T_{\text{ок.ср}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  температура СЭ составляет  $45,27 \text{ }^\circ\text{C}$ , при таких условиях потери электроэнергии, генерируемые теплом в солнечном модуле, невелики. Но при увеличении температуры в течение дня, эффективность солнечного элемента снижается за счет нагрева поверхности модуля.

**Модель солнечной установки с термозащитной пленкой.** Эта же модель была использована при имитационном моделировании солнечной электростанции с использованием ТЗМ. Ее влияние на солнечную электростанцию было проанализировано с точки зрения увеличения концентрации излучения и уменьшения влияния температуры. Благодаря термозащитному блоку при

температуре воздуха  $25^{\circ}\text{C}$  температура солнечного модуля составляет  $42,25^{\circ}\text{C}$ , а при температуре воздуха в  $45^{\circ}\text{C}$  температура СМ составляла  $59,08^{\circ}\text{C}$ . , т.е. уменьшилась на  $3,02^{\circ}\text{C}$ .

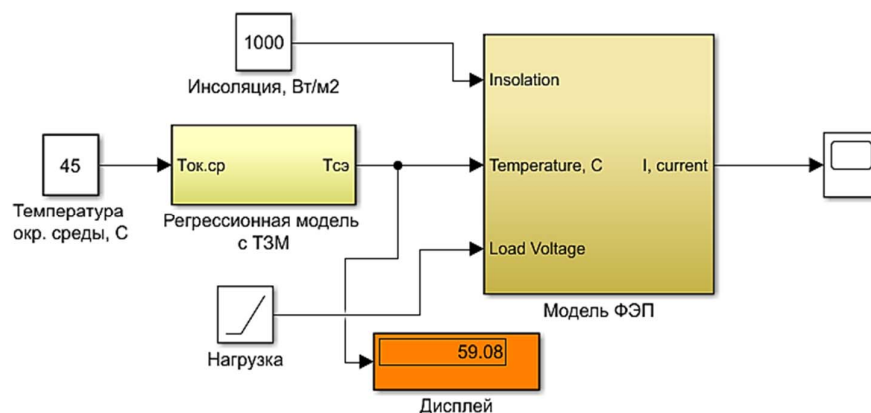


Рисунок 7 – Модель солнечной установки с учетом термозащитной пленки

Полученные результаты моделирования подтвердили целесообразность использования голографических пленок со специальными концентрирующими элементами для защиты солнечных модулей от перегрева и повышения эффекта преобразования солнечного излучения в электроэнергию.

**Экономическое обоснование.** Для обоснования эффективности разработанной термозащиты был проведен экономический расчет для солнечной электростанции, имеющей 48 модулей, размером  $1,94\text{ м}^2$  каждый. Для таких параметров модулей потребуется около  $96\text{ м}^2$  пленки. Стоимость пленки составляет от 380 до 700 рублей за квадратный метр, тогда для всех модулей солнечной электростанции для обеспечения термозащиты необходимы затраты порядка 68 тыс. рублей. В табл. 2 приведены результаты расчета экономической составляющей использования разработанной термозащитной пленки на солнечной электростанции в условиях Республики Таджикистан.

Таблица 2 – Результаты расчета экономической эффективности использования термозащитной пленки на солнечных электростанциях

№	Показатель	Без пленки		С пленкой	
		1 CM	48 CM	1 CM	48 CM
1	Производство электрической энергии при температуре на поверхности модуля $45^{\circ}\text{C}$ , кВт·ч/день	1,8	86,4	2,0	96,0
2	С учетом концентрации солнечных лучей пленкой = 3,54	—	—	2,15	103,5
3	Производство энергии в среднем, кВт·ч/год	657,0	31536,0	784,75	37777,5
4	Стоимость произведенной электроэнергии при себестоимости производства 1,12 руб/кВт·ч электроэнергии	735,84	35320,32	878,92	42310,8

Таким образом, использование разработанной голографической пленки с функциями термозащиты для солнечной электростанции, состоящей из 48 модулей, позволяет получить дополнительно около 7 МВт·ч электроэнергии в год, что показывает экономическую целесообразность внедрения устройств термозащиты для работы солнечных электростанций в условиях жаркого климата Республики Таджикистан. Немаловажным эффектом будет снижение деградации солнечных модулей и, следовательно, увеличение их срока службы при эксплуатации.

**В пятой главе «Выбор электрооборудования автономной системы с использованием программы PVsyst»** рассматриваются этапы моделирования автономной солнечной электростанции для электроснабжения объектов одного из труднодоступных и неэлектрифицированных районов Республики Таджикистан с использованием программного пакета PVsyst для анализа и моделирования фотоэлектрических систем. Для оценки производительности фотоэлектрических систем учитывалось географическое положение, ориентация солнечных модулей, монтажная структура, климатические условия. Используя функции программы, на основе суточного графика нагрузки, выбрано основное электрооборудование солнечной электростанции: контроллер, фотоэлектрический модуль, аккумуляторные батареи, резервный источник питания.

Для рассматриваемой территории Таджикистана выбрано географическое положение села Рогич, как труднодоступной горной местности Пенджикентского района. Для данного района настроена ориентация модулей и выбран оптимальный угол наклона ( $45^{\circ}$ ) для максимальной выработки электроэнергии автономной системой, определен график суточной нагрузки (рис. 8), среднее значение которой составило 10483 кВт·ч/сут.

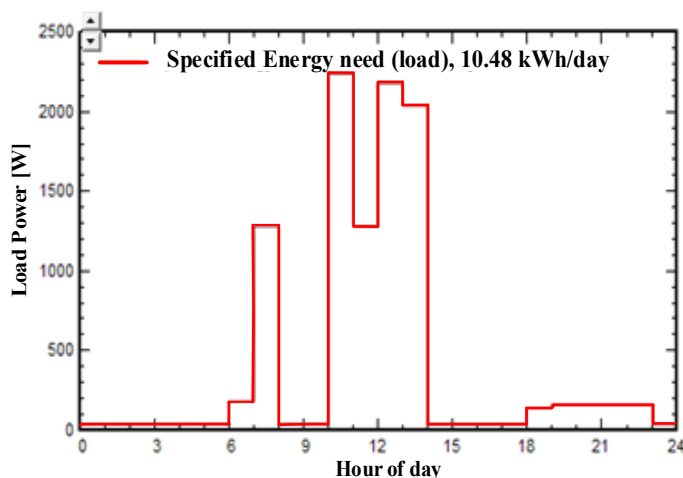


Рисунок 8 – Суточный график нагрузки потребителей

**Выбор параметров электрооборудования и настройка системы.** Для выполнения конфигурации системы все компоненты были выбраны исходя из потребности в энергии, необходимой для потребителя и потенциальных метеорологических данных на месте установки. Аккумуляторные батареи выбирались программой PVsyst исходя из нагрузки потребителей и других факторов. В нашем случае выбрано 19 штук литий-ионных (Li-ion) аккумуляторов универсального регулируемого типа.

Для генерации электрической энергии была выбрана СМ поликристаллического типа Generic, (Poly 285 Wp 72 ячеек) в количестве 48 штук, угол наклона массива PV в этом исследовании составляет  $45^{\circ}$ . Чтобы определить основные энергетические параметры фотоэлектрического модуля и массива, были использованы вольт-амперные характеристики (ВАХ) модуля от производителя (рис.9, а,б) и (рис. 10, а,б). Как видно, ток короткого замыкания практически не зависит от температуры, а напряжение холостого хода, которым определяется выходная мощность, зависит от нее значительно.

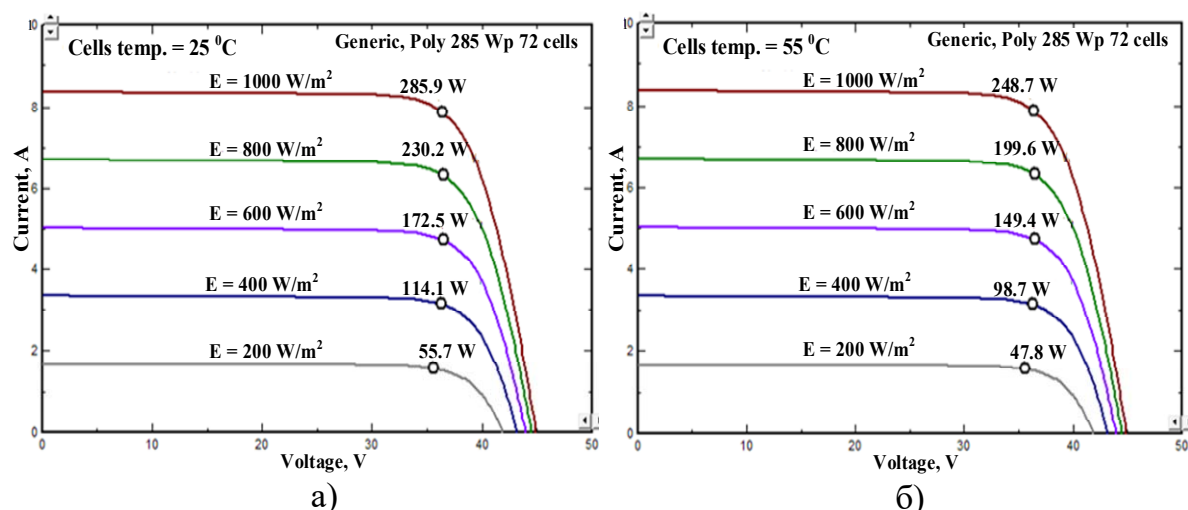


Рисунок 9 – Вольт-амперные характеристики солнечного модуля при температуре: а) 25 °С и б) 55 °С

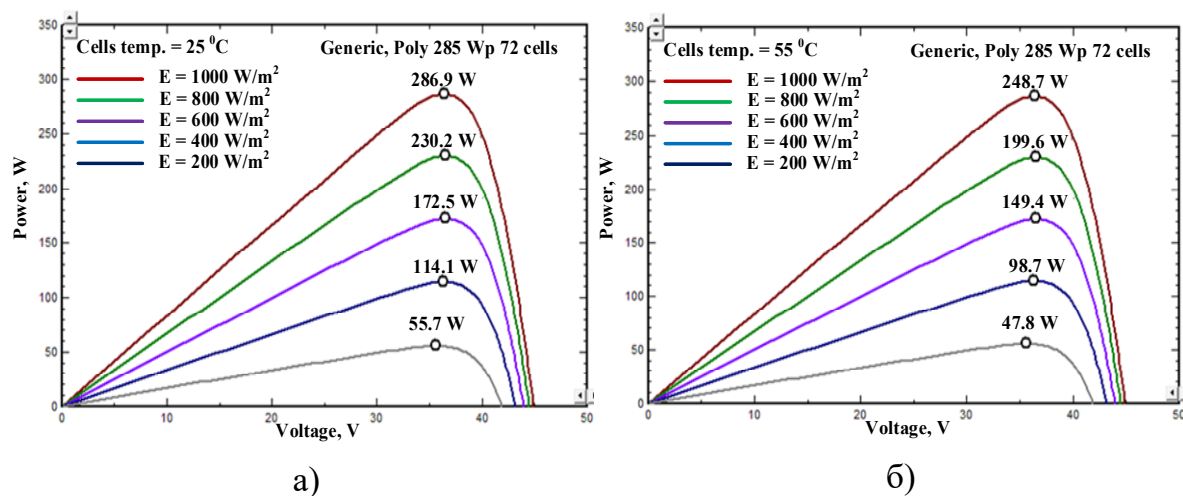


Рисунок 10 – Мощностные характеристики солнечного модуля при температуре: а) 25 °С и б) 55 °С

**Основные результаты анализа производительности.** Коэффициент производительности (рис. 11), который показывает соотношение между фактическим выходом (выход с инвертора) и целевым выходом (выход с массива PV), по результатам моделирования составил 13,57 %. Нормализованные производственные потери, такие как потери при сборе, системные потери и произведенная полезная энергия на установленный кВт в день, были оценены в



ходе имитационного исследования. Установлено, что автономная система максимально вырабатывает 13,68 кВт·ч/день (рис. 12).

Избыточная энергия при полностью заряженной батарее аккумуляторов составляет 3,24 кВт·ч/день, электрические потери фотоэлектрического массива 1,28 кВт·ч/день, системные потери и зарядка аккумулятора 0,09 кВт·ч/день, энергия, поставляемая пользователю 0,72 кВт·ч/день.

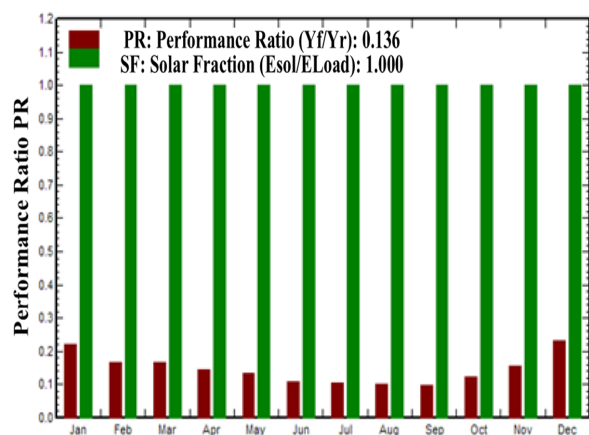


Рисунок 11 – Коэффициент производительности и солнечная доля

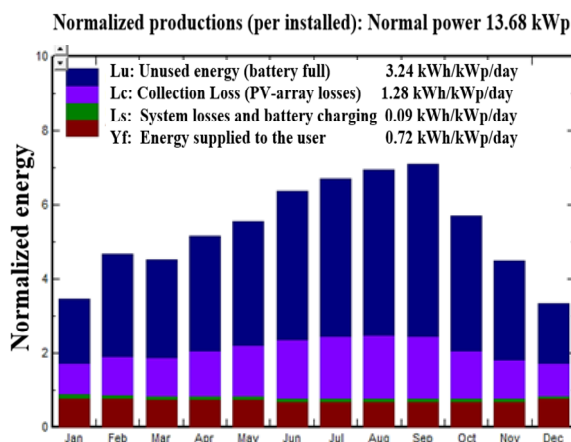


Рисунок 12 – Нормализованная выработка электроэнергии

Номинальная выработка электроэнергии блока при стандартных условиях эксплуатации (STC) составляет 24180 кВт·ч., КПД массива фотоэлектрических модулей на STC составляет 14,8 %, эффективная энергия на выходе массива 4071 кВт·ч. По результатам моделирования установлено, что самый высокий уровень солнечной радиации в городе Пенджикенте наблюдается с апреля по июль и его значение варьируется от 150,9 до 239,7 кВт·ч/м<sup>2</sup>.

Установив автономную систему мощностью 13,68 кВт для частных домов со средним ежедневным потреблением 10 кВт·ч/день, можно получить вырабатываемую доступную энергию 20 МВт в год при удельной выработке 1463 кВт·ч/кВт·п/год. Годовая потребляемая энергия составляет 3,6 МВт·ч, неиспользованная энергия – 16,18 МВт·ч, а коэффициент полезного действия системы – 13,57 %. Моделирование показало целесообразность использования программы PVsyst для выбора качественного электрооборудования для солнечной электростанции и определения эффективности ее работы в условиях децентрализованного электроснабжения горных и труднодоступных районов Республики Таджикистан.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам диссертационной работы сделаны следующие выводы:

1. Анализ современного состояния энергетики Таджикистана выявил проблему энергодефицита и ненадежного энергоснабжения отдаленных и труднодоступных (горных) мест республики, где проживает значительная часть населения.

2. Расчет валового, технического и экономического потенциала солнечной энергии, показал, что он является наиболее ресурсным и перспективным

видом энергии для электроснабжения отдалённых и труднодоступных районов республики.

3. Карты солнечного потенциала, построенные на основании метеорологических данных NASA и метода многокритериального подхода, позволяют оценить перспективы выработки электроэнергии в конкретных районах Республики Таджикистан на солнечных электростанциях.

4. Разработанная методика расчета энергетических характеристик солнечных модулей позволяет определить эффективность их работы в условиях повышенных температур и поддерживать энергетические параметры модулей, заявляемые производителем.

5. Основной проблемой, ограничивающей масштабное применение солнечных энергоустановок в странах с жарким климатом, является перегрев поверхности солнечных модулей и снижение генерации электроэнергии. Использование голографической пленки, отражающей инфракрасную составляющую солнечного спектра, позволило снизить температуру поверхности модулей в среднем на 4-5 градусов.

6. Разработанная структура голографического рисунка пленки в виде призмаконов обеспечивает концентрацию солнечных лучей видимой части спектра на поверхности модулей в 3,0-3,5 раза, обеспечивая соответствующее повышение генерации электрической энергии.

7. Моделирование процесса генерирования электроэнергии солнечными модулями с использованием разработанной голографической термозащиты с помощью программы MATLAB подтвердило возможность увеличения выработки электроэнергии за счет концентрации солнечных лучей, снижение деградации модулей в результате их перегрева и увеличение их срока службы при эксплуатации.

8. Применение термозащитной пленки на СЭС из 48 солнечных модулей позволит получить дополнительно около 7 МВт·ч электроэнергии в год, что показывает экономическую целесообразность внедрения устройств термозащиты для работы солнечных электростанций в условиях жаркого климата Республики Таджикистан.

9. Смоделированная с помощью программного пакета PVsyst автономная солнечная электростанция и выбор качественного электрооборудования показали целесообразность размещения ее в труднодоступных районах Республики Таджикистан и обеспечения надежного электроснабжения потребителей.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

**Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях ВАК и Scopus:**

1. Кирпичникова И.М. Исследование температуры поверхности солнечных модулей с использованием голографической защиты от перегрева / И.М. Кирпичникова, **И.Б. Махсумов** // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2019. – Т. 15. – № 4. – С. 19–29.

2. Кирпичникова И.М. Методика оценки потенциала солнечной энергетики в республике Таджикистан / И.М. Кирпичникова, **И.Б. Махсумов**, Ю Ну-роллахи // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2020. – № 3. С. 25–34.

3. Кирпичникова И.М. Повышение энергетической эффективности работы солнечных модулей за счет снижения температуры поверхности / И.М. Кирпичникова, **И.Б. Махсумов** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 2. С. 489–499.

4. Кирпичникова И.М. Построение энергетических характеристик солнечных модулей с учетом условий окружающей среды / И.М. Кирпичникова, **И.Б. Махсумов** // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2020. – № 34. С. 56–74.

5. Кирпичникова И.М. Выбор электрооборудования автономной фотоэлектрической системы с использованием программного обеспечения PVsyst / И.М. Кирпичникова, **И.Б. Махсумов** // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 77–88.

6. Kirpichnikova I.M. Investigation of Surface Temperature of Solar Modules Using Holographic Overheating Protection / I.M. Kirpichnikova, **I.B. Makhsumov** // IEEE Russian Workshop on Power Engineering and Automation of Metallurgy Industry: Research & Practice (PEAMI), Magnitogorsk, Russian Federation, 2019, pp. 80–84. DOI: [10.1109 / PEAMI.2019.8915414](https://doi.org/10.1109/PEAMI.2019.8915414)

7. Kirpichnikova I.M. Calculation of gross, technical and economic potential of solar energy of the Republic of Tajikistan / I.M. Kirpichnikova, **I.B. Makhsumov** // International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russian Federation, 2019, pp. 1–6. DOI: [10.1109 / ICOECS46375.2019.8949954](https://doi.org/10.1109/ICOECS46375.2019.8949954)

8. Kirpichnikova I. Study of the Operation of Solar Modules Using Holographic Thermal Protection / I.M. Kirpichnikova, **I. Makhsumov**, M. Zhenis, I. Abdulloev, H. Boboev, P. Shonazarov // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2019). E3S Web of Conferences, St. Petersburg, Russian Federation, 2019, vol. 140. pp. 1–5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914011010>

9. Kirpichnikova I.M. The influence of ambient temperature on the energy characteristics of solar modules / I.M. Kirpichnikova, **I.B. Makhsumov** // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, Russian Federation, 2020, pp. 1–5. DOI: [10.1109 / ICIEAM48468.2020.9112064](https://doi.org/10.1109/ICIEAM48468.2020.9112064)

и др. – всего 17 статей.

#### **Патенты:**

18. Патент на полезную модель «Голографическая пленка на основе призмаконов» РФ, 2020 г., № 2020132145/28(058388), РФ. / И.М. Кирпичникова, **И.Б. Махсумов**, Е.А. Сироткин.

МАХСУМОВ Илхом Бурхонович

РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОКОМПЛЕКСА НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ  
ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ  
ТРУДНОДОСТУПНЫХ РАЙОНОВ РЕСПУБЛИКИ ТАДЖИКИСТАН  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕРМОЗАЩИТЫ СОЛНЕЧНЫХ МОДУЛЕЙ

Специальность 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Издательский центр Южно-Уральского государственного университета

---

Подписано в печать \_\_. \_\_. 2021. Формат 60×84 1/16. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ \_\_\_\_\_

---

Отпечатано в типографии Издательского центра ЮУрГУ.  
454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.