

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию
(наименование вида работы)
Сулейменова Зарема Маратовна
(Ф.И.О. обучающегося)

7М07113 – Электроэнергетика и энергетика
(шифр и наименование специальности)

На тему: **Исследование тепловых характеристик солнечных коллекторов с параболическим панелями**

Выполнено:

- а) графическая часть на ____ - ____ листах
б) пояснительная записка на _____ страницах

Магистерская диссертация посвящена исследованию тепловых характеристик солнечных коллекторов с параболическими панелями и является актуальной в контексте развития возобновляемых источников энергии. В работе рассмотрены теоретические основы, геометрические параметры и тепловые процессы, влияющие на эффективность коллекторов. Практическая часть включает расчёты, сравнение с плоскими системами и анализ применения высокотемпературных солнечных печей. Работа выполнена грамотно, с научной обоснованностью и хорошей визуализацией материала.

ЗАМЕЧАНИЯ К РАБОТЕ

- 1) В разделе, посвящённом методам изготовления параболоидных концентраторов, было бы полезно дать более чёткое сравнение между методами по параметрам точности, стоимости и применимости;
- 2) В главе о цифровых системах управления солнечными печами возможно расширить описание применяемого программного обеспечения и алгоритмов слежения

Оценка работы

В целом магистерская работа Сулейменовой З.М. выполнена на актуальную тему и заслуживает оценки «хорошо» (85%), а автор заслуживает присвоения степени магистра по специальности 7М07113 - «Электроэнергетика и энергетика».

Рецензент

PhD, ассистент-профессора,
АЛТ Университет им. М.Тынышпаева
(должность, уч. степень, звание)

_____ Калиев Ж.Ж.

(подпись)

_____ 2025 г.



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сулейменова Зарема Маратовна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование тепловых характеристик солнечных коллекторов с параболическим панелями

Научный руководитель: Асель Жуматова

Коэффициент Подобия 1: 8.7

Коэффициент Подобия 2: 4.9

Микропробелы: 46

Знаки из здругих алфавитов: 25

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование:

2025-06-25

Дата

Заведующий кафедрой Энергетики

Сарсембаев Е.А.



Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Сулейменова Зарема Маратовна

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Исследование тепловых характеристик солнечных коллекторов с параболическим панелями

Научный руководитель: Асель Жуматова

Коэффициент Подобия 1: 8.7

Коэффициент Подобия 2: 4.9

Микропробелы: 46

Знаки из здругих алфавитов: 25

Интервалы: 0

Белые Знаки: 0

После проверки Отчета Подобия было сделано следующее заключение:

☒ Заимствования, выявленные в работе, является законным и не является плагиатом. Уровень подобия не превышает допустимого предела. Таким образом работа независима и принимается.

☐ Заимствование не является плагиатом, но превышено пороговое значение уровня подобия. Таким образом работа возвращается на доработку.

☐ Выявлены заимствования и плагиат или преднамеренные текстовые искажения (манипуляции), как предполагаемые попытки укрытия плагиата, которые делают работу противоречащей требованиям приложения 5 приказа 595 МОН РК, закону об авторских и смежных правах РК, а также кодексу этики и процедурам. Таким образом работа не принимается.

☐ Обоснование: *фактически и законно*

2025-06-25

Дата

Жансерік Жанабай

проверяющий эксперт

М.С.У.

Жуматова А.А.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

Кафедра «Энергетика»

Сулейменова Зарема Маратовна

Исследование тепловых характеристик солнечных коллекторов с параболическим
панелями

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

7М07113 – Электротехника и энергетика

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский
технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А. Буркитбаева

УДК

На правах рукописи

Сулейменова Зарема Маратовна

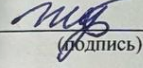
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации: «Исследование тепловых характеристик солнечных коллекторов с
параболическим панелями»

Направление подготовки: 7М07113-«Электротехника и энергетика»

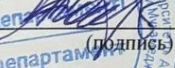
Научный руководитель
канд. тех. наук, ассоц. профессор

 А.А.Жуматова
(подпись)

«__» ____ 2025 г.

Рецензент

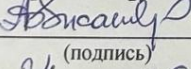
PhD, ассистент профессора,
АЛТ Университет им. М.Тынышпаева

 Калиев Ж.Ж.
(подпись)

«__» ____ 2025 г.

Нормоконтроль

старший преподаватель

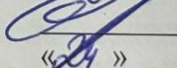
 А.О. Бердибеков
(подпись)

«24» 06 2025 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ
Исститут энергетики
и машиностроения

Заведующей кафедрой,

PhD, ассоц. профессор

 Е.А. Сарсенбаев

«24» 06 2025 г.

Алматы 2025

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Некоммерческое акционерное общество «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева»

Институт энергетики и машиностроения имени А.Буркитбаева

Кафедра Энергетики

7M07113-«Электротехника и энергетика»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой,

PhD, ассистент-профессор

Е. А. Сарсенбаев

«28» 06 2025 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту: Сулейменова Зарема Маратовна

Тема: Исследование тепловых характеристик солнечных коллекторов с параболическим панелями

Утверждена приказом: 1548-О от 04.12.2023 г.

Срок сдачи законченной диссертации: «18» июня 2025 г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

1) Параболические солнечные коллекторы обеспечивают концентрирование солнечной радиации в фокусной зоне, где располагается поглощающий элемент, передающий энергию теплоносителю;

2) Геометрические параметры коллектора (диаметр, длина, фокусное расстояние, угол установки) влияют на его термическую эффективность и должны быть учтены в ходе моделирования.;

3) На тепловую эффективность влияют также уровень солнечной радиации, свойства материалов отражателя и абсорбера, температурные потери и погодные условия.;

а) Разработка теоретической модели солнечного коллектора с параболической панелью, включающей описание физики фокусировки излучения и теплообмена между элементами установки.;

б) Анализ факторов, влияющих на тепловую эффективность коллекторов: геометрия, свойства материалов, климатические условия, режим работы.;

в) Выполнение расчёта тепловых характеристик коллекторов с различными параметрами, включая температурное поле абсорбера и оценку КПД.

Рекомендуемая основная литература:

1 Даффи, Дж. А. Солнечные инженерные системы / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман ; пер. с англ. — 4-е изд. — М. : Вилли, 2013. — 936 с

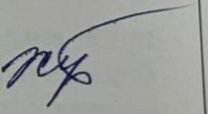
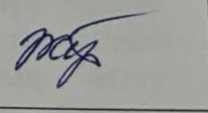
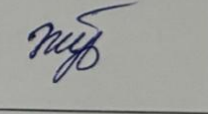
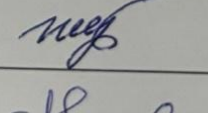
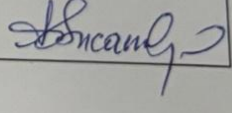
2 Калогиу, С. А. Инженерия солнечной энергии: процессы и системы / С. А. Калогиу ; пер. с англ. — 2-е изд. — М. : Академик Пресс, 2013. — 840 с.

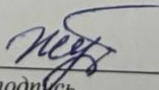
ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

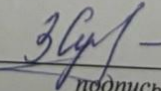
Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Анализ солнечной энергетики и концентрирующих технологий	01.03.2025	нет
Классификация и конструкция солнечных коллекторов	02.05.2025	нет
Обзор параболических концентраторов солнечной энергии	03.06.2025	нет
Методологическая часть	13.06.2025	нет

Подписи

консультантов и норм контролера на законченную магистерскую диссертацию с указанием относящихся к ним разделов диссертации

Наименования разделов	Консультанты, И.О.Ф. (уч. степень, звание)	Дата подписания	Подпись
Анализ солнечной энергетики и концентрирующих технологий	А.А. Жуматова, научный руководитель, канд. тех. наук, ассоц. профессор	12.06.2025	
Классификация и конструкция солнечных коллекторов	А.А. Жуматова, научный руководитель, канд. тех. наук, ассоц. профессор	12.06.2025	
Обзор параболических концентраторов солнечной энергии	А.А. Жуматова, научный руководитель, канд. тех. наук, ассоц. профессор	12.06.2025	
Методологическая часть	А.А. Жуматова	12.06.2025	
Нормо контролер	А.О. Бердибеков, магистр, старший преподаватель	24.06.2025	

Научный руководитель  / А.А. Жуматова /

Задание принял к исполнению обучающийся  / З.М. Сулейменова /

Дата

« 01 » 02 2025 г

АННОТАЦИЯ

Современные условия дефицита традиционных источников энергии и роста потребностей в тепле и электроэнергии требуют широкого внедрения возобновляемых технологий. Солнечная энергия, как наиболее доступный и экологичный ресурс, находит применение в различных теплотехнических установках. Особенно актуальны концентрирующие солнечные системы, способные обеспечить более высокие температуры теплоносителя. Настоящая работа посвящена анализу тепловых характеристик солнечных коллекторов с параболическими отражающими панелями, которые фокусируют излучение на абсорбере, обеспечивая эффективное преобразование энергии. Исследование включает расчёты, моделирование и оценку эффективности системы при различных условиях эксплуатации.

ABSTRACT

The current conditions of shortage of traditional energy sources and the growing demand for heat and electricity require the widespread introduction of renewable technologies. Solar energy, as the most affordable and environmentally friendly resource, finds application in various thermal installations. Concentrating solar systems capable of providing higher temperatures of the coolant are especially relevant. This paper is devoted to the analysis of the thermal characteristics of solar collectors with parabolic reflective panels that focus radiation on the absorber, providing efficient energy conversion. The study includes calculations, modeling, and evaluation of the system's effectiveness under various operating conditions.

АНДАТПА

Дәстүрлі энергия көздерінің тапшылығы мен жылу мен электр энергиясына деген қажеттіліктің өсуінің заманауи шарттары жаңартылатын технологияларды кеңінен енгізуді талап етеді. Күн энергиясы ең қолжетімді және экологиялық таза ресурс ретінде әртүрлі жылу қондырғыларында қолданылады. Салқындатқыштың жоғары температурасын қамтамасыз ете алатын шоғырландыратын күн жүйелері әсіресе өзекті. Бұл жұмыс энергияны тиімді түрлендіруді қамтамасыз ететін абсорберге сәулеленуді бағыттайтын параболалық шағылыстыратын панельдері бар күн коллекторларының жылу сипаттамаларын талдауға арналған. Зерттеу әр түрлі жұмыс жағдайында жүйенің тиімділігін есептеуді, модельдеуді және бағалауды қамтиды.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	8
1	Анализ солнечной энергетики и концентрирующих технологий	10
1.1	Современное состояние солнечной энергетики	10
1.2	Актуальность солнечной энергетики в Республике Казахстан	11
1.3	Классификация солнечных коллекторов	12
1.4	Принцип действия параболических концентраторов	13
1.5	Потенциал практического применения	14
1.6	Обзор существующих технологий	15
2	Классификация и конструкция солнечных коллекторов	16
2.1	Плоские солнечные коллекторы: устройство, принцип действия и эффективность	16
2.1.1	Пример расчёта КПД плоского солнечного коллектора	18
2.2	Гелиоколлекторы с концентраторами: принципы, конструкции и особенности работы	19
2.2.1	Расчёт КПД концентрирующего солнечного коллектора (параболическая тарелка)	20
3	Обзор параболических концентраторов солнечной энергии	23
3.1	Отражающие концентраторы	23
3.2	Факетные концентраторы	24
3.3	Параболоидный концентратор	25
3.4	Методы изготовления параболических концентраторов солнечной энергии	25
3.5	Метод гальванопластики	26
3.6	Метод термического моллирования стекла	26
3.7	Формирование отражающих поверхностей из изогнутых плоских зеркал	27
3.8	Изготовление концентраторов на базе спутниковых антенн	27
4	Методологическая часть	29
4.1	Расчет основных параметров	30
4.2	Дополнительные параметры для более точного расчета	31
4.2.1	Расчет полезной энергии солнечного коллектора	31
4.2.2	Расчет тепловых потерь	31
4.2.3	Пример расчета потерь	32
4.2.4	Температура на выходе из коллектора	32
4.3	Обзор высокотемпературных солнечных печей и их цифровых систем управления	34
4.4	Малогабаритная солнечная печь МСП-1500 (Институт материаловедения АН РУз)	36
4.5	Высокотемпературные малые солнечные печи	37
4.6	Оценка влияния различных неточностей солнечной печи на ее энергетические характеристики	39
4.7	Сборка и монтаж солнечного концентратора	44

4.8	Расчёт положения солнца и сбор данных	47
4.9	Описание эксперимента	48
	Заключение	51
	Список использованной литературы	52

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие мировой энергетики сопровождается ростом потребления первичных энергоресурсов, особенно в странах с активно развивающейся экономикой. При этом продолжающаяся зависимость от ископаемых видов топлива приводит не только к истощению доступных природных запасов, но и к серьёзным экологическим последствиям, включая рост выбросов парниковых газов, повышение средней температуры на планете и ухудшение качества окружающей среды. На фоне этих глобальных вызовов остро встаёт задача перехода к устойчивым, экологически безопасным и эффективным источникам энергии.

Одним из наиболее перспективных направлений в области возобновляемой энергетики является использование солнечного излучения. Солнечная энергия обладает огромным потенциалом: она повсеместно доступна, возобновляема и не приводит к загрязнению окружающей среды при использовании. Особенно актуально её применение в странах с высоким уровнем солнечной инсоляции, к которым относится и Республика Казахстан. В южных регионах страны ежегодное количество солнечных часов достигает 2200–3000 часов, что создаёт благоприятные условия для внедрения солнечных теплотехнических установок.

Среди различных технологий преобразования солнечной энергии особый интерес представляют солнечные коллекторы — устройства, предназначенные для преобразования солнечного излучения в тепловую энергию, используемую в системах горячего водоснабжения, отопления или генерации электроэнергии. При этом традиционные плоские коллекторы, хотя и просты в изготовлении, имеют ограниченную эффективность, особенно при высоких температурах. Это связано с их ограниченной способностью концентрировать солнечное излучение и существенными потерями тепла в окружающую среду.

Альтернативным решением являются концентрирующие солнечные коллекторы, в частности устройства с параболическими отражающими поверхностями. Такие установки фокусируют солнечное излучение в точке (фокусе), где располагается абсорбирующий элемент — ресивер. Это позволяет достичь значительно более высоких температур теплоносителя и повысить термическую эффективность. Кроме того, концентраторы могут применяться как в бытовых, так и в промышленных масштабах, включая производство пара, нагрев воды и работу в связке с тепловыми двигателями — например, двигателями Стирлинга.

Настоящая работа посвящена исследованию тепловых характеристик солнечных коллекторов с параболическими панелями, включая разработку геометрической модели концентратора, анализ параметров конструкции и моделирование процессов теплопередачи. Особое внимание уделяется расчёту коэффициента полезного действия, оценке тепловых потерь, выбору

оптимальных материалов отражающей и поглощающей поверхностей, а также определению влияния климатических условий на эффективность установки.

Целью работы является обоснование и подтверждение на практике возможности повышения эффективности преобразования солнечной энергии с помощью параболических коллекторов, применимых в условиях Республики Казахстан. Исследование основывается на аналитических расчётах, компьютерном моделировании (например, в ANSYS Fluent), а также экспериментальных данных.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и внедрении солнечных теплотехнических установок в системе автономного и централизованного теплоснабжения, особенно в регионах, удалённых от инженерных сетей. Работа способствует решению задач в рамках «зелёной экономики» и энергетической независимости, а также повышению энергоэффективности инфраструктуры.

1 Анализ солнечной энергетики и концентрирующих технологий

1.1 Современное состояние солнечной энергетики

На фоне глобального энергетического перехода и климатических вызовов, перед мировым сообществом остро стоит задача отказа от ископаемых источников энергии и перехода к возобновляемым и экологически безопасным технологиям. Солнечная энергия занимает лидирующее место среди альтернативных источников, благодаря высокой доступности, неисчерпаемости и универсальности применения.

Согласно отчетам Международного энергетического агентства (IEA), солнечная энергетика ежегодно демонстрирует стабильный рост: устанавливаемые мощности солнечных установок увеличиваются на десятки гигаватт в год. В некоторых странах — Китае, Индии, ОАЭ, Германии — солнечные электростанции уже стали частью национальных энергетических стратегий.

Наряду с фотоэлектрическими технологиями активно развиваются тепловые солнечные системы — солнечные коллекторы, предназначенные для генерации тепловой энергии. Они находят применение в бытовом секторе (горячее водоснабжение, отопление), в аграрной промышленности (сушка продукции, теплицы), в энергетике (генерация пара и комбинированная выработка электроэнергии).

1.2 Актуальность солнечной энергетики в Республике Казахстан

Казахстан обладает значительным потенциалом для развития солнечной энергетики благодаря климатическим условиям:

- Среднегодовое количество солнечных часов: 2200–3000 ч;
- Среднегодовая солнечная радиация: 1300–1800 кВт·ч/м²;
- Большие площади открытых территорий и степей;
- Наличие регионов с дефицитом централизованных сетей.

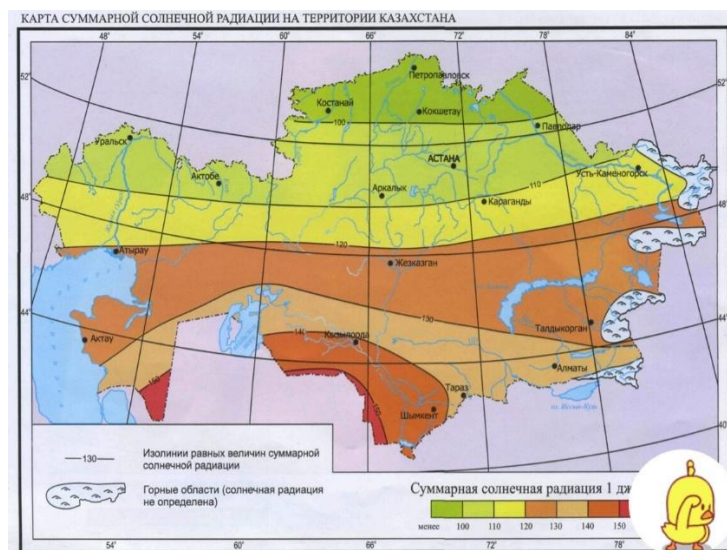


Рисунок 1.1 – Солнечный потенциал Республики Казахстан

Особенно перспективно применение солнечных теплотехнических установок в южных регионах Казахстана (Алматы, Туркестан, Кызылорда, Жамбылская области), где инсоляция наибольшая. Кроме того, в условиях удаленности и низкой плотности населения в ряде районов, солнечные установки являются наиболее экономически оправданным способом автономного теплоснабжения.

Программа «Зеленая экономика» Республики Казахстан и правительственные инициативы в рамках международных обязательств (Парижское соглашение, стратегия углеродной нейтральности до 2060 года) подчеркивают важность внедрения ВИЭ в национальную энергосистему.



Рисунок 1.2 - Соотношение солнечных, облачных и пасмурных дней

1.3 Классификация солнечных коллекторов

Солнечные коллекторы подразделяются на два основных типа:

1) Плоские (панельные) - содержат абсорбер, покрытый селективным слоем, защищённый стеклом и теплоизоляцией. Обладают низкой стоимостью, но ограниченной эффективностью. Температура теплоносителя — до 80 °С.

2) Концентрирующие - используют отражающие поверхности (зеркала, линзы) для фокусировки солнечных лучей на небольшой области (фокусе), где размещается абсорбер. Позволяют достигать температур от 150 до 500 °С и выше.

Концентрирующие коллекторы включают:

- Параболические желоба (PTC),
- Линзы Френеля,
- Центральные башни (CSP),
- Параболические тарелки (Dish-Stirling systems).

Для данной работы интерес представляют параболические тарелки (dish-type), которые обеспечивают точечную концентрацию солнечного излучения и могут быть эффективно применены для нагрева жидкости, работы тепловых двигателей и др.



Рисунок 1.3 – Плоские коллекторы

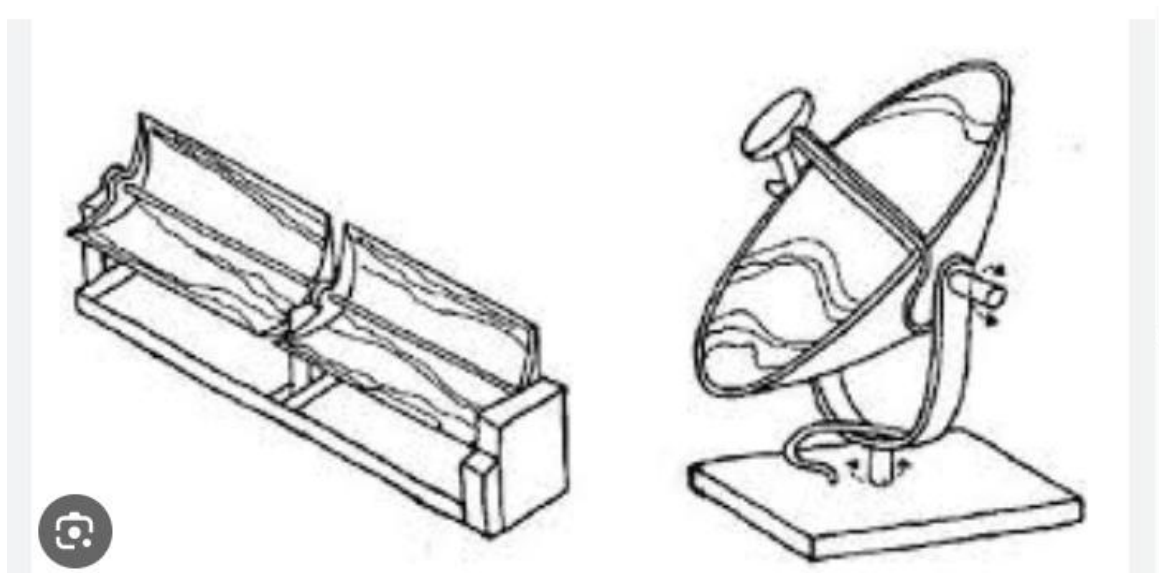


Рисунок 1.4 – Концентрирующие коллекторы

1.4 Принцип действия параболических концентраторов

Параболическая отражающая поверхность устроена таким образом, что все падающие на неё параллельные лучи (солнечные) фокусируются в одной точке - фокусе. В этой фокусной зоне располагается абсорбер или спиральный ресивер, в котором циркулирует теплоноситель (чаще всего вода или масло).

Процесс включает следующие этапы:

- 1) Солнечные лучи отражаются от поверхности параболы.
- 2) Концентрируются в фокусе, образуя зону с высокой плотностью теплового потока.
- 3) Теплоноситель, проходя через ресивер, нагревается до высоких температур.
- 4) Нагретая жидкость используется напрямую (отопление, ГВС) или косвенно (генерация пара, работа двигателя Стирлинга).

Такой способ позволяет значительно увеличить эффективность использования солнечного излучения.

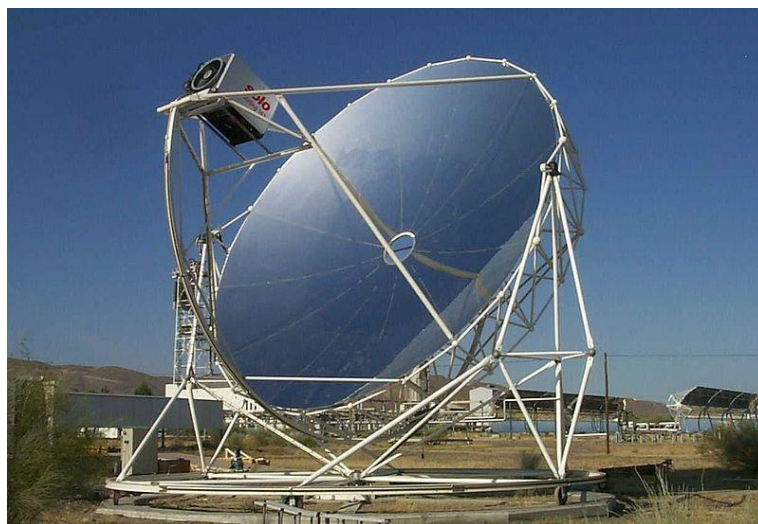


Рисунок 1.5 - Параболический концентратор

Таким образом, параболические концентраторы имеют преимущество в задачах, где требуется высокая температура и эффективность, несмотря на более сложную конструкцию и необходимость системы слежения. (таблица 1.1)

Таблица 1.1 - Сравнение плоских и параболический коллекторов

Параметр	Плоский коллектор	Параболический концентратор
Температура теплоносителя	до 80 °С	150–500 °С и выше
КПД	30–55 %	60–75 %, до 80 %
Требуется слежение за Солнцем	нет	да (двухосное или одноосное)
Стоимость	низкая	выше средней
Области применения	бытовое ГВС	промышленность, автономные станции

1.5 Потенциал практического применения

Параболические коллекторы могут быть использованы:

- В сельских районах Казахстана для горячего водоснабжения и отопления без подключения к централизованным сетям.
- Для нагрева воды в школах, медпунктах, АЗС, теплицах и других объектах.
- Совместно с тепловыми двигателями (например, двигателем Стирлинга) для получения электроэнергии.

- В промышленности: при сушке сырья, в пищевой и лёгкой промышленности, при предварительном подогреве воды.

Особую актуальность представляют автономные гибридные системы, сочетающие солнечные коллекторы с аккумуляторами тепла или дополнительными источниками энергии (газ, биотопливо), обеспечивая надёжность в условиях переменной инсоляции.

1.6 Обзор существующих технологий

В настоящее время в мире реализовано множество проектов на базе параболических концентраторов. Среди них:

- Ripasso Energy (Швеция) – установка с параболической тарелкой и двигателем Стирлинга, КПД до 32 %.
- SolarFlux (США) – концентратор FOCUS с термическим КПД до 72 %.
- ZED Solar (Пакистан) – система диаметром 9 м с сегментированными лепестками.
- EuroDish, SunCatcher – коммерчески апробированные решения для выработки тепла и электричества в удалённых точках.

В Казахстане такие технологии пока не получили широкого распространения, что делает разработку и адаптацию подобных систем особенно актуальной.

2 Классификация и конструкция солнечных коллекторов

Солнечные коллекторы представляют собой устройства, предназначенные для преобразования солнечной радиации в тепловую энергию, используемую для нагрева жидкости или воздуха. В зависимости от конструкции, принципа действия, температуры теплоносителя и характера концентрации излучения, солнечные коллекторы подразделяются на несколько типов.

2.1 Плоские солнечные коллекторы: устройство, принцип действия и эффективность

Плоские солнечные коллекторы являются наиболее широко распространёнными устройствами для преобразования солнечной радиации в тепловую энергию. Они используются в различных отраслях – от бытового горячего водоснабжения до отопления зданий и промышленных нужд. Популярность плоских коллекторов объясняется их относительной простотой, низкой стоимостью, надёжностью, а также способностью эффективно функционировать в условиях рассеянного солнечного излучения, что особенно важно в умеренных широтах и в периоды переменной облачности.

Конструктивно плоский солнечный коллектор представляет собой герметичный теплоизолированный короб, внутри которого находится поглощающая пластина (абсорбер), выполненная, как правило, из меди или алюминия. На её поверхность наносится селективное покрытие, обладающее высоким коэффициентом поглощения солнечного излучения и минимальной теплоотдачей в виде инфракрасного излучения. По поверхности абсорбера проложены трубки, по которым циркулирует теплоноситель – вода, водно-гликолевая смесь или иная жидкость с подходящими термическими характеристиками.

Верхняя часть коллектора закрыта специальным закалённым стеклом с высоким коэффициентом пропускания солнечного излучения. Между стеклом и абсорбером создаётся воздушное пространство, играющее роль дополнительного теплоизоляционного слоя. Нижняя и боковые части корпуса теплоизолированы материалами с низкой теплопроводностью – чаще всего используются минеральная вата, пенополиуретан или стекловолокно. Корпус коллектора выполняется из антикоррозийных материалов: алюминия, нержавеющей стали, либо оцинкованного металла.

Принцип работы плоского солнечного коллектора заключается в следующем: солнечные лучи проходят через стеклянное покрытие и достигают абсорбера, который преобразует световую энергию в тепловую. Эта энергия передаётся теплоносителю, циркулирующему по трубкам. Нагретый теплоноситель подаётся в накопительный бак или систему теплообмена, после чего остывшая жидкость возвращается в коллектор для повторного нагрева.

Движение теплоносителя осуществляется либо с помощью насосов (в активных системах), либо за счёт естественной циркуляции (в пассивных гравитационных системах).

Температура теплоносителя на выходе из коллектора может достигать 70–90 °С в летний период и около 40–60 °С в весенне-осенний. Такие значения достаточны для большинства бытовых нужд, включая нагрев воды и подпитку систем отопления с низкотемпературными радиаторами или тёплыми полами.

Однако эффективность работы плоского солнечного коллектора зависит от множества факторов. К основным относятся интенсивность солнечного излучения, температура окружающей среды, скорость ветра, качество теплоизоляции, свойства селективного покрытия и, конечно, угол установки коллектора относительно горизонта и сторон света. В ясную погоду при интенсивности солнечного потока около 800–1000 Вт/м² и правильной ориентации плоский коллектор может достигать КПД до 60 %, однако при ухудшении погодных условий эффективность снижается.

Для оценки эффективности используется формула:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{G}$$

где η_0 – оптический КПД (начальное значение при отсутствии тепловых потерь);

T_m – средняя температура теплоносителя;

T_a – температура наружного воздуха,

G – плотность солнечной радиации;

a_1 и a_2 – эмпирические коэффициенты тепловых потерь, определяемые опытным путём для конкретной конструкции.

Среди преимуществ плоских коллекторов можно выделить простоту конструкции, низкую стоимость производства, устойчивость к ветровым нагрузкам и возможность работы в рассеянном свете. Они не требуют систем слежения за солнцем, что снижает затраты на эксплуатацию. Однако имеются и недостатки: ограниченный температурный диапазон работы, существенные тепловые потери при низких температурах окружающей среды, а также снижение КПД в зимний период и при неблагоприятных погодных условиях.

Тем не менее, в большинстве случаев, особенно для частных домов и социально-бытовых объектов, плоские солнечные коллекторы являются рациональным и экономически оправданным решением. Они широко применяются в южных регионах Казахстана, включая Алматинскую, Жамбылскую и Туркестанскую области, где солнечная инсоляция превышает 2500–3000 часов в год. Во многих странах с развитой системой ВИЭ (Германия, Китай, Турция) именно плоские коллекторы составляют основу бытовой солнечной теплотехники.

Таким образом, несмотря на появление более совершенных концентрирующих солнечных технологий, плоские солнечные коллекторы

остаются важным элементом в структуре низкотемпературного теплоснабжения. Их массовое распространение способствует снижению зависимости от ископаемого топлива, улучшению экологической ситуации и внедрению принципов устойчивого развития.

2.1.1 Пример расчёта КПД плоского солнечного коллектора

Для определения эффективности плоского солнечного коллектора в условиях высокой инсоляции южных регионов Казахстана воспользуемся упрощённой эмпирической формулой:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G}$$

где: η — искомый КПД коллектора;

η_0 — начальный (оптический) КПД, без учёта потерь, типичное значение: 0.75;

a_1 — коэффициент тепловых потерь, Вт/(м²·К), типичное значение: 3.5;

T_m — средняя температура теплоносителя, °С;

T_a — температура окружающего воздуха, °С;

G — плотность солнечной радиации, Вт/м².

Входные данные (лето, г. Шымкент):

- Средняя температура теплоносителя: $T_m = 60$ С

- Температура воздуха: $T_a = 30$ С

- Солнечная радиация: $G = 950$ Вт/м²

- $\eta_0 = 0.75$

- $a_1 = 3.5$

Подставим в формулу:

$$\eta = 0.75 - 3.5 \cdot \frac{(60 - 30)}{950}$$

$$\eta = 0.75 - 3.5 \cdot \frac{30}{950} = 0.75 - \frac{105}{950} = 0.75 - 0.1105 = 0.6395$$

$$\eta \approx 0.64 \text{ или } 64\%$$

Таким образом, КПД плоского солнечного коллектора летом в южных регионах Казахстана может достигать около 64 %, что является высоким показателем для не-концентрирующего оборудования. Это подтверждает целесообразность применения таких систем для горячего водоснабжения и поддержки отопления в климатических условиях юга страны.

2.2 Гелиоколлекторы с концентраторами: принципы, конструкции и особенности работы

Гелиоколлекторы с концентраторами солнечного излучения представляют собой усовершенствованный тип солнечных теплотехнических установок, способных обеспечить получение более высоких температур по сравнению с традиционными плоскими коллекторными системами. Их основная особенность заключается в способности фокусировать прямое солнечное излучение в ограниченной области, за счёт чего достигается значительное увеличение плотности потока энергии, передаваемой теплоносителю. Это делает концентрирующие системы особенно эффективными для задач, требующих высокотемпературного нагрева, а также для производства пара и генерации электроэнергии.

Принцип действия таких гелиоколлекторов основан на использовании отражающих поверхностей, геометрически сформированных таким образом, чтобы направлять параллельные солнечные лучи в зону абсорбера. В отличие от плоских коллекторов, которые улавливают как прямое, так и рассеянное излучение, концентраторы работают преимущественно с прямым солнечным потоком, поэтому для их эффективной работы требуется наличие систем слежения за движением Солнца.

Наиболее распространёнными типами концентрирующих гелиоколлекторов являются параболические жёлоба, линзы Френеля, башенные установки с гелиостатами, а также параболические тарелки (dish-системы). Каждый из этих типов обладает своими конструктивными особенностями и областью применения.

Параболические жёлоба (Parabolic Trough Collectors, PTC) представляют собой продольные зеркальные поверхности в виде цилиндрической параболы, фокусирующие солнечное излучение на трубке-абсорбере, проходящей вдоль фокальной линии. Через трубку циркулирует теплоноситель, чаще всего синтетическое масло, способное нагреваться до температур порядка 300–400 °С. Данный тип коллектора применяется, в основном, на промышленных установках для генерации пара и электричества.

Гелиоколлекторы с линзами Френеля используют эффект линзовой фокусировки света, заменяя громоздкие линзы тонкими ступенчатыми преломляющими поверхностями. Такие установки могут быть более компактными и дешевыми в производстве, но имеют определённые оптические ограничения и термические потери. Они находят применение в случаях, где важны компактность и простота.

Башенные солнечные установки используют большое количество зеркал (гелиостатов), которые следят за Солнцем и отражают лучи на верхнюю часть центральной башни, где расположен теплообменник. Там циркулирует расплавленная соль или парогенератор. Такие технологии применяются на крупнейших солнечных электростанциях и обеспечивают устойчивое

производство электроэнергии даже в ночное время за счёт накопления тепла в резервуарах.

Параболические тарелки (dish-концентраторы) являются наиболее перспективными с точки зрения автономного применения в удалённых регионах. Эти устройства состоят из зеркальной поверхности в форме вращающейся параболы, фокусирующей свет в точке, где установлен ресивер — компактный теплообменник, соединённый с теплоносителем или тепловым двигателем. В частности, в таких системах часто используется двигатель Стирлинга, работающий от внешнего тепла. КПД подобных установок может достигать 30–32 % при выработке электроэнергии и более 70 % при использовании только тепла.

Основными достоинствами концентрирующих гелиоколлекторов являются высокая температура на выходе, возможность получения пара и электричества, а также высокий коэффициент полезного действия. При правильной геометрии отражателей, использовании селективных абсорберов и точной системе слежения эффективность преобразования солнечной энергии может превышать 65–75 %. Однако такие установки также имеют и ряд недостатков: высокая стоимость компонентов, необходимость в постоянной калибровке и техническом обслуживании, зависимость от ясной погоды, а также потребность в системах точного позиционирования.

В условиях Республики Казахстан, особенно в южных регионах с высоким уровнем солнечной инсоляции, гелиоколлекторы с концентраторами представляют собой перспективное направление для автономного и промышленного теплоснабжения. Их внедрение может быть целесообразно в местах, удалённых от централизованных систем, для теплиц, сельскохозяйственных комплексов, отелей, школ и фельдшерско-акушерских пунктов. Кроме того, при наличии соответствующего накопителя тепла такие системы могут использоваться в гибридных схемах с другими возобновляемыми источниками энергии.

Таким образом, гелиоколлекторы с концентраторами представляют собой технологически сложные, но крайне эффективные решения для задач высокотемпературного теплоснабжения и генерации энергии. Их использование требует тщательного инженерного расчёта, подбора материалов и систем слежения, однако при корректной эксплуатации они обеспечивают высокий уровень энергоэффективности и соответствуют современным требованиям устойчивого энергетического развития.

2.2.1 Расчёт КПД концентрирующего солнечного коллектора (параболическая тарелка)

Для оценки эффективности гелиоколлектора с параболическим концентратором используем упрощённую формулу с учётом тепловых потерь:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G}$$

где: η — КПД установки;
 η_0 — начальный (оптический) КПД;
 a_1 — коэффициент теплопотерь;
 T_m — температура теплоносителя (в фокусе);
 T_a — температура окружающей среды;
 G — солнечная радиация (Вт/м^2).

Пример расчёта (лето, г. Туркестан):

- $\eta_0=0.75$;
- $a_1=2.0 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$;
- $T_m = 250 \text{ C}$;
- $T_a = 35 \text{ C}$;
- $G=950 \text{ Вт/м}^2$

$$\eta = 0.75 - 2.0 \cdot \frac{(250 - 35)}{950} = 0.75 - 2.0 \cdot \frac{215}{950}$$

$$\eta = 0.75 - 0.4526 = 0.2974 \approx 29.7\%$$

Это значение относится к электрическому КПД, если коллектор работает, например, с двигателем Стирлинга. Если использовать тепловую энергию напрямую (например, для пара), то КПД может быть 65–70 %, так как нет потерь на преобразование.

Таблица 2.1 - Сравнение с другими типами коллекторов

Параметр	Плоский коллектор	Вакуумный трубчатый	Параболический концентратор	Параболическая тарелка (Dish)
Рабочий диапазон температур	40–80 °C	60–150 °C	150–400 °C	200–600 °C
Тип излучения	Прямое и рассеянное	Прямое и рассеянное	Только прямое	Только прямое
Наличие слежения за Солнцем	Не требуется	Не требуется	Требуется (1 ось)	Требуется (2 оси)
КПД (тепловой)	40–60 %	50–70 %	60–75 %	65–80 %
КПД (электрический)	-	-	до 20 %	до 30–32 %

Продолжение таблицы 2.1

Параметр	Плоский коллектор	Вакуумный трубчатый	Параболический концентратор	Параболическая тарелка (Dish)
Сложность конструкции	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая
Стоимость	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая
Область применения	ГВС, отопление	Теплоснабжение	Пар, ТЭЦ на солнце	Электрогенерация, автономные станции
Подходит для Казахстана	Да	ГВС, отопление	Частично	Да, при ясной погоде

3 Обзор параболических концентраторов солнечной энергии

Основной задачей концентраторов солнечного излучения является увеличение плотности энергии, поступающей от Солнца, значение которой у поверхности Земли составляет в среднем 1366 Вт/м^2 . Повышение плотности солнечного потока до более высоких значений позволяет эффективно использовать его для решения инженерных задач, требующих высокой температуры. Концентрирующие системы нашли широкое применение в различных сферах: от экспериментальных и промышленных печей, способных достигать температур до 3500°C для плавления тугоплавких металлов, до бытовых нужд — нагрева воды или приготовления пищи в условиях жаркого климата и низкого уровня доходов. Кроме того, концентраторы солнечного излучения активно применяются в составе установок для выработки электроэнергии на базе тепловых двигателей.

Ключевым параметром, определяющим характеристики концентрирующей системы, является коэффициент концентрации C_{con} . Он определяется как отношение средней плотности сфокусированного излучения к плотности солнечного потока, падающего на плоскую поверхность, перпендикулярную направлению распространения света. С точки зрения геометрии, этот коэффициент может быть также выражен через отношение площади зеркальной поверхности концентратора к площади абсорбера.

3.1 Отражающие концентраторы

Отражающие системы представляют собой оптические элементы, выполненные в форме тел вращения, основанных на конических кривых. В зависимости от типа кривой, они могут иметь параболическую, коническую или иную форму. Кроме одиночных отражающих систем, в практике применяются также сложные компоновки, включающие несколько зеркальных поверхностей, как, например, системы Кассегрена или Ньютона. На рисунке 3.1 приведён пример концентратора, выполненного по такому принципу.



Рисунок 3.1 - Отражающие концентраторы

Система Кассегрена, построенная на основе двух зеркал, позволяет сфокусировать солнечное излучение вдоль его первоначального направления. Однако высокая точность, требуемая при изготовлении таких зеркал, существенно ограничивает их массовое применение. В конструкциях ньютоновского типа основное параболическое зеркало закреплено стационарно, а солнечный свет направляется на него при помощи подвижного плоского зеркала. Такой принцип широко используется в солнечных печах, где требуется достижение экстремально высоких температур в очаговой зоне.

3.2 Фацетные концентраторы

К фацетным относят концентраторы, в которых отражающая поверхность состоит из большого количества плоских или слабоизогнутых зеркальных элементов. Эти элементы (фацеты) формируют геометрическую аппроксимацию более сложной криволинейной поверхности, обеспечивая приближенную фокусировку света в заданную область. Такая конструкция упрощает производство и сборку, поскольку отдельные зеркала легче изготовить, выровнять и обслуживать.



Рисунок 3.2 – Фацетные концентраторы

Фацетные системы могут иметь форму круга или многоугольника, в пределах которого размещены элементы, ориентированные по направлению к общей фокальной точке. Один из известных примеров фацетных концентраторов – конструкция, разработанная компанией IBM, представлена на рисунке 3.2.

3.3 Параболоидный концентратор

В настоящей работе основной акцент сделан на анализе параболоидного концентратора солнечного излучения. Его конструкция базируется на вращении параболы вокруг её оси симметрии, в результате чего формируется параболоид – отражающая поверхность, способная фокусировать параллельные солнечные лучи в одну точку – фокус.

Одной из ключевых оптических особенностей параболической поверхности является то, что все лучи, падающие параллельно оси симметрии, отражаются и сходятся в одной точке. Эта точка называется главным фокусом и служит местом размещения абсорбера или ресивера. Благодаря такой конфигурации удаётся достичь высокой плотности энергии в фокусной зоне, что позволяет использовать данный тип концентратора для высокоэффективного нагрева.

Появление света в фокусной точке имеет важное значение как с точки зрения оценки качества изготовления отражающей поверхности, так и при расчётах теплового потока, поступающего в фокус. Также оно используется для анализа формы светового пятна, возникающего на приёмной поверхности, что особенно важно при сопоставлении с фокусирующими свойствами линзовых систем. Как показано на рисунке 10, фокус формируется в результате отражения элементарных солнечных лучей от параболической поверхности. При этом световое пятно в фокальной плоскости имеет форму эллипса, размеры которого зависят от углового размера солнечного диска (например, $2\varphi \approx 32$ угловых минуты или около 0,004654 радиан).

Такая точность фокусировки требует высокой геометрической точности исполнения отражающей поверхности. Любые отклонения от идеальной формы приводят к расфокусировке потока, снижению эффективности и увеличению тепловых потерь. Тем не менее, при корректном проектировании и точной механической реализации, параболоидные концентраторы обеспечивают один из наивысших коэффициентов концентрации среди всех типов оптических солнечных систем.

3.4 Методы изготовления параболоидных концентраторов солнечной энергии

Принцип действия данного метода основан на физическом свойстве жидкостей под действием центробежной силы при равномерном вращении формировать симметричную и устойчивую по форме поверхность. При этом лёгкая жидкость заливается поверх более плотной, находящейся в состоянии вращения. В процессе застывания тяжелой жидкости формируется выпуклая поверхность с параболоидной формой и высокой степенью гладкости. Таким образом создаётся заготовка зеркала с чистой и ровной оптической

поверхностью, сформированной благодаря естественному разделению двух жидкостей (см. рисунок 3.3).

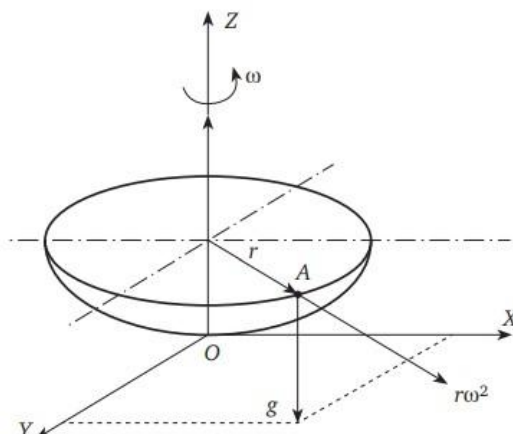


Рисунок 3.3 -Принцип действия параболоидных концентраторов

3.5 Метод гальванопластики

Гальванопластический способ (электроформование) позволяет получать высокоточные отражающие поверхности, в том числе большого диаметра, из лёгких металлических сплавов. На подготовленную форму (матрицу) наносится проводящий серебряный слой с высокой отражающей способностью и заданной геометрией. Затем на него электрохимически наращивается металлический слой требуемой толщины. После формирования конструкции к ней прикрепляется армирующая рама, а сама отражающая часть отделяется от матрицы. С помощью данного метода можно получить концентраторы с заданным распределением плотности энергии в фокусе. Иногда при этом используются чашеобразные секции, отлитые в отдельных кольцевых формах, объединённых в единую матрицу.

3.6 Метод термического моллирования стекла

Метод моллирования предполагает термическую обработку листового стекла в специальных печах, в результате чего оно становится пластичным и может быть сформировано в нужную криволинейную форму — в частности, в параболоид. Процесс заключается в нагреве стеклянной заготовки до температуры размягчения, после чего оно либо прогибается под собственным весом, либо прижимается к заранее подготовленной формующей поверхности за счёт вакуума. Металлическое основание с регулируемыми упорами придаёт конечную форму заготовке. Таким способом изготавливают точные зеркала

разнообразной конфигурации, включая параболоидные концентраторы (см. рисунок 3.4).

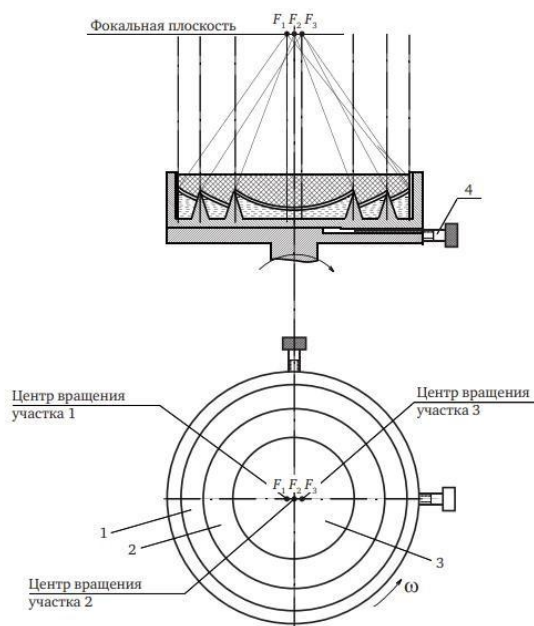


Рисунок 3.4 – Метод моллирования стекла

3.7 Формирование отражающих поверхностей из изогнутых плоских зеркал

Один из альтернативных методов, предложенный французским исследователем Ф. Тромбом, заключается в использовании упругих деформаций плоских стеклянных зеркал. Суть метода — в создании желаемой кривизны за счёт механического прогиба стекла: края фиксируются на опоре, а центральная часть изгибается с приложением определённой силы. При этом важно, чтобы изгиб оставался в пределах упругой деформации материала. Несмотря на простоту, данный метод позволяет создавать крупные концентраторы с хорошими оптическими характеристиками при минимальных затратах на оборудование.

3.8 Изготовление концентраторов на базе спутниковых антенн

В ряде стран с ограниченными ресурсами получила распространение практика изготовления солнечных концентраторов на базе бывших в употреблении спутниковых антенн. Эти антенны имеют форму, близкую к параболоиду, что делает их пригодными для использования в качестве основы для солнечных установок. Путём нанесения отражающего покрытия (алюминиевая фольга, зеркальная плёнка, полированная металлическая

пластина) антенна превращается в простой параболический концентратор. Такие устройства, несмотря на невысокую точность и эффективность, успешно применяются для бытовых нужд — в частности, для нагрева воды или приготовления пищи. Особенно широко они распространены в Индии и других странах с тёплым и солнечным климатом, где их тепловая мощность оказывается достаточной для бытового использования.

4 Методологическая часть

Теоретические основы и физика солнечного коллектора с параболическими панелями. Основной принцип работы солнечного коллектора с параболической панелью

Параболический солнечный коллектор — это устройство, состоящее из зеркала с параболической формой, которое фокусирует солнечные лучи на приемнике, находящемся в фокусе параболы. Этот приемник обычно представляет собой трубу с рабочей жидкостью (например, теплоносителем), которая поглощает солнечное тепло.

Принцип работы:

- Солнечные лучи падают на параболическое зеркало.
- Зеркало фокусирует эти лучи на трубку приемника, которая находится в фокусе.
- Рабочая жидкость в трубке нагревается и используется для обогрева или преобразования в электричество.

Солнечные коллекторы с параболической зеркальной поверхностью предназначены для концентрации солнечной радиации на теплообменнике, что позволяет достичь высоких температур для нагрева теплоносителя. Параболическая форма коллектора обеспечивает фокусировку солнечных лучей в одну точку, где находится поглощающее. Это позволяет эффективно собирать солнечную энергию, особенно в регионах с высокой солнечной радиацией.

Основные параметры, влияющие на эффективность:

- Геометрия коллектора: угол наклона, диаметр и длина параболического зеркала, фокусное расстояние.
- Солнечная радиация G : интенсивность солнечного излучения, зависящая от времени суток, времени года, географической широты и погодных условий.
- Температура T коллектор: температура поверхности коллектора, которая определяет эффективность поглощения и теплопередачи.
- Эмиссия и абсорбция: свойства материала зеркала (эмиссионные и абсорбционные характеристики), которые определяют потери излучения и эффективность поглощения солнечной энергии.

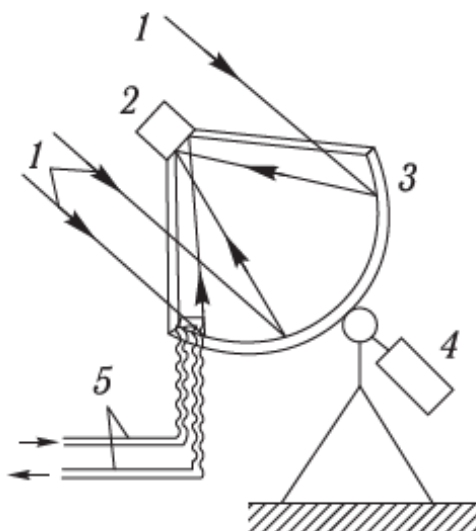


Рисунок 4.1 - Параболический концентратор; 1 - солнечные лучи; 2 – тепловоспринимающий элемент (солнечный коллектор); 3 – отражающий элемент (зеркало); 4 – механизм привода системы слежения; 5 – трубопроводы, подводящие и отводящие теплоноситель;

4.1 Расчет основных параметров

Площадь зеркала и рабочий параметр коллектора

Площадь зеркала A можно рассчитать через размер зеркала:
 $A = L \times W$

где:

- L — длина зеркала (м),
- W — ширина зеркала (м).

Для параболического коллектора площадь зеркала может быть также выражена через радиус параболы и ее фокусное расстояние, но обычно это вычисляется с помощью геометрии параболы.

Геометрия параболы

Фокусное расстояние f зависит от радиуса параболы R и глубины параболы d :

$$f = R^2 / 4d$$

где:

- R — радиус параболы,
- d — глубина параболы.

Солнечная радиация

Солнечная радиация G (в кВт·ч/м²·день) для определенного региона зависит от времени года и географического положения. В среднем для умеренных широт солнечная радиация варьируется от 4 до 6 кВт·ч/м²·день.

Эффективность коллектора

Эффективность параболического коллектора η зависит от разных факторов, включая материал зеркала, углы наклона, и потери тепла. Обычно для параболических солнечных коллекторов эффективность находится в пределах 60-80%.

$$Q = G \cdot A \cdot \eta$$

где:

- Q — количество тепла, получаемое коллектором (кВт·ч/день),
- G — солнечная радиация (кВт·ч/м²·день),
- A — площадь зеркала (м²),
- η — коэффициент эффективности (обычно 0.6–0.8).

Пример расчета

Допустим, у нас есть параболический солнечный коллектор с зеркалом площадью 10 м², установленный в регионе, где средняя солнечная радиация составляет 4 кВт·ч/м²·день, и коэффициент эффективности коллектора равен 70%.

1. Солнечная энергия, поступающая на коллектор:
 $Q = 4 \cdot 10 \cdot 0.7 = 28 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{день}$

Это количество энергии, которое коллектор соберет за один день.

2. Годовая энергия:
 $Q_{\text{год}} = 28 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{день} \times 365 \text{ дней} = 10\,220 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{год}$

В зависимости от цели использования (например, горячее водоснабжение или отопление), солнечная энергия, полученная с помощью параболического коллектора, может быть использована для нагрева воды или жидкости в системе отопления.

Горячее водоснабжение: При среднем потреблении 200 л горячей воды в день (при температуре 50°C), энергия, необходимая для нагрева воды, может быть рассчитана по следующей формуле:

$$Q_{\text{нужная}} = m \cdot C \cdot \Delta T$$

где: m — масса воды (кг),

C — удельная теплоемкость воды (4.18 кДж/кг·°C),

ΔT — изменение температуры (°C).

Пример для 200 л воды (200 кг):

$$Q_{\text{нужная}} = 200 \cdot 4.18 \cdot (50 - 10) = 33,440 \text{ кДж} \approx 9.3 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Если солнечный коллектор может производить 28 кВт·ч в день, этого вполне достаточно для покрытия потребностей в горячей воде.

4.2 Дополнительные параметры для более точного расчета

Теплопотери: При установке необходимо учитывать потери тепла из-за конвекции и радиации, особенно в холодные ночи. Углы наклона и ориентация: Панели должны быть установлены под оптимальным углом для максимального сбора солнечной энергии в зависимости от географической широты.

4.2.1 Расчет полезной энергии солнечного коллектора

Интенсивность солнечной радиации

Солнечная радиация на поверхности коллектора может зависеть от времени года и географической широты, а также от состояния атмосферы. Средняя величина солнечной радиации на горизонтальной поверхности для умеренных широт составляет около 800-1000 Вт/м².

Расчет полезной энергии, получаемой от коллектора. Полезная энергия, которая используется для нагрева теплоносителя, может быть рассчитана по формуле:

$$Q_{\text{нужная}} = A \cdot G \cdot \eta_{\text{коллектор}} \cdot t$$

где: A - площадь коллектора (м²);

G - интенсивность солнечной радиации на единицу площади (Вт/м²);

$\eta_{\text{коллектор}}$ - коэффициент полезного действия солнечного коллектора (обычно в пределах 0.6–0.8);

t - время работы коллектора (часы).

Предположим, что площадь коллектора $A=20 \text{ м}^2$, коэффициент полезного действия $\eta_{\text{коллектор}}=0.7$, интенсивность солнечного излучения $G=800 \text{ Вт/м}^2$, а время работы составляет 5 часов.

$$Q_{\text{нужная}} = 20 \cdot 800 \cdot 0.7 \cdot 5 = 56.000 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 56 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Таким образом, за 5 часов работы солнечный коллектор с параболическими панелями генерирует 56 кВт·ч полезной энергии.

4.2.2 Расчет тепловых потерь

Радиационные потери происходят из-за излучения тепла в окружающее пространство. Это излучение зависит от температуры коллектора, его поверхности и окружающей среды. Радиационные потери рассчитываются с использованием закона Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{радиационные}} = \varepsilon \cdot \delta \cdot A \cdot (T_{\text{коллектор}}^4 - T_{\text{окружающая}}^4)$$

где: ε - коэффициент эмиссии поверхности коллектора (например, $\varepsilon=0.9$ для большинства металлов),

σ — постоянная Стефана-Больцмана ($\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$),

A — площадь коллектора (м^2),

$T_{\text{коллектор}}$ и $T_{\text{окружающая}}$ — температуры коллектора и окружающей среды (К).

Конвекционные потери происходят из-за теплообмена между поверхностью коллектора и воздухом. Для их расчета используется формула:

$$Q_{\text{конвекционные}} = h \cdot A \cdot (T_{\text{коллектор}} - T_{\text{окружающая}})$$

где: h — коэффициент теплоотдачи (например, для воздуха $h=10 \text{ Вт/м}^2\text{К}$)

A — площадь коллектора (м^2),

$T_{\text{коллектор}}$ и $T_{\text{окружающая}}$ — температуры коллектора и окружающей среды (К).

4.2.3 Пример расчета потерь

Для коллекторной поверхности с температурой $T_{\text{коллектор}}=350 \text{ К}$, температуры окружающей среды $T_{\text{окружающая}}=300 \text{ К}$, площади $A=20 \text{ м}^2$, радиационные потери:

$$Q_{\text{радиационные}} = 0.9 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot 20 \cdot (350^4 - 300^4)$$

Рассчитываем разницу температур в четвертой степени:

$$350^4 = 1.5 \times 10^{10}, 300^4 = 8.1 \times 10^9$$

$$Q_{\text{радиационные}} = 0.9 \cdot 5.67 \times 10^{-8} \cdot 20 \cdot 10 - 8 \cdot 20 \cdot (1.5 \times 10^{10} - 8.1 \times 10^9) \\ = 300 \text{ Вт}$$

Конвекционные потери:

$$Q_{\text{конвекционные}} = 10 \cdot 20 \cdot (350 - 300) = 1000 \text{ Вт}$$

Общие потери:

$$Q_{\text{потери}} = 300 + 1000 = 1300 \text{ Вт}$$

4.2.4 Температура на выходе из коллектора

Для расчета температуры на выходе из солнечного коллектора необходимо учитывать теплоемкость и массу теплоносителя. Используем основную формулу для изменения температуры:

$$Q_{\text{полезная}} = m \cdot c \cdot \Delta T$$

где: m — масса теплоносителя (кг),
 c — удельная теплоемкость (кДж/кг·К),
 ΔT — изменение температуры теплоносителя (К).

Температура на выходе:

$$T_{\text{выход}} = \frac{T_{\text{вход}} + Q_{\text{полезное}}}{m \cdot c}$$

Пример расчета температуры. Предположим, что масса теплоносителя составляет $m=100$ кг, начальная температура $T_{\text{вход}}=20^\circ\text{C}$, полезная энергия

$$Q_{\text{полезная}} = 56 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 201600 \text{ кДж.}$$

Изменение температуры:

$$\Delta T = \frac{201600}{(100 \cdot 4.18)} = 482.5 \text{ C}$$

Таким образом, температура на выходе из коллектора:

$$T_{\text{выход}} = 20 + 482.5 = 502.5 \text{ C}$$

Общие тепловые характеристики и выводы

- Эффективность: Рассчитанный КПД для этого коллектора составляет 70%, что является хорошим результатом для солнечных коллекторов с параболическими панелями. Эффективность зависит от множества факторов, включая географическое положение, качество материалов и технологические улучшения.

- Потери энергии: Радиационные и конвекционные потери составляют 1300 Вт, что нужно учитывать при проектировании системы.

- Температура: На выходе из коллектора можно ожидать температуру около 502.5°C, что делает параболические солнечные коллекторы очень эффективными для использования в промышленных и энергетических приложениях, где требуются высокие температуры.

Таким образом, проведенные расчеты дают полное представление о тепловых характеристиках солнечного коллектора с параболическими панелями. Для точных проектных решений необходимо учитывать дополнительные параметры, такие как сезонные колебания радиации, материал труб и теплоносителя, а также специфические условия эксплуатации.

4.3 Обзор высокотемпературных солнечных печей и их цифровых систем управления

Солнечная энергия по праву считается одним из наиболее экологически безопасных и перспективных источников для устойчивого развития энергетики. В числе наиболее технологичных и эффективных решений на её основе — высокотемпературные солнечные печи, которые способны достигать температур в тысячи градусов за счёт концентрации солнечного излучения. Такие установки находят применение в ряде промышленных, исследовательских и даже космических задач. Интеграция с современными цифровыми системами управления значительно повышает точность работы печей и делает их эксплуатацию более гибкой и безопасной.

Принцип работы высокотемпературных солнечных печей основан на фокусировке солнечного потока с помощью оптических элементов — отражающих зеркал или линз. В состав подобных установок, как правило, входят:

– Гелиостаты — подвижные зеркала, отслеживающие движение Солнца и направляющие излучение на фокус.

– Оптический концентратор — система, фокусирующая свет в малую зону, где создаются экстремальные температуры.

– Рабочая зона (фокус) — область термического воздействия, в которой проводится нагрев, расплавление или термообработка материалов.

Температура в фокусной области может достигать нескольких тысяч градусов Цельсия, что позволяет использовать такие печи в производстве тугоплавких материалов, при исследовании термостойкости, а также для моделирования условий, близких к тем, что возникают при входе космических аппаратов в атмосферу.

Цифровые системы управления солнечными печами

Цифровые технологии существенно расширяют возможности и точность управления высокотемпературными солнечными установками. Их основные функции включают:

1) Автоматическое слежение за Солнцем. Используя датчики и программные алгоритмы, система точно ориентирует гелиостаты, обеспечивая максимальную концентрацию солнечного потока на фокусе в течение дня.

2) Температурное управление. Современные сенсоры и системы обратной связи позволяют поддерживать заданную температуру в зоне нагрева, что особенно важно для проведения стабильных технологических процессов.

3) Удалённый мониторинг и контроль. Оператор может управлять установкой через интерфейс компьютера или мобильного устройства, получать данные в реальном времени, настраивать параметры и оперативно реагировать на возможные сбои.

4) Анализ и оптимизация работы. Система регистрирует ключевые параметры, проводит их обработку и позволяет оптимизировать режимы работы, снижая энергопотери и повышая ресурс оборудования.

5) Интеграция с внешними промышленными системами. Такая функция делает солнечную печь частью сложного научно-производственного комплекса.

Преимущества высокотемпературных солнечных печей с цифровым управлением включают:

- полную экологическую безопасность — отсутствие выбросов и сжигания топлива,
- низкие эксплуатационные расходы,
- точное соблюдение температурных режимов,
- гибкость в применении: от металлургии до фундаментальных исследований.

Применение

Подобные печи применяются:

- в производстве высокочистых материалов (например, кремния для солнечных элементов),
- в исследовании поведения конструкционных материалов при высоких температурах,
- в моделировании условий атмосферы для аэрокосмических исследований,
- в утилизации сложных и токсичных отходов.

Расчёт температуры при облучении углеродного приёмника

Для оценки температуры поверхности углеродного абсорбера, подвергающегося воздействию концентрированного солнечного потока, можно применить стационарный энергетический баланс, предполагая, что вся поглощённая энергия полностью уходит на тепловое излучение.

Дано:

- Концентрация солнечной энергии: $E=200 \text{ Вт/см}^2$
- Постоянная Стефа-Больцама: $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К}^4)$
- Предполагаем, что углеродный приёмник – абсолютно чёрное тело: $\varepsilon=1$

Формула баланса:

$$E = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4$$
$$T = \left(\frac{E}{\sigma \cdot \varepsilon}\right)^{1/4}$$

Подставим значения:

$$T = \left(\frac{2 \cdot 10^6}{5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 1}\right)^{1/4} \approx 2042 \text{ К} \approx 1769 \text{ С}$$

Если учесть более реалистичный коэффициент излучения $\varepsilon=0,9$, тогда:

$$T = \left(\frac{2 \cdot 10^6}{5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 0.9}\right)^{1/4} \approx 2087 \text{ К} \approx 1814 \text{ С}$$

Таким образом, в идеальных условиях температура поверхности углеродного приёмника может достигать более 1800°С , что полностью соответствует задачам термообработки высокотемпературных материалов.

4.4 Малогабаритная солнечная печь МСП-1500 (Институт материаловедения АН РУз)

Одним из практических примеров подобного оборудования является Малая солнечная печь мощностью 1500 Вт (МСП-1500), разработанная в Институте материаловедения АН Республики Узбекистан. Это горизонтальная двухзеркальная установка, в которую входят один гелиостат и цельный

параболоидный концентратор. Диаметр концентратора составляет 2 м, фокусное расстояние — 0,85 м, площадь апертуры — 3,14 м².

Гелиостат размером 2,8 × 2,8 м выполнен из 16 плоских зеркальных facets размером 0,7 × 0,7 м. Система слежения — двухосная, с азимутальной механикой и цифровым управлением на основе операционного усилителя и высокоточного солнечного датчика. Погрешность позиционирования составляет около 3 угловых минут.

В фокальной области печи формируется гауссообразное световое пятно диаметром порядка 3 см, а коэффициент концентрации превышает 5000. Возможна регулировка энергетических характеристик потока, что позволяет устанавливать различные температурные режимы в зависимости от технологических задач.

МСП-1500 предназначена для проведения широкого спектра исследований в области материаловедения. Она позволяет синтезировать и термообрабатывать оксидные материалы, испытывать образцы на термическую и световую устойчивость, а также отрабатывать методы получения экологически чистых энергоносителей — водорода, углерода и других.

Таким образом, данная установка является ценным научным инструментом для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области высокотемпературной солнечной энергетики.

4.5 Высокотемпературные малые солнечные печи

Высокотемпературные малые солнечные печи (МСП) предназначены для решения широкого круга научно-технических задач материаловедения. Оптическая схема МСП обычно состоит из следящего за Солнцем тарельчатого концентратора или системы, состоящую из следящего гелиостата и неподвижного концентратора. Отражающая поверхность гелиостата и концентратора обычно формируется из зеркальных facets. Энергетическая мощность МСП обычно составляет до 15 кВт, а габариты установки до 6 м (размер гелиостата/концентратора). Коэффициент концентрации солнечного излучения в таких печах зависит от угла раскрытия концентратора и достигает до 10000 крат. Распределения плотности энергии концентрированного солнечного излучения имеет гауссовую форму с диаметром пятна до 5 см. Технические характеристики МСП позволяют проводить фундаментальные и прикладные исследования по синтезу и термообработке высокотемпературных оксидных материалов, проводить комплексные испытания конструкционных материалов, отдельных узлов новой техники на световую и температурную стойкость, разработать зеленые технологии получения водорода, углерода, создание лазера и другие.

В институте Материаловедения (ИМ) разработаны и изготовлены несколько штук экспериментальные высокотемпературные малые солнечные печи тепловой мощностью 1500 Вт: МСП-1500. МСП-1500 является горизонтальной двухзеркальной высокотемпературной солнечной печью,

состоящей из одного гелиостата и цельного концентратора параболической формы. Диаметр концентратора 2 м, фокусное расстояние 0.85 м, площадь мишени 3.14 м². Гелиостат имеет размеры 2.8х2.8 м и его отражающая поверхность сформирована из 16 квадратных факет размером 0.7х0.7 м. Система слежения гелиостата двухосная, имеет альт-азимутальную монтировку. Система управления гелиостатом является замкнутой, микро схемной, с операционным усилителем и включающим в себя высокоточного солнечного датчика. Точность слежения системы около 3 угловых минут. В фокальной зоне МСП-1500 формируется гаусс- образное фокальное пятно диаметром около 3 см и коэффициентом концентрации солнечного излучения более 5000 крат. Имеется возможность с использованием различных регуляторов потока создать разнообразные технологические режимы печи.

В настоящее время в институте разработана аналогичная по техническим характеристикам солнечная печь, только с вертикальной оптической осью. Такое расположение оптической оси печи создаёт некоторые технологические удобства для проведения высокотемпературных экспериментов.

Разработанные в ИМ такие малые солнечные печи в рамках международных договоров экспортированы и установлены в Республике Индии, в международном центре порошковой металлургии и новых материалов (Хайдарабад, ARCI, 1999) и в Арабской Республике Египет, в Таббинском институте металлургии (Каир, 2000 г).

В настоящее время в ИМ проводятся работы по созданию составных факетных высокотемпературных солнечных установок тепловой мощностью 3 и 12 кВт.



Рисунок 4.2 - Малые солнечные печи

Таким образом можно сказать, что МСП являются уникальными научными экспериментальными инструментами для проведения фундаментальных и прикладных исследований в области гелиоматериаловедения.

Зеркальные покрытия фацетных отражателей могут быть из различных материалов. Конкретный материал покрытия можно опционально заказать у производителей в зависимости от назначения печи и многих других факторов (цена, коэффициент отражения, используемый диапазон волн и др.). ИМ имеет металлизующую установку УМ-15, в которой в качестве покрытия используется окись алюминий (Al_2O_3). На рисунке 4.3 представлена зависимость коэффициента отражения зеркал от длины волны солнечного излучения для различных материалов покрытий.

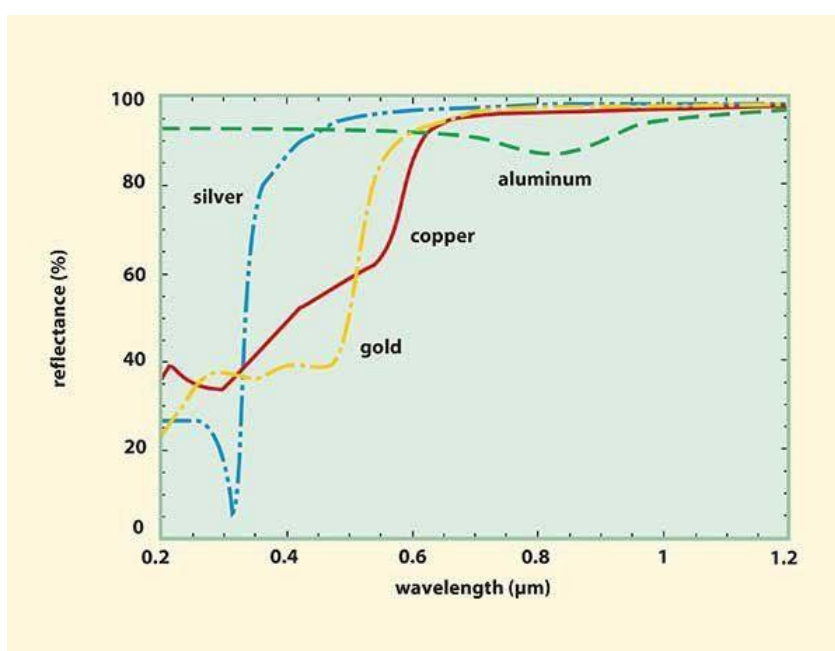


Рисунок 4.3 - Зависимость коэффициента отражения

4.6 Оценка влияния различных неточностей солнечной печи на ее энергетических характеристики

Рассмотрим конкретную двухзеркальную печь, нашу МСП-1500: Концентратор+гелиостат.

В оценках неточность гелиостата включает оптические ошибки (фацетность, неточности поверхности зеркал, юстировка фацет, корректность выставления солнечного датчика, коэффициент отражения зеркал) и ошибки системы слежения (механика, электроника, точность датчика).

Диаметр концентратора $D=2\text{м}$, фокусное расстояние $f=0.86\text{м}$, угол раскрытия $U_m=60$ градусов. Площадь концентратора $S=3.14\text{м}^2$.

D , f , U_m - постоянные величины и однозначно определяют геометрию концентратора (параболоид вращения).

В оценках считаем, что прямая солнечная радиация $E_0=1000\text{Вт/м}^2$ ($0,1\text{Вт/см}^2$) – для удобства (значение), коэффициент отражения зеркал концентратора и гелиостата равны между собой и равно $R_s=0.8$.

Мощность печи

$$W = E_0 \cdot S \cdot R_s = 1000 \cdot 3.14 \cdot 0.8 \cdot 0.8 = 2010 \text{ Вт}$$

Если $E_0=750 \text{ Вт/м}^2$, то $W=1507 \text{ Вт}$. Поэтому принято говорить, что мощность печи 1500 Вт.

Рассмотрим влияния неточностей печи на фокальную плотность и размер пятна. Считаем, что гелиостат направляет солнечные лучи по оптической оси концентратора. Для гелиостата, для ошибок задается одна цифра, среднеквадратичная ошибка (S_g). Она включает в себя и оптическую ошибку зеркал и ошибку системы слежения. Для концентратора (S_c) – оптические ошибки.

Отметим, что мы практически не располагаем никакими корректными экспериментальными данными об ошибках зеркал, юстировки и системы слежения, а также измеренными значениями плотности концентрированной энергии. По этим направлениям не проводятся исследования, отсутствуют штатные единицы и квалифицированные специалисты, задачи не возложены ни на какому-нибудь подразделению. Привыкли говорить об ошибках 3, 5 мин, 7 мин и т.д., не разобравшись вопросом.

Были проведены серии расчетов по определению энергетических характеристик СП при различных значениях S_g и S_c . Эти ошибки варьировались до 16 минут. Определены: фокальная плотность E_f и размер пятна D_p (Радиус R_p). В определении размера пятна имеются некоторые неясности. В гелиотехнике за размер фокального пятна принято взять границу размера области, где плотность не меньше $0.9 \cdot E_f$. Для исключения субъективности, в результатах также приведен «хвостик» распределения в виде графика.

Для расчетов была использована программа расчета энергетических характеристик двухзеркальной солнечной печи. На этой программе реализован фотометрический метод расчета энергетических характеристик солнечной печи (Захидов, Грилихес). В численной реализации используется метод Монте-Карло. Интерфейс программы следующее:

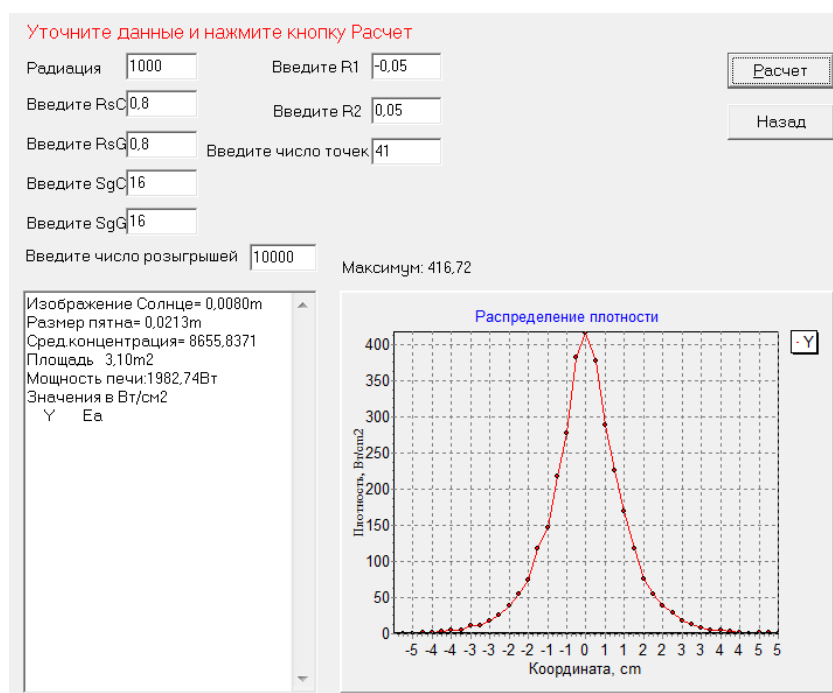
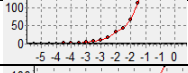
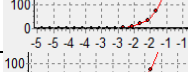
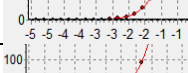
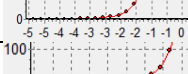
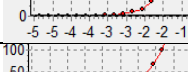
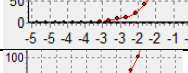
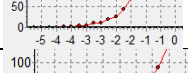
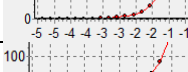
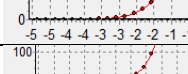
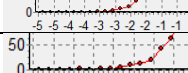
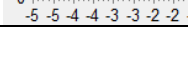


Рисунок 4.4 - Характеристики солнечной печи (Захидов, Грилихес)

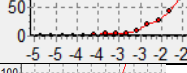
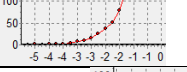
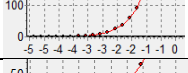
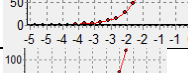
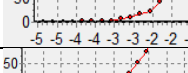
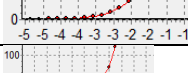
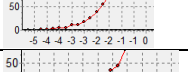
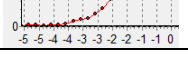
В нижеследующей таблице представлены результаты расчетов. Отметим, что для идеальной системы фокальная плотность около 2800 Вт/см², диаметр пятна около 1.8 см. В таблице, в сетках колонки R_p, в координатах, одно деление 5 мм. Последняя колонка вычислена из графика предыдущей колонки.

Таблица 4.1 – Результат расчетов

Sc Неточности концентратора	Sg Неточности гелиостата	Ef Фокальная плотность	Rp График хвостика фокального пятна	Rp,мм Радиус пятна
6	6	1496		10
6	8	1269		11
6	10	1090		12
6	12	945		13
6	14	802		13
6	16	759		14
8	6	1260		11
8	8	1100		11
8	10	957		12
8	12	824		13
8	14	732		14

8	16	660		15
10	6	1106		12
10	8	958		13
10	10	784		14
10	12	747		14
10	14	645		15
10	16	566		16
12	6	935		12
12	8	812		13
12	10	731		14
12	12	640		15

Продолжение таблицы 4.1

Sc Неточности концентратора	Sg Неточности гелиостата	Ef Фокальная плотность	Rp График хвостика фокального пятна	Rp,мм Радиус пятна
12	14	588		16
12	16	507		17
14	8	740		14
14	12	565		17
14	16	451		18
16	8	656		17
16	12	492		18
16	16	416		18
16	20	343		21

На основании данной таблицы нарисован график зависимости фокальной плотности от ошибок гелиостата и концентратора. Данный график представлен ниже.

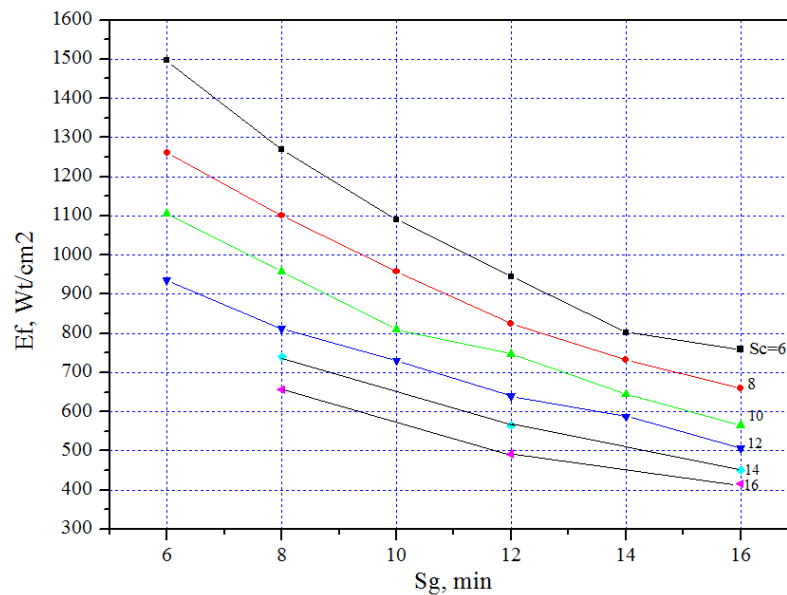


Рисунок 4.5 - Зависимость фокальной плотности

Некоторые полученные сведения на основе обработки материалов на МСП показывают, что интенсивности протекания высокотемпературных процессов не очень высоки. Основываясь на приведенный теоретический анализ можно заключить, что перечисленные выше различные ошибки МСП достаточны высоки и составляет, как нам кажется, порядка 15-16 угловых минут. Для улучшения энергетических показателей печи необходимо серьезно изучить вопросы определения различных эксплуатационных неточностей солнечной печи и их влияние на параметры печи.

Энергетика БСП. Для БСП площадь мишени концентратора $S_m = 1906 \text{ м}^2$. Если полагать как выше, т.е. $E_0 = 1000 \text{ Вт/м}^2$ ($0,1 \text{ Вт/см}^2$), $R_\Gamma = R_K = 0.8$ (зеркала модернизации), тогда мощность печи:

$$W = S_m \cdot E_0 \cdot R_\Gamma \cdot R_K = 1906 \cdot 1000 \cdot 0.8 \cdot 0.8 = 1220 \text{ кВт} = 1.2 \text{ МВт}$$

Если $E_0 = 800 \text{ Вт/м}^2$, тогда $W = 976 \text{ кВт}$, т.е. приблизительно 1 МВт.

В старых зеркалах, значения R были, среднестатично, от 0.5 до 0.72 (после мойки) и соответственно мощность печи тоже была меньше.

Распределение плотности энергии на фокусе концентратора сильно зависит от состояния печи, т.е. от качества используемых зеркал, R_Γ , R_K , юстировки, системы слежения и т.д.

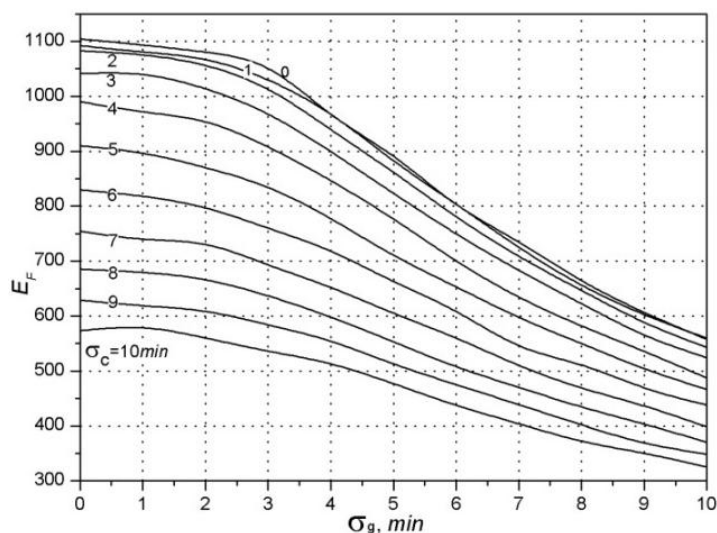


Рисунок 4.6 - Оценка зависимости фокальной плотности от ошибок концентратора и гелиостата представлена на рисунке

Последние измерения на фокусе БСП проводились 2022 году, при этом радиометры были не проходившими сертификационную поверку и показывали отличающийся цифры друг от друга при одних и тех же условиях. Другие измерительные приборы (фотометр, СТЗ, калориметр) находятся не в рабочем состоянии. Измеренные значения фокальной плотности были меньше 300 Вт/см². Таким образом, можно предположить, что, основываясь на приведенном теоретическом графике, средне статические ошибки гелиостатов и концентратора порядка 10 угловых минут, что являются плохими показателями печи. Для улучшения энергетических характеристик печи необходимо изучить вопросы определения и измерения опико-энергетических характеристик печи и их влияние на ее эксплуатационных параметров.

Солнечная энергетика направление альтернативной энергетики, основанное на непосредственном использовании солнечного излучения для получения энергии. Солнечная энергетика является «экологически чистой», то есть не производящей вредных отходов во время активной фазы использования. Производство энергии с помощью солнечных электростанций хорошо согласуется с концепцией распределённого производства энергии.

Количество солнечной энергии, поступающей на Землю, превышает энергию всех мировых запасов нефти, газа, угля и других энергетических ресурсов, в т.ч. возобновляемых. Использование всего лишь 0,0125% солнечной энергии могло бы обеспечить все сегодняшние потребности мировой энергетики, а использование 0,5% — полностью покрыть потребности в будущем. Потенциал солнечной энергии настолько велик, что, по существующим оценкам, солнечной энергии, поступающей на Землю каждую минуту, достаточно для того, чтобы удовлетворить текущие глобальные потребности человечества в энергии в течение года.

Свет, который излучает солнце, при помощи пассивных, а также активных систем превращается в тепловую энергию. Задача солнечного концентратора – сфокусировать солнечные лучи на емкости с теплоносителем. Эффективность солнечных концентраторов зависит от точной ориентации на солнце и свойств отражающей поверхности.

Первое достигается использованием установок, следящих за солнцем, а второе использованием покрытий с наибольшим коэффициентом отражения.

Высокую температуру, полученную с помощью солнечного концентратора можно использовать для опреснения воды, получения водорода, переработки пластиковых ТБО, приготовления пищи и в печах для плавки металлов.

4.7 Сборка и монтаж солнечного концентратора

В качестве основания солнечного концентратора была взята стандартная офсетная спутниковая антенна $d=0,55\text{м}$. Главной причиной выбора именно офсетной антенны стало то, что ее фокус расположен ниже геометрического центра. Это устраняет затенение полезной площади, что повышает ее КПД по сравнению с прямофокусной антенной.



Рисунок 4.7 – Офсетная антенна



Рисунок 4.8 – Прямофокусная антенна

Первоначально в качестве отражающей поверхности было принято использовать пищевую фольгу; в ходе испытаний установки оказалось, что отражающая поверхность не выдерживает погодные условия, ее рвет ветром. В качестве новой отражающей поверхности использован металлический скотч. Его преимущества: выше плотность материала и выше коэффициент отражения.

На рисунке 4.9 изображен процесс оклейки основания антенны пищевой фольгой листами с шириной 0,25м, на рисунке 4.10 процесс оклейки металлическим скотчем полосками шириной по 0,05м.



Рисунок 4.9 - Отражающая поверхность из кухонной фольги

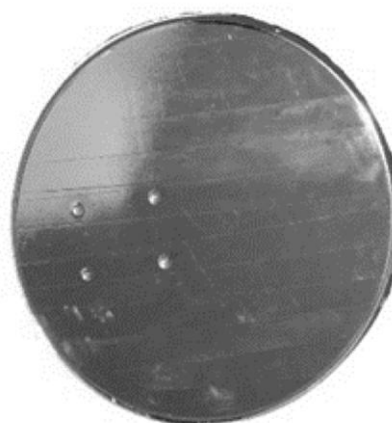


Рисунок 4.10 - Отражающая поверхность из металлического скотча

Следующим шагом по изготовлению солнечного концентратора, было выполнение крепления к поворотному трекеру: стальная П-образная деталь (рис.4.11)

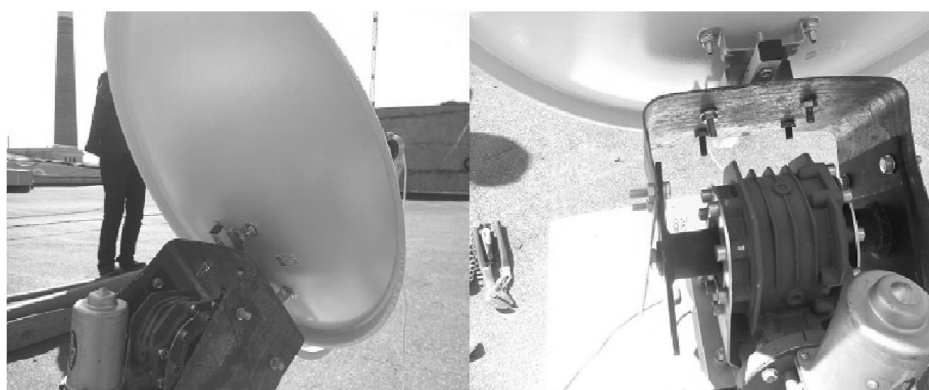


Рисунок 4.11 - Устройство крепления концентратора к поворотной установке

Система ориентации солнечных концентраторов предназначена для наведения концентраторов на Солнце. Наведение выполняется путем разворотов и последующего поддержания требуемой ориентации средствами СУД (система управления движением) и концентраторов устройствами.

Внешний вид готовой установки приведен на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 - Солнечный концентратор на поворотной установке

4.8 Расчёт положения солнца и сбор данных

Пакет SolarOrientation представляет собой набор из двух программ: SOAutomatic и SOManual. SOManual обеспечивает ручное управление поворотной системой с помощью текстовых команд. SOAutomatic призвана обеспечить автоматическое управление поворотной системой и автоматическое наведение солнечного концентратора на солнце (в направлении, параллельном направлению падения солнечных лучей).

Для автоматического наведения установки на солнце, SOAutomatic использует численные алгоритмы, позволяющие рассчитать текущее положение солнца на небосводе в зависимости от координат местности, времени суток и даты.

На вход поступают данные о времени и координаты местности. Время подразумевает под собой год, месяц, день, час, минуты и секунды (универсальное время). Расположение задается как широта и долгота в градусах.

Для ввода и вывода данных использовались следующие модули: МСД-200-для сбора, хранения и передачи данных, полученных с устройства; аналоговый модуль ввода-MB110-24- и одноканальный блок питания БП15Б-Д2, который предназначен для питания стабилизированным напряжением постоянного тока установки.

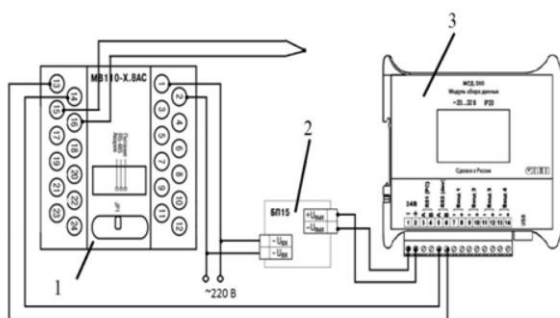


Рисунок 4.8 - Схема измерения температуры

- 1- Аналоговый модуль ввода МВ110-24, 2- Схема подключения БП15-Д2,
3- Модуль сбора данных МСД-200

4.9 Описание эксперимента

Оценка эффективности солнечного концентратора, установленного на поворотной установке, выполнялась путем измерения температуры в точке фокуса концентратора. Система настроена так, что каждые 2 минуты происходит поворот установки по азимуту и элевации, сохраняя точку фокуса постоянной, относительно концентратора.

Было проведено 4 эксперимента:

- Нагрев воды в алюминиевой банке без изоляции объемом 0,33л;
- Нагрев воды в алюминиевой банке с теплоизоляцией объемом 0,33л;
- Нагрев воды в алюминиевой банке с изоляцией объемом 0,165л;
- Нагрев стальной пластины размером 0,02*0,05 м².

Ниже приведены результаты опыта по нагреву стальной пластины размером 0,02*0,05 м² и воды в алюминиевой банке с теплоизоляцией 0,33л.

Расчет коэффициента концентрации определяется по формуле (1)

$$K = \frac{q_{\text{пр}}}{q_{\text{солн}}}$$

где K – коэффициент концентрации;

$q_{\text{пр}}$ – плотность излучения на поверхность приемника в фокальной плоскости, Вт/м²;

$q_{\text{солн}}$ – плотность солнечного излучения, Вт/м².

$q_{\text{пр}}$ вычисляется по формуле.

$$q_{\text{пр}} = \frac{Q_2 - Q_1}{(\tau_2 - \tau_1) \cdot F_{\text{пр}}}$$

где $Q_2 - Q_1$ – разность количества теплоты для интервала времени ($\tau_2 - \tau_1$);

F – площадь поверхности приемника, м²;

$C_{\text{пр}}$ – удельная теплоемкость приемника;

$m_{\text{пр}}$ – масса приемника, кг.

$$q_{\text{пр}} = \frac{2.1 - 0.38}{2 \cdot 60 \cdot 10 \cdot 10^{-4}} = 14,3 \text{ кДж/м}^2$$

$$K = \frac{14.3 \cdot 10^3}{940} = 15.2$$

Количество теплоты, использованное на нагрев воды, полученное излучением от концентратора

$$Q = C_{\text{вод}} \cdot m_{\text{вод}} \cdot (T_2 - T_1)$$

где $C_{\text{вод}}$ – удельная теплоемкость воды

$m_{\text{вод}}$ – масса воды, кг;

$$Q = 132,6 - 41,7 = 90,9 \text{ кДж}$$

Тепловая мощность в режиме нагрева воды

$$P = \frac{Q}{\tau_2 - \tau_1}$$

где P – тепловая мощность, Вт.

$$P = \frac{90.9 \cdot 10^3}{21 - 60} = 72 \text{ Вт}$$

КПД установки

$$\eta_{\text{уст}} = \frac{P}{q_{\text{солн}} \cdot K \cdot F_{\text{банки}}}$$

где P – тепловая мощность, Вт;

$q_{\text{солн}}$ – плотность солнечного излучения Вт/м²;

$F_{\text{банки}}$ – площадь поверхности банки.

$$\eta_{\text{уст}} = \frac{72}{828 \cdot 15,2 \cdot 2,2 \cdot 10^{-2}} = 0,26$$

Успешно создан солнечный концентратор, определена его эффективность. Низкий КПД солнечного концентратора, $\eta=26\%$, связан с некачественной отражающей поверхностью СК и недостаточной теплоизоляцией приемника теплоты. В дальнейшем предполагается замена

действующего отражающего покрытия на более качественное, с целью повышения КПД установки.

Максимальная температура, полученная при испытании солнечного концентратора составила 207°С

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях современного этапа развития науки и техники возрастающее значение приобретают исследования, направленные на совершенствование процессов получения и преобразования энергии из возобновляемых источников. Одним из ключевых направлений в этой области выступает солнечная энергетика, как экологически чистая, доступная и перспективная альтернатива традиционным источникам энергоснабжения. Повышение эффективности использования солнечной энергии, наряду с адаптацией соответствующих технологий к реальным условиям эксплуатации, требует системного научного подхода и глубокого анализа конструктивных, энергетических и теплотехнических аспектов функционирования соответствующих установок. Настоящая диссертационная работа была посвящена изучению одной из форм реализации солнечных теплотехнических систем, основанной на использовании параболических отражающих поверхностей, позволяющих концентрировать солнечное излучение и направлять его в фокус абсорбера. На протяжении работы осуществлён всесторонний теоретико-методологический и прикладной анализ условий функционирования таких систем, выявлены ключевые закономерности, влияющие на их эффективность, рассмотрены подходы к моделированию тепловых процессов, а также сформулированы отдельные обобщения, позволяющие определить векторы дальнейшего научного поиска. Проведённое исследование позволило раскрыть многоаспектность задачи оценки тепловых характеристик параболических солнечных коллекторов и продемонстрировать необходимость комплексного подхода, охватывающего широкий спектр факторов — от геометрических параметров и оптических условий до характеристик теплоносителя и климатических особенностей региона применения. Полученные результаты могут рассматриваться как часть общего научного направления, направленного на совершенствование технологических решений в области возобновляемой энергетики. Следует отметить, что несмотря на достигнутые результаты, настоящая работа не исчерпывает всех аспектов рассматриваемой тематики. Существует значительное поле для дальнейших исследований, в частности — в направлении экспериментальной отработки различных конфигураций концентрирующих систем, изучения новых материалов для отражающих и абсорбирующих элементов, а также применения интеллектуальных алгоритмов управления для автоматизации работы установок в зависимости от метеорологических условий. Таким образом, сформулированные положения, выводы и обобщения могут послужить основой для последующего углубления теоретических знаний и развития прикладных решений в сфере солнечного теплоснабжения. Представленные наработки обладают потенциалом для практического внедрения и дальнейшего научного развития в интересах повышения эффективности и устойчивости энергетической инфраструктуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Даффи, Дж. А. Солнечные инженерные системы / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман ; пер. с англ. — 4-е изд. — М. : Вилли, 2013. — 936 с. (*Оригинал: Duffie J.A., Beckman W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed. — Wiley, 2013.*)
- 2 Калогииу, С. А. Инженерия солнечной энергии: процессы и системы / С. А. Калогииу ; пер. с англ. — 2-е изд. — М. : Академик Пресс, 2013. — 840 с. (*Оригинал: Kalogirou S.A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press, 2013.*)
- 3 Резникова, Л. А. Солнечные системы теплоснабжения зданий / Л. А. Резникова, И. А. Резникова. — М. : АСВ, 2016. — 240 с.
- 4 Писарев, Г. И. Физические основы преобразования солнечной энергии / Г. И. Писарев. — М. : Энергоатомиздат, 2009. — 328 с.
- 5 Hachicha, A.A., Rodríguez, I., Oliva, A. Thermal performance of parabolic trough solar collectors: A detailed model and simulations // *Solar Energy*. — 2013. — Vol. 98. — P. 5–21.
- 6 Grena, R. Optical and thermal model of solar parabolic trough concentrators // *Solar Energy*. — 2007. — Vol. 81, Issue 1. — P. 62–74.
- 7 Власов, В. П. Теплопередача и гидродинамика в солнечных энергетических установках / В. П. Власов, А. М. Мазуров. — М. : Энергоатомиздат, 2011. — 384 с.
- 8 Khan, M.J., Arsalan, M.H. Design, performance and sensitivity analysis of a parabolic trough solar collector model // *Renewable Energy*. — 2020. — Vol. 147. — P. 1825–1836.
- 9 Нургалиев, А. М. Возобновляемые источники энергии : учебник / А. М. Нургалиев, Ж. К. Баймухамбетов. — Алматы : Эверо, 2021. — 376 с.
- 10 Момынов, Х. Использование солнечной энергии в энергетике Казахстана / Х. Момынов, Ж. К. Мадимаров. — Алматы : КазНТУ, 2020. — 160 с.
- 11 Ortega, J., Valenzuela, L., Zarza, E. Thermal performance of a parabolic trough collector loop: Assessment using computational models // *Energy Conversion and Management*. — 2016. — Vol. 123. — P. 258–270.
- 12 ASHRAE Handbook — HVAC Applications. Chapter 35: Solar Energy Equipment. — Atlanta : ASHRAE, 2020.
- 13 ГОСТ 32424-2013. Энергия солнечная. Коллекторы солнечные. Методика определения тепловых характеристик. — М. : Стандартинформ, 2014. — 28 с.
- 14 IEA SHC Task 49/IV. Solar Heat Integration in Industrial Processes. Final Report. — Paris : International Energy Agency, 2017. — 86 p.
- 15 Лебедев, С. В. Численные методы в теплофизике и гидродинамике / С. В. Лебедев. — СПб. : Питер, 2012. — 272 с.
- 16 Абдраимов Н. А. *Возобновляемые источники энергии: учебное пособие*. — Алматы: КазНТУ им. К. И. Сатпаева, 2019. — 235 с.

- 17 Трофимова Т. И. *Физика. Учебник для технических вузов.* – М.: Высшая школа, 2018. – 655 с.
- 18 Kalogirou S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems.* – 2nd ed. – Academic Press, 2014. – 840 p.
- 19 Мищенко А. С., Жук С. Н. *Солнечные коллекторы: теория и практика применения.* – Минск: БГУИР, 2017. – 142 с.
- 20 Goswami D. Y., Kreith F., Kreider J. F. *Principles of Solar Engineering.* – 3rd ed. – Taylor & Francis, 2015. – 904 p.
- 21 Стандарт ГОСТ Р 55594-2013. *Установки солнечного теплоснабжения. Общие технические требования.*
- 22 Fernández-García A. et al. *Parabolic-trough solar collectors and their applications.* – Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, Vol. 14, Issue 7, pp. 1695–1721.
- 23 Манаев В. А., Мироненко А. С. *Солнечные энергетические установки: учебное пособие.* – М.: Энергоатомиздат, 2016. – 274 с.
- 24 Duffie J. A., Beckman W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes.* – 4th ed. – Wiley, 2013. – 936 p.
- 25 Мусаев Д. М., Ахмедов Р. А. *Гелиоконцентраторы и солнечные печи: технологии и конструкции.* – Ташкент: ФАН, 2018. – 189 с.
- 26 IRENA (International Renewable Energy Agency). *Future of Solar Photovoltaic.* – Abu Dhabi, 2019. – 40 p.
- 27 Zhang Q., Zhao Y. *Thermal performance analysis of parabolic dish solar concentrator.* – Energy Procedia, 2017, Vol. 105, pp. 509–514.
- 28 Жуков И. А. *Математическое моделирование в солнечной теплотехнике.* – СПб.: Политехника, 2020. – 195 с.
- 29 Касымов Б. У., Алиев Ш. Х. *Использование солнечной энергии в Центральной Азии: обзор и перспективы.* – Алматы: Технополис, 2021. – 122 с.
- 30 Каримов К. А. *Солнечные высокотемпературные установки: принципы, расчёты, применение.* – Ташкент: Узбекистан, 2020. – 164 с.