

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

Институт энергетики и машиностроения

УДК620.91

На правах рукописи

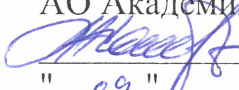
Әжібек Темірлан

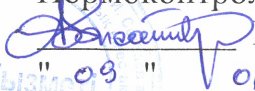
МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

На соискание академической степени магистра

Название диссертации	Разработка и исследование солнечных спиральных ресиверов при помощи компьютерного моделирования
Направление подготовки	7M0711300 – Энергетика и электротехника

Научный руководитель
Доктор PhD, ассоц.проф. кафедры
«Электроэнергетика»
 Умышев Д.Р.
" 09 " 06 2022 г.

Рецензент
Доктор PhD, ассис.проф. кафедры
«Энергетика»
АО Академия логистики транспорта
 Калиев Ж.Ж.
" 09 " 06 2022 г.

Нормоконтроль
 Бердибеков А.О.
" 09 " 06 2022 г.

ДОПУЩЕН К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой «Энергетика»,
PhD доцент, доцент профессор
Допущен к защите
НАО «КазНТУ им.К.И.Сатпаева»
" 09 " 06 2021 г.
Институт энергетики
и машиностроения

Алматы 2022

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени
К.И. Сатпаева

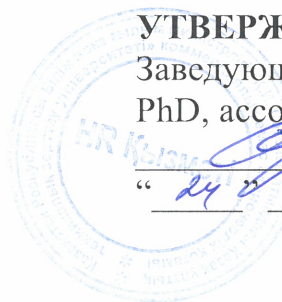
Институт энергетики и машиностроения

Кафедра Энергетики

7M0711300 – Электроэнергетика

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой Энергетика
PhD, ассоциированный-профессор
Е.А. Сарсенбаев
“ 24 ” 01 2022 г.



ЗАДАНИЕ

на выполнение магистерской диссертации

Магистранту Әжібек Темірлан

Тема: Разработка и исследование солнечных спиральных ресиверов при помощи компьютерного моделирования

Утверждена приказом Ректора Университета 1988-М от 28.10.2020 г.

Срок сдачи законченной диссертации 10.06.2022 г.

Исходные данные к магистерской диссертации:

а) анализ данных по климатическим условиям города Алматы

б) краткий обзор существующих технологий по преобразованию солнечной энергии

Перечень подлежащих разработке в магистерской диссертации вопросов:

а) разработать и исследовать модель параболического концентратора солнечной лучистой энергии

б) провести аналитический расчет спирального ресивера, исследовать параметры ресивера при помощи компьютерного моделирования в программной среде Ansys

в) провести расчет двигателей Стирлинга методом итераций согласно исходным данным для возможности преобразования солнечной энергии в электрическую

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей): _____

Рекомендуемая основная литература:

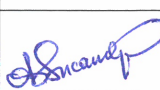
1. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. 1990.-392 с.
2. Белозерцев В.Н. Методы расчета и экспериментальные исследования тепловых машин Стирлинга: учеб. пособие / В.Н. Белозерцев, А.А. Горшкалев, С.О. Некрасова, А.А. Шиманов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 76 с.: ил.
3. Д. С. Стребков, э. В. Тверьянович солнечные электростанции концентраторы солнечного излучения

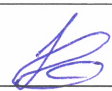
ГРАФИК
подготовки магистерской диссертации

Наименование разделов, перечень разрабатываемых вопросов	Сроки представления научному руководителю	Примечание
Солнечный потенциал Республики Казахстан – анализ данных по климатическим параметрам города Алматы	07.12.2020г.	нет
Солнечная энергетика – анализ существующих технологий концентрационной солнечной энергетики	03.05.2021г.	нет
Разработка и исследование солнечного спирального ресивера с помощью аналитического метода и компьютерного моделирования в программной среде Ansys	27.12.2021г.	нет
Теория двигателя Стирлинга – расчет двигателя Стирлинга с помощью метода итераций по методике Шмидта	27.03.2022г.	нет

Подписи

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

Наименования разделов	Научный руководитель, консультанты	Дата подписания	Подпись
Солнечный потенциал Республики Казахстан	Умышев Д.Р. Доктор PhD, ассоциированный профессор	31.05. 2022 г.	
Солнечная энергетика	Умышев Д.Р. Доктор PhD, ассоциированный профессор	31.05. 2022 г.	
Разработка и исследование солнечного спирального ресивера с помощью аналитического метода и компьютерного моделирования	Умышев Д.Р. Доктор PhD, ассоциированный профессор	31.05. 2022 г.	
Теория двигателя Стирлинга	Умышев Д.Р. Доктор PhD, ассоциированный профессор	31.05. 2022 г.	
Нормоконтролер	Бердибеков А.О. лектор	09.06.2022	

Научный руководитель  Д.Р. Умышев

Задание принял к исполнению обучающийся  Т. Әжібек

Дата " 24 " 01 2022 г.

АННОТАЦИЯ

В данной магистерской диссертации рассматривается возможность использования солнечных концентраторов в условиях климата города Алматы. В связи с чем произведен краткий аналитический обзор современных технологий по существующим солнечным концентрационным установкам.

Предложенный концентратор полезен в применении как для экономии энергоресурсов, так и для потребителей отдаленных от инженерных сетей.

Разработан солнечный параболический концентратор энергии, который можно использовать с разными приемниками. Рассматривается применение данного параболического концентратора с разработанным спиральным ресивером для преобразования тепловой энергии и получения на выходе воды температурой 85 °С для бытовых нужд.

Также рассмотрена возможность совместного использования с рассчитанным по массогабаритным исходным данным двигателем Стирлинга для осуществления генерации электрической энергии.

АНДАТПА

Бұл магистрлік жұмыста Алматы қаласының климатында күн концентраторларын пайдалану мүмкіндігі қарастырылған. Осыған байланысты жұмыс істеп тұрған күн концентрациясының қондырғыларының заманауи технологияларына қысқаша аналитикалық шолу жасалды.

Ұсынылған концентратор энергия ресурстарын үнемдеу үшін де, инженерлік желілерден қашықтағы тұтынушылар үшін де қолдануда пайдалы.

Өртүрлі қабылдағыштармен пайдалануға болатын күн параболалық қуат концентраторы жасалды. Бұл параболалық концентраторды жылу энергиясын түрлендіру және 85 °С температурадағы суды тұрмыстық қажеттіліктер үшін алу үшін әзірленген спиральды қабылдағышпен қолдану қарастырылған.

Электр энергиясын өндіруге арналған бастапқы деректердің салмағы мен өлшемі бойынша есептелген Стирлинг қозғалтқышымен бірге пайдалану мүмкіндігі де қарастырылады.

ANNOTATION

This master's thesis considers the possibility of using solar concentrators in the climate of Almaty. In this regard, a brief analytical review of modern technologies of existing solar concentrators was made.

The proposed concentrator is useful in application both for saving energy resources and for consumers remote from engineering networks.

A solar parabolic power concentrator has been developed that can be used with different receivers. The application of this parabolic concentrator with a developed spiral receiver for converting thermal energy and obtaining water at a temperature of 85 °C for domestic needs is considered.

The possibility of joint use with the Stirling engine calculated from the weight and size of the initial data for the generation of electrical energy is also considered.

СОДЕРЖАНИЕ

	Введение	11
1	Солнечный потенциал Республики Казахстан	13
1.1	Интенсивность солнечного излучения	13
1.2	Количество солнечных дней в году	13
1.3	Скорость ветра	15
1.4	Солнечная радиация	16
2	Солнечная энергетика	17
2.1	Солнечные энергетические установки	17
2.1.1	Фотоэлектрические преобразователи	17
2.1.2	Солнечные тепловые преобразователи	18
2.2	Обзор параболических концентраторов солнечной энергии	20
2.2.1	Отражающие концентраторы	20
2.2.2	Фацетные концентраторы	21
2.2.3	Параболоидный концентратор	22
2.3	Методы изготовления параболоидных концентраторов	24
2.3.1	Центробежный метод	24
2.3.2	Метод гальванопластики	24
2.3.3	Метод моллирования стекла	24
2.3.4	Изготовление отражающей поверхности из плоских изогнутых зеркал	25
2.3.5	Изготовление параболоидных концентраторов из спутниковых параболических антенн	25
2.4	Обзор существующих параболоидных концентраторов	26
2.4.1	Ripasso	26
2.4.2	Solarflux	26
2.4.3	Solar Invictus	27
2.5	Преобразователи солнечной концентрированной энергии	28
2.5.1	Фотоэлектрические модули высокой концентрации	28
2.5.2	Тепловые преобразователи солнечной энергии	29
2.5.3	Двигатель Стирлинга	29
2.5.4	Прочие тепловые двигатели	31
3	Разработка и исследование солнечного спирального ресивера с помощью аналитического метода и компьютерного моделирования	35
3.1	Геометрическая модель солнечного концентратора	35
3.2	Тепловой и оптический расчет	38
3.2.1	Тепловая эффективность солнечного концентратора	39
3.2.2	Энергетический баланс в ресивере	40
3.2.3	Тепловые потери на внешнюю конвекцию	41
3.2.4	Тепловые потери на внутреннюю конвекцию	43
3.2.5	Радиационные тепловые потери	43
3.2.6	Теплопередача от ресивера к жидкости	43

3.2.7	Эксергетический КПД солнечного коллектора	45
3.3	Гидравлический анализ	46
3.4	Компьютерное моделирование процессов	46
4	Теория двигателя Стирлинга	50
4.1	Виды двигателей Стирлинга	50
4.2	Принцип действия	50
4.3	Недостатки двигателя Стирлинга	54
4.4	Преимущества двигателя Стирлинга	55
4.5	Применение двигателей Стирлинга	56
4.6	Расчет температуры на горячей стороне	57
4.7	Методика Шмидта расчёта двигателя Стирлинга	58
4.7.1	Определение оптимального угла поворота	60
4.7.2	Расчет текущего давления в цикле	61
4.7.3	Расчёт максимального объёма горячей полости	63
4.7.4	Определение текущих объёмов рабочих полостей и построение P-V диаграммы рабочих полостей	64
4.7.5	Построение P-V диаграммы рабочих полостей	65
4.8	Подбор синхронного генератора	68
	Заключение	70
	Список использованной литературы	71

ВВЕДЕНИЕ

Экономическое развитие стран мира, а также увеличение населения планеты сопровождается быстрым ростом потребления энергии. В связи с активным использованием человечеством ископаемых энергоносителей в качестве топлива происходит увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере земли. Начиная с середины XIX века отмечается устойчивый рост количества этого газа в атмосфере, с ноября 2015 года его среднемесячная концентрация стабильно превышает 400 ppm. В мае 2020 года по данным Погодной обсерватории на Мауна-Лоа средняя концентрация CO₂ достигла очередного рекордного значения 417,1 ppm [1].

Потребление энергии растет во всем мире из-за новых тенденций в образе жизни в виде все большего использования электронных устройств. С угрозой глобального потепления и ростом стоимости энергии, тренд на использование возобновляемых и устойчивых источников энергии становятся все популярнее.

Применение солнечной энергетики в РК имеет большой потенциал, так как Казахстан имеет хорошие условия для развития этой отрасли, которое выражается – в продолжительности солнечных дней, их количестве, а также прямом солнечном излучении на поверхность.

Солнечная энергия является наиболее мощной и доступной, также как и использование солнечной энергии является лидирующей в возобновляемой энергетике. Солнечные концентраторы – это устройства, которые улавливают поступающее солнечное излучение и преобразуют его в полезное тепло. Это тепло передается рабочему телу для передачи непосредственно к потребителю, на теплообменник, либо тепловой двигатель. Уровень температуры рабочего тела определяет его эксергетические показатели, также основополагающим фактором является массовый расход рабочего тела.

В этой магистерской работе рассматривается недорогая солнечная антенна со спиральным ресивером в ее фокусе, описаны конструкция и ее преимущества. В этой работе основное внимание было уделено теплообменным процессам, возможности использования солнечной концентрированной энергии для бытовых нужд.

Актуальность работы

Вопрос ВИЭ является актуальным по причине возможности экономии энергоресурсов и чистой генерации энергии, а также низкой плотности населения и отдаленности от электросетей в отдельных регионах Казахстана. Преобразование солнечной энергии в тепло и электричество является необходимым, прежде всего для автономных потребителей. Экономически же обоснованным является строительство станции для энергоснабжения потребителей, удаленных от электрических сетей более чем на 50 км.

Целью работы является разработка и исследование установки с солнечным параболическим концентратором и спиральным ресивером для преобразования солнечной лучистой энергии в тепловую, а также расчет

двигателя Стирлинга заданных характеристик для возможности генерации электроэнергии посредством концентрированной энергии Солнца.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести сбор и анализ информации климатическим параметрам города Алматы;
- провести патентный поиск и конструктивный анализ по существующим технологиям генерации тепловой и электроэнергии от концентрированного солнечного излучения;
- провести аналитический расчет солнечного параболического концентратора и спирального ресивера;
- провести компьютерное моделирование спирального ресивера в программной среде Ansys;
- произвести расчет двигателя Стирлинга по исходным данным.

Объект исследования: Солнечные концентрационные установки для генерации электроэнергии и тепла

Предмет исследования: Анализ влияния факторов и методы повышения КПД установок, разработка нового образца спирального ресивера с помощью компьютерного моделирования.

Методы исследования: Большую роль в данной работе имеет аналитический метод исследования, благодаря которому произведен расчет большей части работы. Также стоит отметить метод итераций при решении задач с двигателем Стирлинга.

Для проектирования 3D моделей исследуемых деталей использовалась программа Solidworks. Компьютерное модулирование тепловых процессов было произведено в программной среде Ansys. Расчеты произведены – для 3 главы в Mathcad, 4 главы с помощью MS Excel.

Научная новизна: Разработка параболического концентратора и спирального ресивера нового образца, с соответствующими характеристиками.

Научные статьи и публикации. По теме диссертации опубликованы 2 статьи в «Сатпаевских чтениях 2021», а также «Сатпаевских чтениях 2022».

Объем диссертации: Диссертация состоит из 72 страниц, 40 иллюстраций, и 91 формулы. Список использованной литературы состоит из 25 наименований.

1 Солнечный потенциал Республики Казахстан

1.1 Интенсивность солнечного излучения

Казахстан, являясь крупнейшей центральноазиатской республикой, имеет большой потенциал солнечной энергетики, количество прямой солнечной радиации на всей территории Республики Казахстан составляет более $2 \cdot 10^6$ тераватт в год.

Количество солнечных часов в год составляет 2200–3000, а энергия солнечного излучения равняется 1300–1800 кВт/м²/год [2] (рисунок 1).

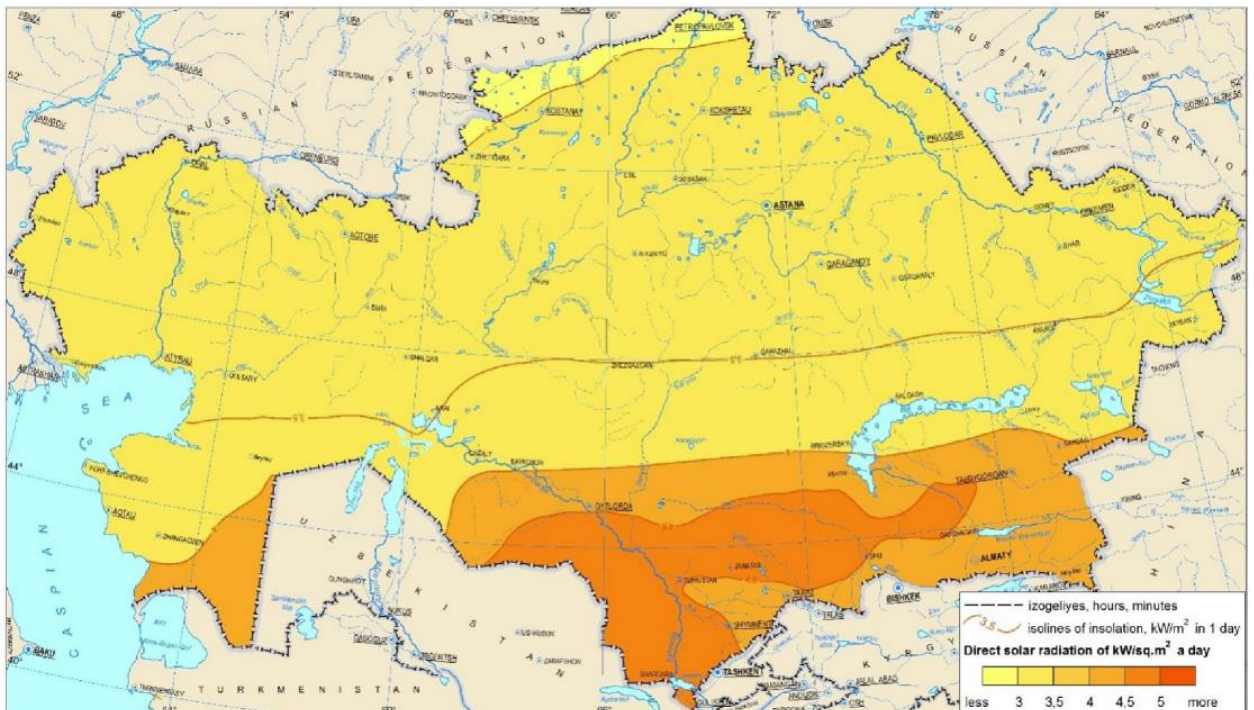


Рисунок 1 – Среднедневная величина прямой солнечной радиации в году, кВт·ч/м² в день

1.2 Количество солнечных дней в году

Также важным параметром для генерации солнечной энергии является число солнечных дней в году, а также средняя продолжительность светлого времени суток.

Был сделан сравнительный анализ массива данных [3], на основании которых были построены диаграммы «соотношение солнечных, облачных и

пасмурных дней» (рисунок 2), а также «среднесуточное количество солнечных часов» (рисунок 3).

Данные были обобщены и занесены в таблицу 1 – которая отображает количество благоприятных дней для солнечной генерации энергии.

Таблица 1 – Характеристики солнечного излучения в Алматы

Наименование параметра	Количество	Единица измерения
Солнечные часы	2162,3	час
Солнечные дни	232	день
Пасмурные дни	86	день
Облачные дни	43	день

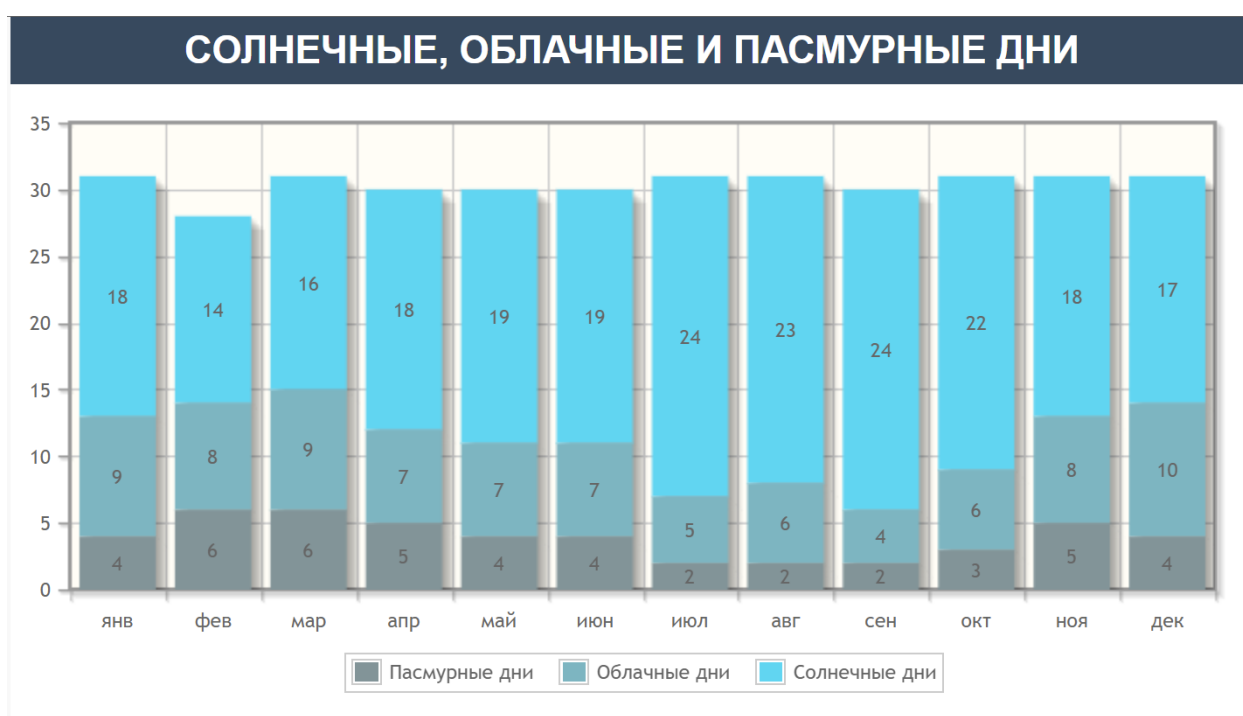


Рисунок 2 – Соотношение солнечных, облачных и пасмурных дней

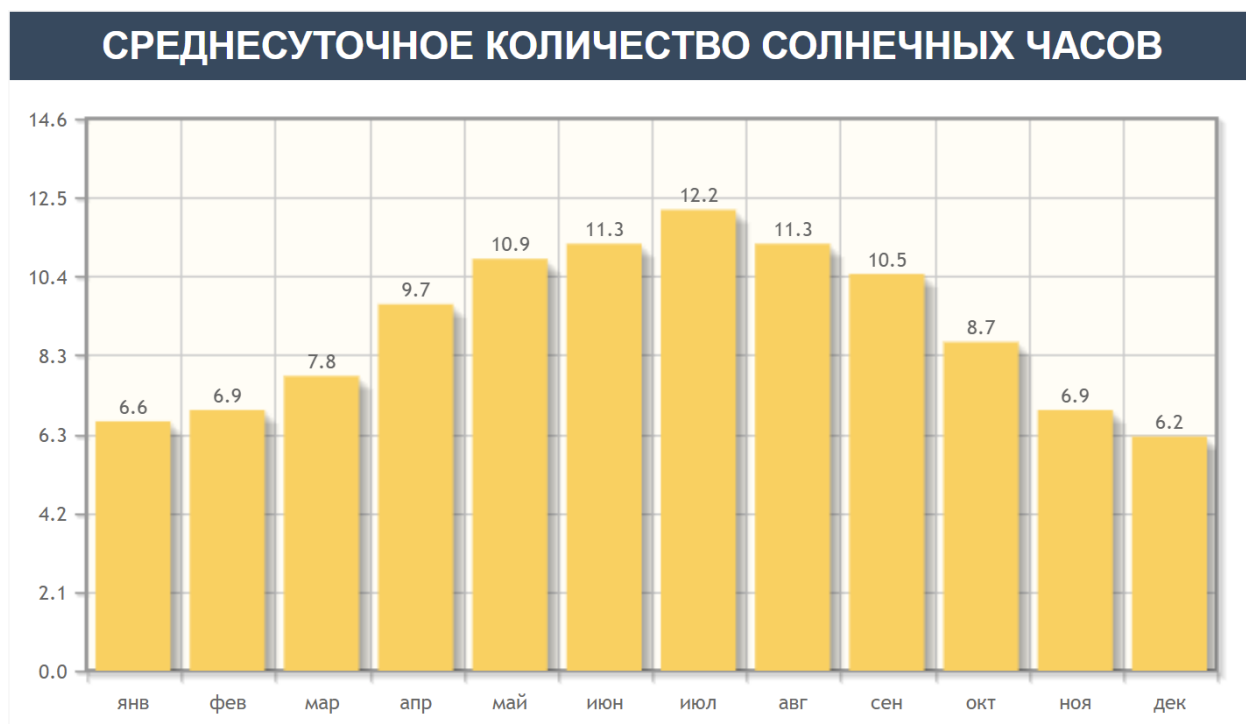


Рисунок 3 – Среднесуточное количество солнечных часов

1.3 Скорость ветра

Немаловажным фактором в данной работе является среднегодовая скорость ветра, так как от этого фактора будут зависеть тепловые потери при естественной конвекции в окружающую среду. На рисунке 4 представлена средняя скорость ветра в Алматы в зависимости от месяца, среднегодовая же скорость ветра составляет – 1,94 м/с, данное значение будет использоваться в дальнейших расчетах.



Рисунок 4 – Средняя скорость ветра в Алматы по месяцам

1.4 Солнечная радиация

Солнце – сердце нашей системы, считающееся самым мощным источником энергии в энергетическом контексте, имеющее сферическую форму и диаметр 1,39 млн км. Имеет очень большой, однако конечный размер – по этой причине угловой диаметр Солнца составляет $0,53^\circ$, иначе $32'$.

Солнечное излучение представляет собой непрерывный поток лучистой энергии от поверхности Солнца и во всех направлениях от поверхности земли.

Солнечный свет — это вид электромагнитного излучения с длиной волны от 0,3 мкм (6-10 м) до более 3 мкм, который состоит из ультрафиолетового (менее 0,4 мкм), видимого (0,4 мкм и 0,7 мкм) и инфракрасного излучения (более 0,7 мкм). Большая часть этой энергии видна и сконцентрирована в ближнем инфракрасном диапазоне. Солнечного излучение, иногда называемое инсоляцией, измеряется как излучение или энергия в единицу времени (кВт/м²) на единицу площади. Анализ данных метеостанций г. Алматы показал, что среднегодовая величина солнечной радиации в г. Алматы составляет 1459,33 кВт/м² [4].

2 Солнечная энергетика

2.1 Солнечные энергетические установки

Солнечные электростанции предназначены для преобразования энергии солнечного излучения в тепло и электричество. Существуют следующие типы:

1) Фотоэлектрические (PV) преобразователи – используются для прямого преобразования электроэнергии за счет фотоэлектрического эффекта.

2) Тепловые (CSP) – предназначены для получения тепловой энергии для её дальнейшего использования или преобразования в другие виды энергии.

3) Установки для одновременного производства электричества и тепла (3GEN), которые также называются тригенерационными, так как на выходе производят холодную, горячую воду, а также электричество.

2.1.1 Фотоэлектрические преобразователи

Фотоэлектрические преобразователи делятся на электровакуумные и полупроводниковые. Работа устройства основана на излучении фотоэлектронов или внутреннем фотоэффекте. В настоящее время фотоэлектрические модули на основе кремния (монокристаллические и поликристаллические) являются наиболее распространенным типом, но активно изучаются модули на основе перовскита, которые имеют более высокий КПД, чем кремний, но меньшую стабильность. Отдельные фотопреобразователи в солнечной панели соединены друг с другом для получения достаточного количества электроэнергии. На рис. 5 показана солнечная система на основе кремниевых панелей.

Помимо солнечных модулей, для выработки электроэнергии требуется инвертор, в некоторых случаях также аккумулятор и солнечный трекер.



Рисунок 5 – Солнечная фотоэлектрическая установка

2.1.2 Солнечные тепловые преобразователи

Используются четыре системы [5], которые выполняют преобразование солнечной энергии в тепловую за счет концентрации солнечного излучения для получения рабочего тела нужных параметров, который преобразуется в электрическую энергию, как показано на рисунке 6:

- А) линейные отражатели Френеля (LFC);
- Б) параболические желоба (PTC);
- В) центральные приемники (Tower);
- Г) параболические тарелки (DC).

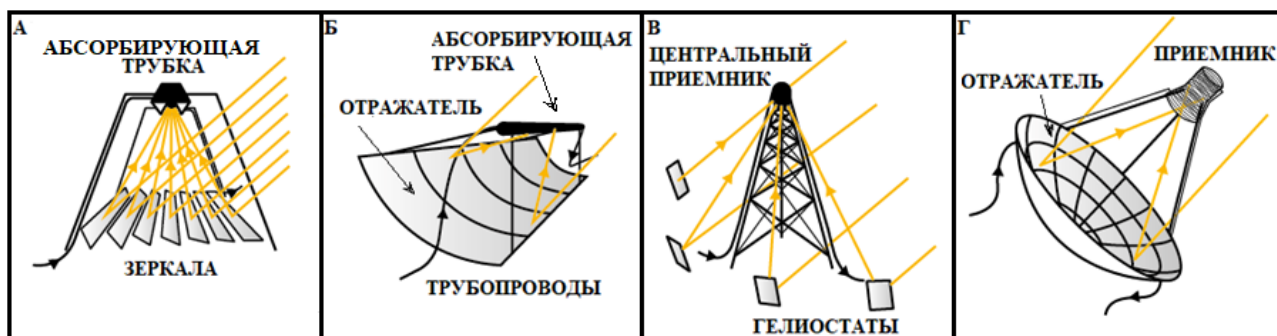


Рисунок 6 – Технологии CSP

Данные технологии CSP можно классифицировать по тому, как они фокусируют солнечные лучи и по типу приемника как показано в таблице 2.

Таблица 2 – Технологии CSP

	Линия фокуса	Точка фокуса
Фиксированный приемник	Линейные рефлекторы Френеля	Центральный приемник (башня)
Мобильный приемник	Параболические желоба	Параболические тарелки

В предлагаемой работе основное внимание уделяется параболическим (DC) параболическим концентраторам, которые считаются одним из наиболее перспективных применений солнечной энергии в этой области [6], поскольку обладают большим потенциалом и представляют собой более дешевую альтернативу фотоэлектрическим преобразователям и другим CSP. Совмещенная с тепловым двигателем, такая установка является лучшей альтернативой существующих CSP с точки зрения производительности, осуществимости и возможности использования с автономными пользователями.

В таблице 3 представлены основные характеристики эффективности систем концентрации солнечной энергии.

Таблица 3 – Характеристики систем концентрации солнечной энергии (CSP) [6]

Система	Пиковая эффективность (%)	Годовая эффективность (%)	Годовой коэффициент использования (%)
Желоб/линейный Френель	21	10-12 (д) 14-18 (п)	24 (д)
Солнечная башня	23	14-19 (п)	25-70 (п)
Тарелка с генератором	34	18-23 (п)	25 (п)

Примечание: (д) демонстрируемая, (п) прогнозируемая, исходя из опытно-промышленных испытаний.

На рисунке 7 изображена предполагаемая схема работы солнечных концентраторов для получения тепловой и электрической энергии. В этой схеме для получения тепловой энергии используется спиральный ресивер нового образца, а электроэнергия производится благодаря тепловому двигателю.

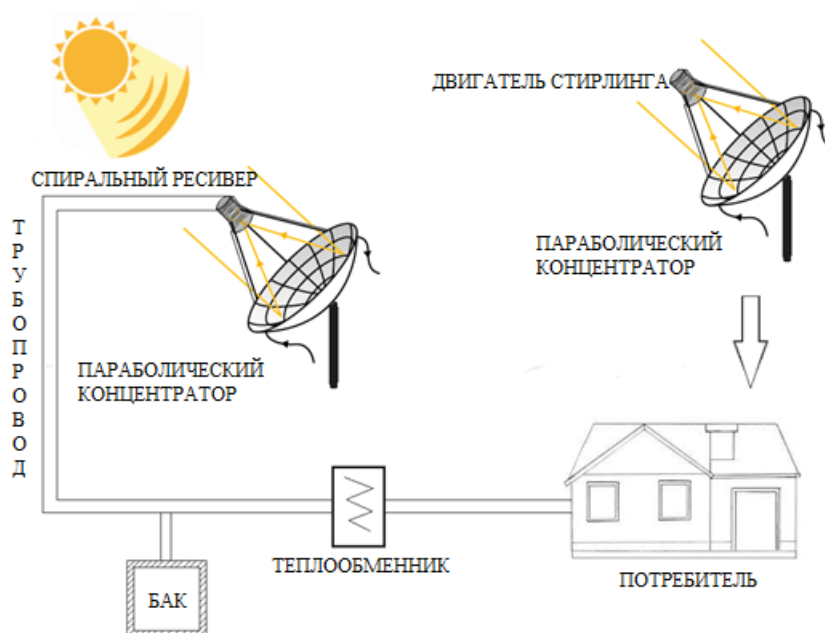


Рисунок 7 – Предполагаемая модель генерации электрической и тепловой энергии с помощью параболических концентраторов

2.2 Обзор параболических концентраторов солнечной энергии

Основным функциональным назначением концентраторов солнечной радиации, является повышение концентрации излучения, принимающей на земле среднее значение 1366 Вт/м, до уровня, обеспечивающего эффективное преобразование данного значения. Концентраторы нашли применение во многих сферах деятельности. Например, существуют металлургические установки, которые способны плавить тугоплавкий металл, а температура в фокусе составляет 3500 градусов Цельсия. Используются концентраторы также для нагрева воды и приготовление еды в странах с малым достатком и позолительным климатом. Наконец, концентрационные установки используются с различными тепловыми двигателями для генерации электроэнергии.

Основополагающим показателем является коэффициент концентрации C_{con} – который является отношением среднего значения плотности сконцентрированного лучистого потока к плотности солнечного излучения в плоскости, перпендикулярной его распространению. Также этот коэффициент характеризуется отношением площадей концентратора и ресивера соответственно.

2.2.1 Отражающие концентраторы

Рефлекторы являются производными вторичных кривых вращения, называемых оптическими системами, состоящими из конических окружностей. Они могут быть параболической, конической и других форм. Кроме отдельных концентраторов применяют также системы, состоящие из нескольких контуров: Кассегрена, Ньютона и др. На рисунке 8 показан существующий проект, основанный на этом принципе.

Двухзеркальные системы Кассегрена позволяют концентрировать излучение в направлении, соответствующем направлению солнечного света, но сложность изготовления зеркал ограничивает их применение. В ньютоновских системах основное параболическое зеркало фиксировано. Излучение передается на него подвижным плоским зеркалом. Этот принцип используется в больших солнечных печах для достижения высоких температур в очаге.

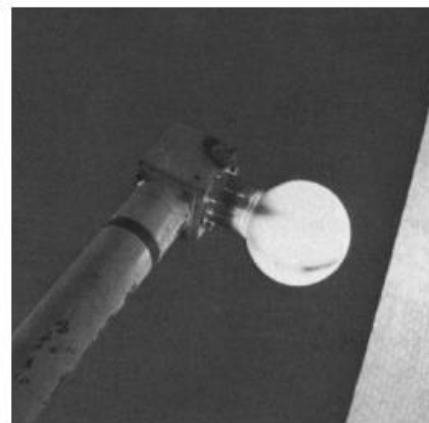


Рисунок 8 – Отражающие концентраторы Quwait Dishes

2.2.2 Фацетные концентраторы

Фацетными называются концентраторы – отражающая поверхность которых представляет собой комбинацию множества отдельных, в основном плоских зеркал. Поверхности таких концентраторов можно получить, упростив их, разбив на несколько секторов в виде окружностей, составленных из зеркал, отражающих поверхность второго порядка. На рис. 9 показан тип концентратора IBM.

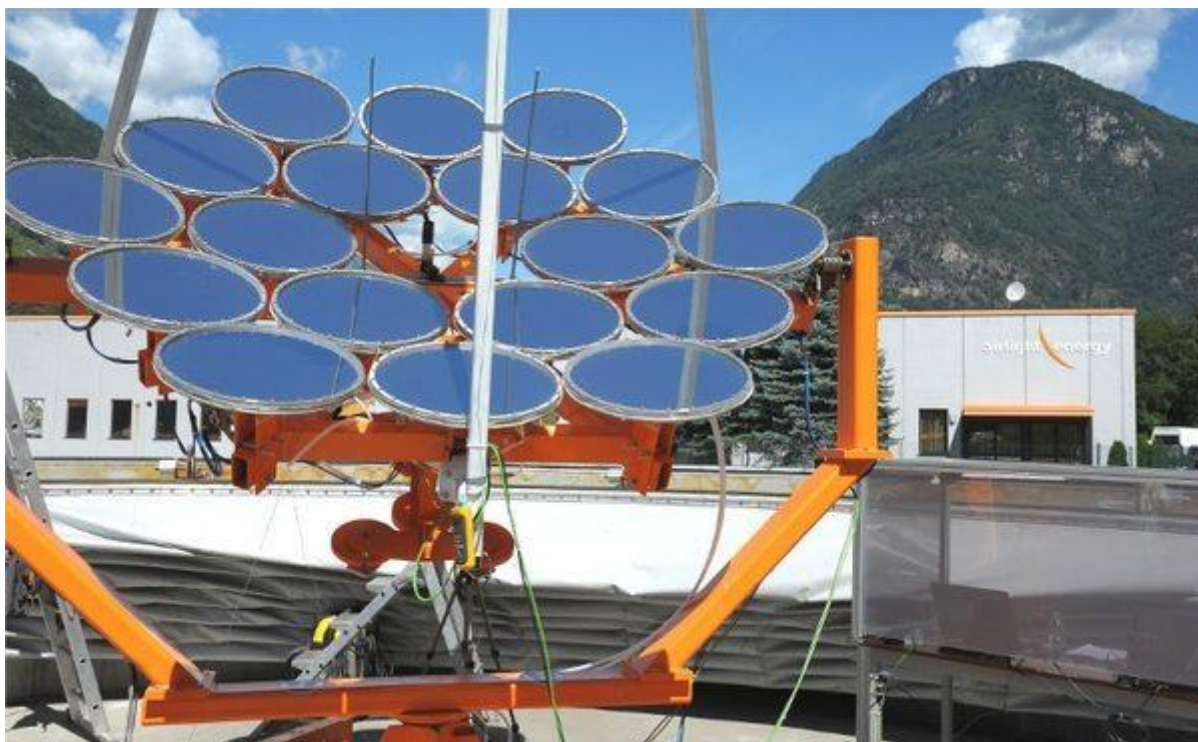


Рисунок 9 – Фацетный концентратор производства IBM

2.2.3 Параболоидный концентратор

В данной работе рассматривается параболоидный концентратор, поэтому остановимся на нем подробнее.

Форма отражающей поверхности параболоида образуется за счет вращения параболы вокруг оси симметрии [7]. Одним из свойств параболы является концентрация всех падающих световых лучей на главной оптической оси (оси симметрии) в фокус F, где параболоид создает изображение удаленного предмета в фокальной плоскости. Тарелка с такими оптическими свойствами обладает большой способностью концентрировать солнечную энергию.

Кратко рассмотрим появление света в фокальной точке параболоида, которое нам необходимо для оценки качества поверхности концентраторов, расчета излучения в фокальных зонах и сравнения внешнего вида точки отражения и засветки. системы линз.

На рисунке 10 показано формирование параболоидного фокуса: Угловая величина ($2\varphi = 32$ угл. мин. или $2 \times 0,004654$ рад). Элементарный солнечный свет отражается от поверхности концентратора и падает на фокальную плоскость, где след создает эллипс с осью радиуса (1):

$$a = \frac{p\varphi_0}{(1+\cos u)\cos U}, b = \frac{p\varphi_0}{(1+\cos U)}, \quad (1)$$

где $p=2f$ – фокальный параметр параболы;
 f – фокусное расстояние.

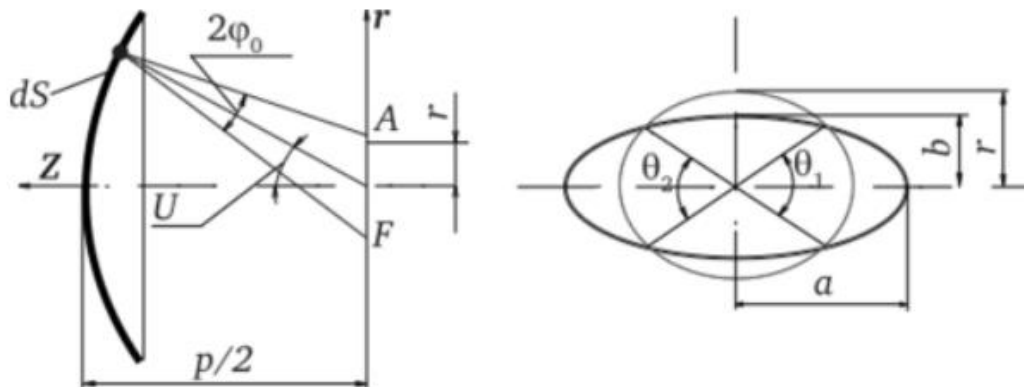


Рисунок 10 – Схема формирования фокального пятна в фокусе параболоидных концентраторов

От разных радиальных зон концентратора (с разными углами u) эллипсы имеют разные размеры, которые формируют плотность фокального облучения. Приближённой оценкой максимальной плотности излучения в фокусе является подсчёт по формуле (2):

$$E_F = p_{\text{отр}} \frac{1}{\varphi_0^2} \sin^2 U_m E_0, \quad (2)$$

где $p_{\text{отр}}$ – коэффициент отражения концентратора;

φ_0^2 – угол раскрытия элементарного солнечного луча;

U_m – наибольший угол раскрытия параболоида на сторону (утл. град.);

E_0 – плотность солнечной радиации (Вт/м²).

Несовершенство поверхности концентратора приводит к размытию пятна. Освещённость в фокальном пятне (E_F) описывается кривой нормального распределения Гаусса (3-5):

$$E_T = E_{\text{max}} e^{-cr^2}, \quad (3)$$

$$E_{\text{max}} = \left(\frac{180}{\pi}\right)^2 E_0 p_{\text{отр}} h^2 \sin^2 U, \quad (4)$$

$$c = 3,283 \cdot 10^3 \left(\frac{h}{p}\right)^2 (1 + \cos U)^2, \quad (5)$$

где r – радиус в фокальной плоскости;

h – мера точности концентратора.

Считают известными фокусное расстояние f и угол полураскрытия u_m , откуда получают диаметр концентратора (6):

$$D = \frac{4f \sin U_m}{1 + \cos u_m}. \quad (6)$$

Оптимальное значение u_m , при котором средний коэффициент концентрации будет максимальным, равно 45° при достигаемой концентрации $K_{\text{max}}=11300$ крат, а облученность в фокусе концентратора (7):

$$E_f^{\text{ид}} = R_s \frac{1.2}{\varphi_0^2} \sin^2 U_m E_0, \quad (7)$$

где R_s – интегральный коэффициент пропускания системы;

φ_0^2 – угловой радиус Солнца, равный 0,004654 рад;

E_0 – плотность прямой солнечной радиации.

2.3 Методы изготовления параболоидных концентраторов

2.3.1 Центробежный метод

Суть метода основана на свойстве жидкостей растекаясь при действии центробежной силы при равномерном вращении создавать равномерные поверхности (рис. 11). Таким образом легкий материал выливается в симметрично вращающуюся жидкость тяжелее, которая затвердевает в самом процессе.

В результате получается выпуклая исходная форма с гладкой поверхностью высокой чистоты, созданная разделением двух жидкостей.

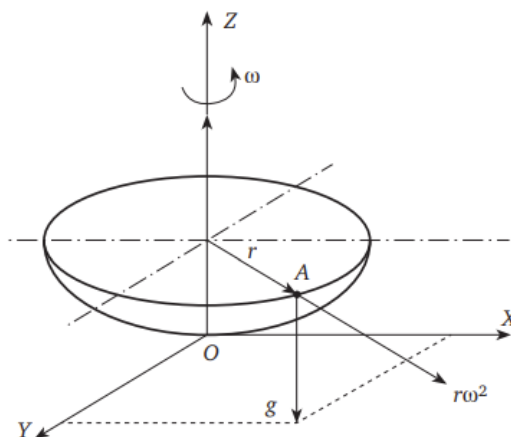


Рисунок 11 – Схема образования параболоидной формы поверхности жидкости при вращении

2.3.2 Метод гальванопластики

Электроформовка позволяет изготавливать высокоточные легкосплавные концентраторы любых размеров. На матрицу химическим способом наносится токопроводящий слой серебра с требуемым рисунком и высоким классом чистоты отражающей поверхности, а также электрохимическим способом - металлический слой заданной толщины. К полученной копии прикрепляют упрочняющую рамку, затем копия отделяется от матрицы. С помощью этого метода можно изготовить концентратор с распределением энергии в фокусной точке. Чаша для изложниц выполнена в виде отдельных кольцевых сосудов, в которых слитки изготавливаются раздельно с изменением точки поворота чаши на требуемый размер. Литое поле всех секций кольца, объединенных в матрицу.

2.3.3 Метод моллирования стекла

Процесс гибки заключается в сгибании листового стекла в параболоидную поверхность в специальных нагревательных печах (рисунок 12). В этих печах стекло нагревается и становится пластичным, далее формуется при помощи веса

или вакуума. Стекло кладется на поверхность, состоящую из металлического основания, на которое крепятся различные настроечные планки, которые и задают форму стеклу. Благодаря такому методу можно изготавливать концентраторы любой формы.

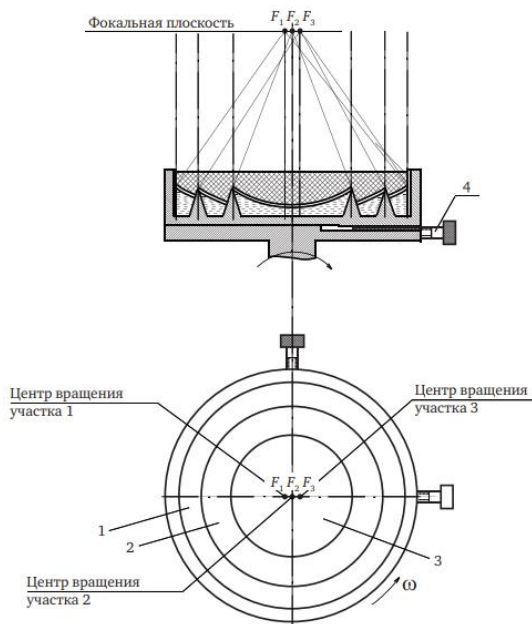


Рисунок 12 – Способ отливки матрицы с заданным распределением облученности в фокальном пятне

2.3.4 Изготовление отражающей поверхности из плоских изогнутых зеркал.

Метод отклонения от плоских зеркал впервые применил французский исследователь Ф. Тромб для получения крупных концентраторов с высочайшими оптическими свойствами. В этом методе стекло изгибают вдоль опор по краям, прикладывая усилие к центру стекла, причем величина изгиба должна быть в пределах диапазона упругих прогибов.

2.3.5 Изготовление параболоидных концентраторов из спутниковых параболических антенн

В настоящее время среди стран с малым достатком популярны параболические концентраторы, изготовленные с низкими характеристиками, тем не менее температурой пригодной для нагрева воды либо приготовления пищи. Такого типа солнечные установки обычно изготавливаются из спутниковых параболических антенн, путем покрытия их отражающей поверхностью.

Солнечные параболические установки для приготовления пищи весьма популярны в Индии, а выходные характеристики являются достаточными для приготовления еды в виду палящего Солнца и особенностей климата.

2.4 Обзор существующих параболоидных концентраторов

2.4.1 Ripasso

На данный момент существует единственный рабочий экземпляр Ripasso (рисунок 13) солнечного концентратора с подобными характеристиками, но его создатели надеются, что система войдет в число самых востребованных возобновляемых источников на планете [8]. Устройство оснащено зеркальным отражателем с общей площадью 100 м², гигантский диск вращается вслед за движением солнца и постоянно подстраивается для извлечения максимума солнечной энергии.

Независимые от проекта испытания показали, что такой отражатель может производить от 75 до 85 мегаватт-часов «зеленой» энергии в год – этого достаточно для обеспечения энергией в среднем десяти домов в течение года. Для сравнения: при производстве такого количества электроэнергии из угля, сжигаемого на ТЭЦ, в атмосферу выбрасывается 81 тонна CO₂.

2.4.2 Solarflux

Компания Solarflux, (рисунок 14) специализирующаяся на производстве параболических гелиоконцентраторов, разработала новую модель – FOCUS, преобразующую 72% солнечной энергии в полезное, то есть полезное тепло [9].

Эти характеристики были подтверждены испытаниями, проведенными Центром энергетических исследований Университета Лихай в Пенсильвании, США. Испытания проводятся в соответствии с отраслевым стандартом ASTM E905-87, определяющим правила оценки производительности солнечных концентраторов.



Рисунок 13 – Солнечный коцентратор Ripasso



Рисунок 14 – Солнечный концентратор компании Solarflux

2.4.3 Solar Invictus

Тарелка Solar Invictus от ZED Solar [10] (разработанная AEDesign) представляет собой параболический концентратор диаметром 9 м (рисунок 15). Зеркала лепестковые, с двумя кольцами по 15 зеркал, соединенных между собой радиальными фермами, закрепленными на цилиндрической ступице. Общая масса несущей конструкции сведена к минимуму за счет использования конструктивных свойств зеркал. В остальном конструкция представляет собой

обычное отслеживание по азимуту и углу места, Zed Solar построила свои первые два прототипа тарелок в Лахоре, Пакистан, в 2010 и 2012 годах.

Компания поставила прототип тарелки компании Cleanergy в Омоле, Швеция, в 2012 г., еще 10 тарелок для пилотного проекта Cleanergy в Дубае в 2014 году, а также опытный образец с паровым ресивером, предназначенным для повышения нефтеотдачи в Абдали, Кувейт, 2016 г.



Рисунок 15 – Солнечные концентраторы Zed Solar

Помимо описанных выше моделей солнечных концентраторов, существует еще десяток интересных, таких как Suncatcher или Eurodish которые имеют весьма хорошие показатели преобразования энергии. Промышленные образцы могут использовать различные преобразователи энергии, однако стоит отметить, что в большинстве проектов для преобразования в электрическую энергию используется двигатель Стирлинга.

2.5 Преобразователи солнечной концентрированной энергии

2.5.1 Фотоэлектрические модули высокой концентрации [11]

Большинство обычных солнечных элементов не способны преобразовывать длинноволновые фотоны и высокотемпературное излучение в электричество. Группа исследователей во главе с Мэтью Лэмбом из Университета Джорджа Вашингтона надеется изменить эту ситуацию и таким образом получить больше энергии. Ученые разработали солнечный элемент, способный поглощать почти всю энергию солнечного спектра — и с КПД 44,5% он может стать самым эффективным фотоэлектрическим элементом в мире.

Предлагаемый процесс отличается от солнечных панелей, которые обычно устанавливаются на чердаках или на наземных солнечных электростанциях. В новом устройстве используются концентрические фотоэлектрические (CPV) панели, которые используют солнечные концентраторы для концентрации солнечного света через специальные линзы в микроэлементы.

Для солнечного света такая ячейка служит своеобразным ситом, так как каждый слой поглощает определенный набор длин волн, что в итоге позволяет захватить почти половину доступной энергии, в то время как большинство традиционных ячеек поглощают лишь одну четверть.

Однако данная технология только проходит апробацию.

2.5.2 Тепловые преобразователи солнечной энергии

Приемники, которые используются с солнечными концентраторами для получения тепловой энергии представляют собой конструкции различных форм, размеров и материалов, изготовленные из трубок, по которым течет рабочая жидкость [12]. Такие приемники изготавливают таким образом, чтобы получить максимальное количество переданной жидкости тепловой энергии, поэтому зачастую имеют форму – различных вариаций архимедовой спирали (рисунок 16).

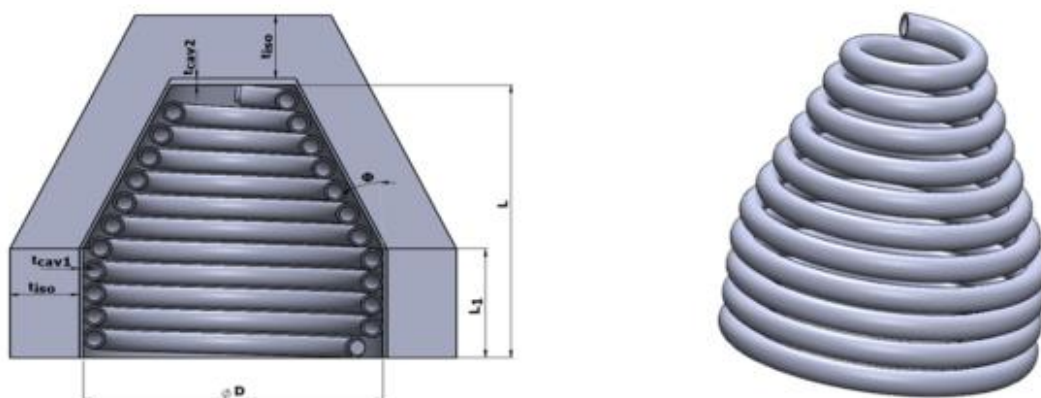


Рисунок 16 – Цилиндрически-конический приемник тепла

2.5.3 Двигатель Стирлинга

Двигатель Стирлинга – тепловой двигатель, работающий за счет циклического сжатия и расширения воздуха или другого газа (рабочего тела) при различных температурах, в результате чего происходит чистое преобразование тепловой энергии в механическую работу (рисунок 17) [13].

В частности, двигатель Стирлинга представляет собой тепловую машину замкнутого цикла с постоянным газообразным рабочим телом. В этом контексте замкнутый цикл относится к термодинамической системе, в которой рабочая жидкость постоянна в системе, и описывает использование регенеративного внутреннего теплообменника и накопителя тепла, называемого регенератором.

Фактически, добавление регенератора отличает двигатель Стирлинга от других двигателей с горячим воздухом замкнутого цикла.

В двигателе Стирлинга газ нагревается и расширяется за счет энергии, поступающей извне двигателя (цилиндра). Затем он переходит в другое место в охлажденном и сжатом двигателе. Поршень (или несколько поршней) перемещает газ в нужные положения в двигателе во время правильного цикла и высвобождает из него механическую энергию. Газ колеблется между этими зонами нагрева и охлаждения, меняя в процессе температуру и давление. Особенность: Регенератор, выступающий в роли промежуточного резервуара, сохраняет тепло в автомобиле, а не возвращает его в радиатор, что повышает его эффективность.

Тепло подается извне, поэтому горячую часть двигателя можно нагреть от любого внешнего источника тепла. Точно так же охлаждающей части двигателя может помогать внешний радиатор, такой как проточная вода или воздушный поток. Газ постоянно хранится в двигателе, что позволяет использовать газы с наиболее благоприятными свойствами, такие как гелий или водород. Впускных и выпускных газов нет, поэтому машина почти бесшумная.

Двигатель Стирлинга – лучший вариант для использования с параболическим концентратором, поскольку имеет высокий КПД, надежность и простую конструкцию не требующую частого обслуживания. Окружающая среда может действовать как охладитель, а солнечное излучение, сконцентрированное в фокусе, может действовать как обогреватель. Это делает двигатель Стирлинга популярным для производства электроэнергии. Таких двигателей мощностью от десятков до десятков тысяч ватт существует большое количество, а КПД двигателя Стирлинга зависит от перепада температур и может составлять 65-70 %.



Рисунок 17 – Рабочий образец двигателя Стирлинга

2.5.4 Прочие тепловые двигатели

1) Героторный преобразователь энергии [7] представлен на рисунке 18. Американская компания Ener-G-Rotors разработала систему на основе цикла Ренкина, в которой рабочая жидкость с низкой температурой кипения проходит через теплообменники, испаряется и с высоким давлением паров поступает в героторную расширительную машину (ГРМ), где пары выполняют работу, преобразуемую генератором в электричество. При достижении давления паров 1 атм, они выходят из ГРМ в холодный теплообменник-конденсатор, после чего жидкость поступает в горячий теплообменник. Героторный преобразователь имеет внутренний ротор с n зубцами и внешний ротор с $n+1$ впадинами, которые вращаются вокруг соответствующих осей. Расположение роторов жёстко определено эксцентриситетом между ними. Синхронизирующий механизм обеспечивает их вращение в одном направлении без соприкосновения. Такой генератор имеет мощность 5 кВт. Недостатками является большая стоимость, а также массогабаритные показатели данной установки.

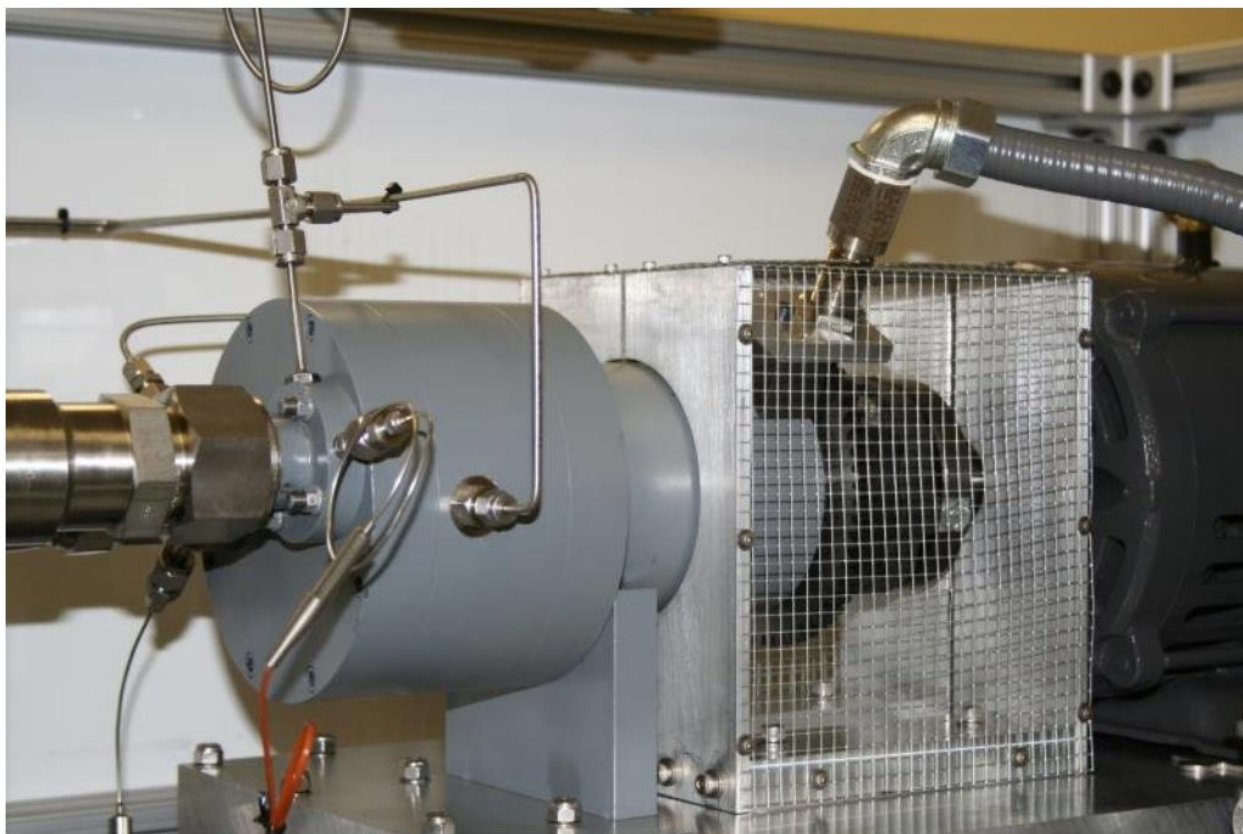


Рисунок 18 – Героторный двигатель

2) Термоэлектрический преобразователь энергии Джонсона [14] или JTЭС представляет собой тип твердотельной тепловой машины, в которой используется электрохимическое окисление и восстановление водорода в двухэлементном тепловом цикле, который приближается к циклу

Эрикссона. Он исследуется как жизнеспособная альтернатива обычному термоэлектрическому преобразованию. Его изобретатель Лонни Джонсон утверждает, что преобразователь демонстрирует эффективность преобразования энергии до 60%, однако это утверждение находится на теоретическом уровне, основанном на сравнении с циклом Карно, и предполагает температурный градиент 600 °С, что и является главным недостатком.

Схема устройства JTЭС показана на рисунке 19. В устройстве есть горячая сторона (справа) и холодная сторона (слева). Каждая сторона содержит блок мембранных электродов (МЕА), состоящий из протонпроводящей мембраны и пористых металлических электродов сверху и снизу. Протонпроводящие мембраны разделяют области, содержащие газообразный водород (H_2) с разным давлением, и они проницаемы для протонов (H^+), но в значительной степени непроницаемы для газообразного H_2 . Нижняя область содержит высокое давление, а верхняя область содержит низкое давление.

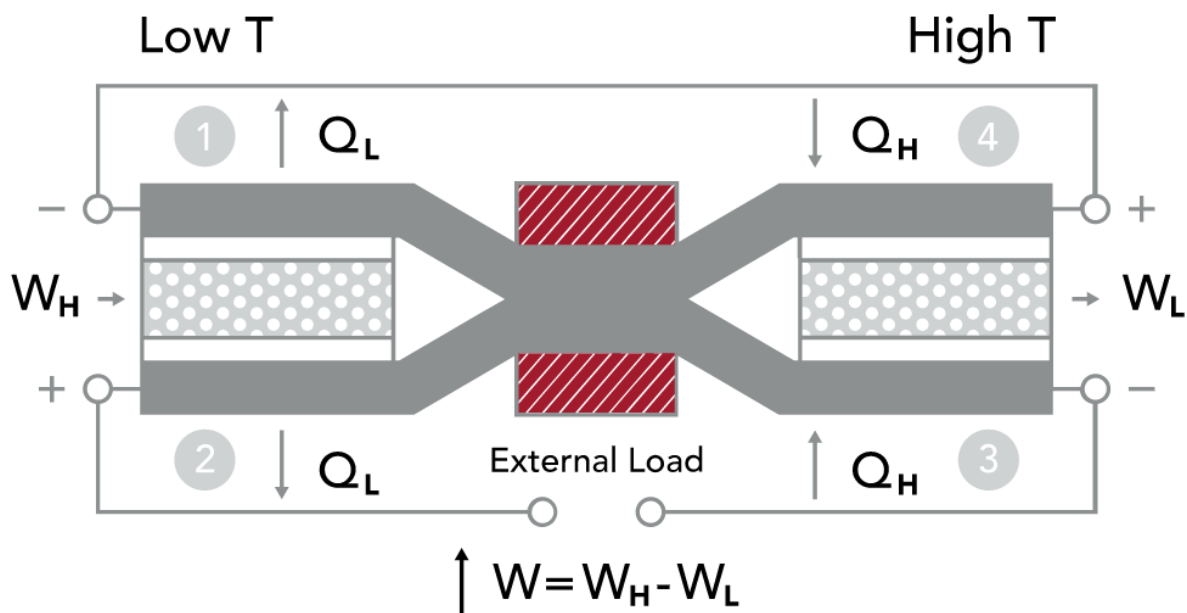


Рисунок 19 – Преобразователь JTЭС

Во время работы газообразный H_2 на горячей (правой) стороне устройства окисляется в области высокого давления, образуя при этом ионы H^+ проходят через мембрану и восстанавливаются до H_2 в области низкого давления. Это самопроизвольный процесс, обусловленный градиентом давления. Одновременно реакция протекает в обратном направлении на низкотемпературной (левой) стороне: газообразный H_2 окисляется в области низкого давления, образуя ионы H^+ проходят через мембрану и восстанавливаются до H_2 в области высокого давления. Этот процесс не является

самопроизвольным, но часть напряжения, создаваемого на горячей стороне, используется для запуска этого процесса на холодной стороне. Причина, по которой это устройство может работать, заключается в том, что напряжение холостого хода (V_{oc}), создаваемое на высокотемпературной стороне, больше, чем требуется для запуска обратной реакции на низкотемпературной стороне. Таким образом, устройство работает за счет непрерывного перемещения газообразного водорода от высокого к низкому давлению и обратно, а избыточная электрическая энергия, вырабатываемая в ходе этого процесса, может быть использована для выполнения полезной работы. Устройство использует сильно обратимые электрохимические реакции и перепад температур для повышения давления газа, что может привести к эффективному преобразованию тепловой энергии в электрическую.

3) Турбина Тесла – безлопастная центростремительная турбина (рисунок 20), запатентованная Николой Теслой в 1913 году [15]. Её часто называют безлопастной турбиной, поскольку в ней используется эффект пограничного слоя, а не давление жидкости или пара на лопатки, как в традиционной турбине. Турбина Тесла также известна как турбина пограничного слоя и турбина слоя Прандтля (в честь Людвига Прандтля).

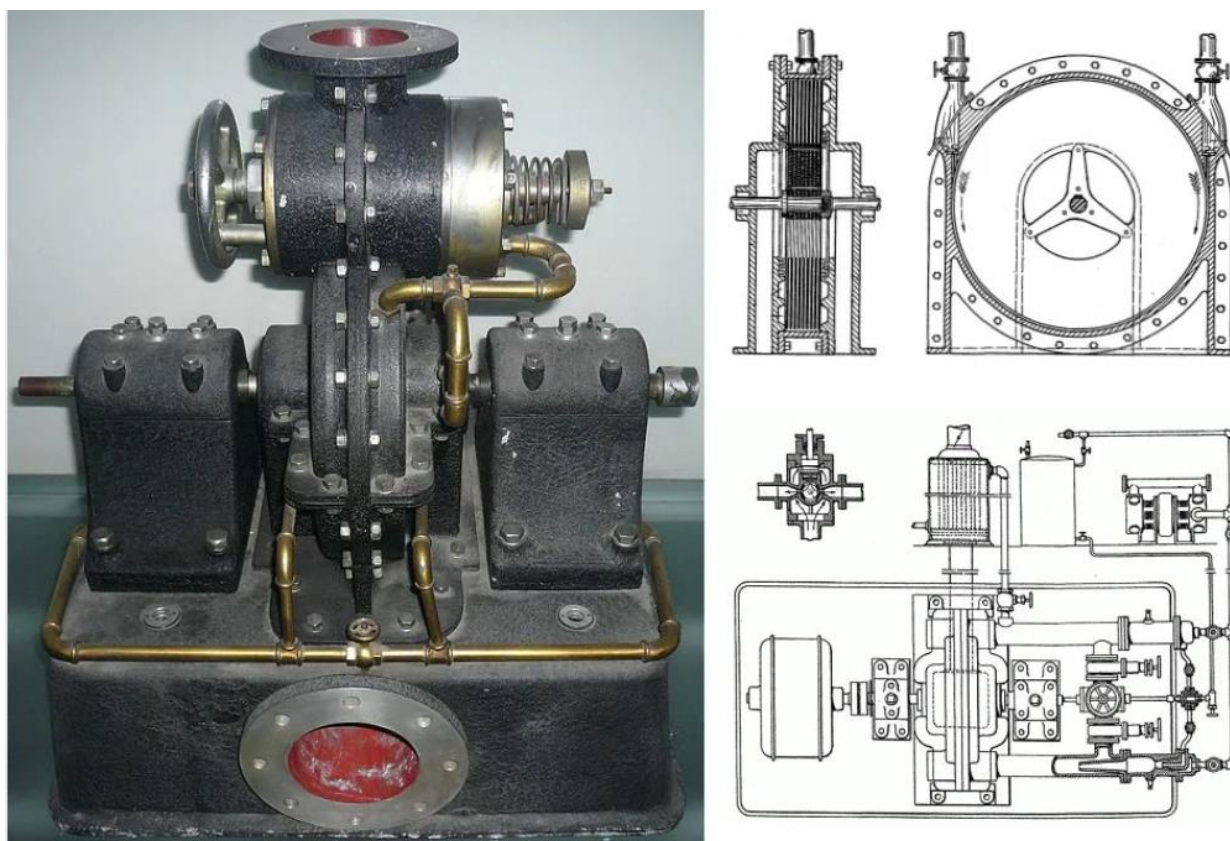


Рисунок 20 – Турбина Тесла

Турбина Тесла отличается от традиционной турбины механизмом передачи энергии на вал. Он состоит из набора плоских дисков и сопел, которые направляют рабочий газ к краю диска. Благодаря липкости и вязкому трению пограничного слоя газ вращает диск, замедляясь по мере того, как он вращается по спирали.

Турбина Тесла не имеет лопастей и ее недостатков: ротор не имеет выступов, поэтому он прочен. Однако у него есть динамические затраты и ограничения по пропускной способности, что является основным недостатком движка, поскольку его трудно использовать в промышленных масштабах. Небольшой поток (напор) дает высокий КПД, а большой расход увеличивает и снижает стоимость турбины, но это не уникально для турбины Теслы.

Края дисков должны быть очень тонкими, чтобы избежать турбулентности рабочей жидкости. Это приводит к необходимости увеличения количества дисков по мере увеличения пропускной способности. Максимальная эффективность этой системы достигается, когда расстояние между срезами практически равно толщине пограничного слоя. Поскольку толщина пограничного слоя зависит от вязкости и давления, нельзя делать вывод о том, что конструкция турбины может быть эффективно использована для различных жидкостей и газов.

КПД газовой турбины Tesla составляет более 60% и более 95%. В настоящее время КПД осевых турбин, применяемых в паровых силовых установках и реактивных двигателях, составляет около 60-70% и ограничивается КПД соответствующего цикла Карно, а для силовой установки не достигает только 25-42%. Tesla заявила, что паровая версия ее турбины может достигать 95%. В Westinghouse полевые испытания паровой турбины Теслы производили 38 фунтов пара в час, что соответствует эффективности турбины около 20%.

3 Разработка и исследование солнечного спирального ресивера с помощью аналитического метода и компьютерного моделирования

В этой работе был выбран спиральный тип приемника, проведены необходимые численные расчеты. Первый этап анализа включает в себя оптическую оптимизацию с целью прогнозирования расстояния между отражателем и спиральным ресивером. Следующая часть – это определение энергетической и эксергетической эффективности коллектора для диапазона температуры воды на входе. Другие важные параметры представлены диаграммами и рисунками из инструмента моделирования, которым является Ansys Fluent. Более конкретно указывается температура ресивера и жидкости. Представлено распределение теплового потока по нижней части абсорбера и вдоль спирали. Представлены перепад давления между входом и выходом и скорость жидкости в каждом месте.

Солнечные концентрирующие устройства работают фокусируя падающее солнечное излучение на небольшую область, известную как фокальная область. Доступно множество классов концентрирующих коллекторов, каждый из которых имеет различные коэффициенты концентрирования и максимальную температуру ресивера, в зависимости от типа применения. Как правило, использование солнечного тепла можно разделить на низкотемпературные солнечные концентрирующие системы и высокотемпературные солнечные тепловые системы. Низкотемпературные солнечные системы, которые могут не включать концентрацию солнечного света, имеют более низкую эффективность преобразования.

3.1 Геометрическая модель солнечного концентратора

В этой части представлено математическое описание модели. Основные параметры приведены в таблице 4, также нарисован эскиз в программной среде Solidworks. Идеальной оптической конфигурацией для параболического концентратора является непрерывное параболоидальное зеркало, однако изготовление которого очень дорого, и его стоимость быстро возрастает с увеличением площади апертуры. Непрерывная параболическая поверхность тарелки может быть аппроксимирована дискретной поверхностью, состоящей из 6 криволинейных трапециевидных отражающих лепестков покрытой отражающим слоем, что значительно снижает стоимость системы, сохраняя при этом соотношение концентраций на уровне, подходящем для широкого спектра средне- и высокотемпературных применений. Для дальнейшего моделирования данная параболическая тарелка будет рассмотрена в виде сплошной. Размеры отражающей поверхности в концентраторе солнечной тарелки определяются

желаемой мощностью при максимальных уровнях прямого солнечного излучения и коэффициента преобразования термической энергии, иначе говоря, коэффициентом использования доступной солнечной инсоляции. Математическое представление солнечного параболического тарелочного концентратора представляет собой параболоид, который можно представить в виде поверхности, полученной вращением параболы вокруг оси, что показано на рисунке 21.

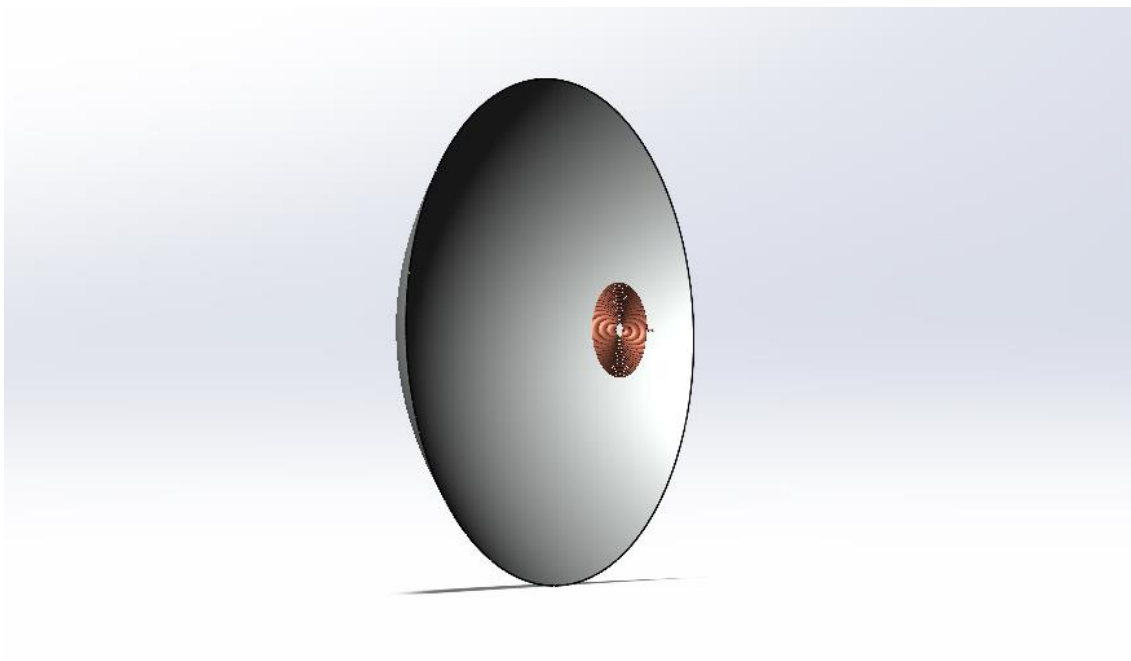


Рисунок 21 – Эскиз параболического концентратора со спиральным ресивером

На рисунке 22 представлен спиральный ресивер диаметром 34 см.

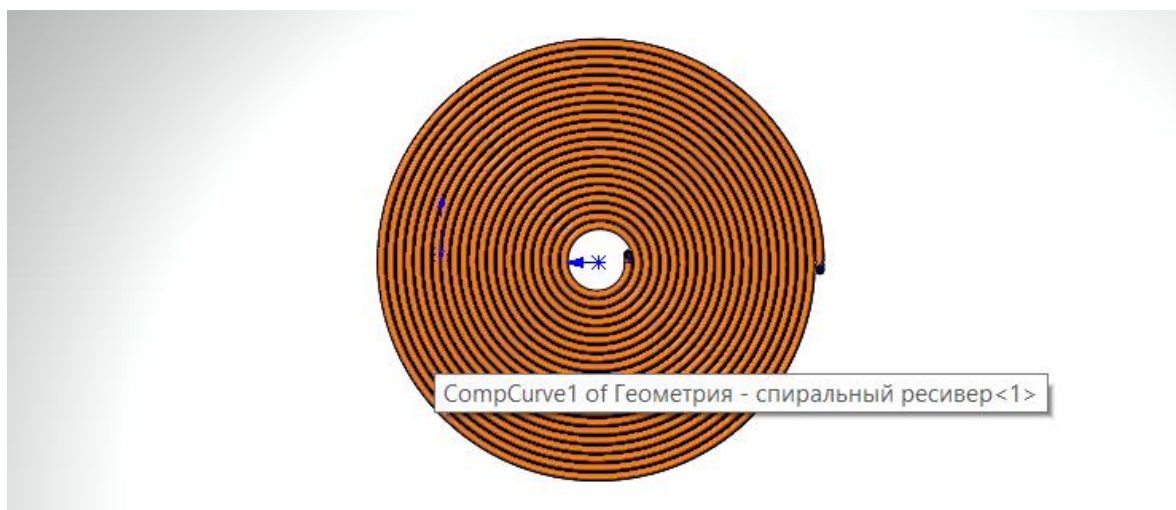


Рисунок 22 – Спиральный ресивер

На рисунке 23 представлены два криволинейных трапециевидных отражающих лепестка, которые изготовлены из алюминиевой оффсетной параболической антенны, толщиной металла 3 мм, на которую был нанесен слой алюминиевого скотча.



Рисунок 23 – Натурная модель сегментов параболического концентратора

Обычно параболоиды, которые используются в солнечных коллекторах, имеют угол кривизны от 10 градусов до 90 градусов.

Параболоид с малыми углами имеет фокусную точку и приемник на большом расстоянии от поверхности концентратора. Параболоиды с углом обода менее 50° используются для объемных приемников, в то время как параболоиды с большими углами наиболее подходят для концентрационных солнечных системы с центральным приемником. В данной работе рассматривается солнечный параболический концентратор с углом $46,421^\circ$.

Отношение фокусного расстояния от диаметра концентратора рассматриваемой модели составляет 0,583.

Конструктивные параметры солнечного параболического концентратора приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры параболического концентратора

Наименование параметра	Значение	Ед.изм
Диаметр апертуры концентратора (D_a)	2,4	м
Угол радиуса кривизны (ψ_{rim})	46,421	°
Радиус спирального ресивера (R_{rec})	0,17	м
Радиус внутренней окружности спирального ресивера ($R_{r.hole}$)	0,04	м
Расстояние до точки фокуса (f)	1,4	м

Благодаря данным приведенным в таблице 4 мы можем рассчитать коэффициент концентрации рассматриваемой модели.

Площадь апертуры параболического концентратора можно вычислить с помощью уравнения (8):

$$A_a = \frac{\pi D_a^2}{4} = 4,524 \text{ м}^2 \quad (8)$$

Тогда как площадь ресивера будет равна (9):

$$A_{rec} = \pi \cdot (R_{rec} - R_{r.hole})^2 = 0,053 \text{ м}^2 \quad (9)$$

Зная два этих значения, можно найти коэффициент концентрации (10):

$$C_{con} = \frac{A_a}{A_{rec}} = 85,207 \quad (10)$$

3.2 Тепловой и оптический расчет

Тепловой и оптические расчеты были проведены аналитически, также исследуемый солнечный концентратор и спиральный ресивер были смоделированы в программной среде Ansys Fluent методом S2S.

Ansys Fluent сочетает в себе оптический и термический анализ и по этой причине идеально подходит для моделирования солнечной инсоляции. В таблице 5 приведены основные параметры моделирования, которые будут использоваться как начальные параметры для Ansys Fluent, так и для аналитического расчета.

Таблица 5 – Исходные данные теплового и оптического расчета [16]

Наименование параметра	Значение	Ед.изм
Прямое среднее солнечное излучение в Алматы (G_b)	800	Вт/м ²
Коэффициент отражения концентратора (ρ_{con})	0,88	
Коэффициент поглощения ресивера (α_{rec})	0,8	
Коэффициент излучения ресивера (ξ_{rec})	0,1	
Постоянная Стефана-Больцмана (σ)	$5,67 \cdot 10^8$	Вт/м ² ·К
Температура воды на входе (T_{in})	20	°С
Удельная теплоемкость воды (c_p)	4200	Дж/кг·К
Плотность воды (ρ_{fluid})	1000	кг/м ³
Внутренний радиус трубки спирального ресивера ($R_{rec.in}$)	$2 \cdot 10^{-3}$	м

3.2.1 Тепловая эффективность солнечного концентратора

Аналитически была найдена температура в фокусной точке для заданных параметров. Данный расчет был основан на Законе лучистого теплообмена Стефана-Больцмана (11):

$$T_{out} = \frac{\sqrt[4]{G_b \cdot \rho_{con} \cdot \alpha_{rec} \cdot C_{con}}}{4\sigma} = 807,213 \text{ К} \quad (11)$$

Данное значение показано в Кельвинах, для удобства восприятия переведем в градусы Цельсия (12):

$$T_{out.cels} = T_{out} - 273,15 = 534,053 \text{ }^\circ\text{C} \quad (12)$$

С помощью рассчитанной температуры и заданием скорости расхода жидкости (жидкость не будет течь сама по себе, поэтому необходимо приводящее устройство, значение которого мы можем регулировать), можно найти количество теплоты, которое вырабатывает данная установка.

Для этого сначала найдем массовый расход от задаваемой скорости, который будет найден по объемному расходу, так при скорости течения жидкости в 0,2 м/с и радиусе спирального ресивера в 2 мм, значение объемного расхода принимает вид (13):

$$V_{flow} = v_{fluid} \cdot \pi \cdot r_{rec.in}^2 = 2,513 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (13)$$

Для удобства восприятия переведем в объемный расход в час (14):

$$V_{flow.hour} = V_{flow} \cdot 3600 = 9,048 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{час}} \quad (14)$$

Массовый расход воды будет равен (15):

$$m_{flow} = \rho_{fluid} \cdot V_{flow} = 2,51310^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (15)$$

Тогда количество теплоты воды будет равно (16):

$$Q_u = m_{flow} \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}) = 5,426 \cdot 10^3 \text{ Дж} \quad (16)$$

Полная поступающая теплота от солнечной инсоляции рассчитывается следующим образом (17):

$$Q_s = A_a \cdot G_b = 6,602 \cdot 10^3 \text{ Дж} \quad (17)$$

Тепловое КПД солнечного коллектора (η_{th}), иначе говоря, коэффициент использования определяется как отношение полезного количества теплоты (Q_u) к доступному солнечному излучению на апертуре тарелки (Q_s) (18):

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{Q_s} = 0,822 \quad (18)$$

Также хотелось бы отметить, что при рассчитанном количестве полезной теплоты, можно конфигурировать солнечную установку. Чтобы на выходе получить температуру воды в 85 °С, необходимо увеличить массовый расход. Так по закону сохранения энергии становится очевидной следующая зависимость (19):

$$m_1 \Delta T_1 = m_2 \Delta T_2 \quad (19)$$

Таким образом массовый расход при нагреве до 85 °С (бытовые нужды), будет равен (20):

$$m_2 = \frac{m_1 \Delta T_1}{\Delta T_2} = \frac{2,513 \cdot 10^{-3} \cdot 514}{65} = 19,87 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \quad (20)$$

Тогда объемный расход в час (21):

$$V_{2\text{flow.hour}} = 19,87 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-3} \cdot 3600 = 77,5 \cdot 10^{-3} = 71,5 \text{ л/час} \quad (21)$$

Исходя из формулы 21, максимальный объем воды который данная установка может разогреть в идеальных условиях до 85 °С составляет 87 литров, что является вполне хорошим показателем.

3.2.2 Энергетический баланс в ресивере

Кроме того, полезное тепловыделение можно рассчитать косвенным способом (22), используя энергетический баланс приемника. Поглощенная солнечная энергия разделяется на полезное тепло (Q_u) и тепловые потери (Q_{loss}):

$$Q_{abs} = Q_u + Q_{loss} \quad (22)$$

Поглощенная энергия может быть рассчитана с использованием солнечной энергии (Q_s) и оптического КПД (η_{opt}) (23):

$$Q_{abs} = \eta_{opt} \cdot Q_s \quad (23)$$

В стационарных условиях тепловые потери можно разделить на три категории – это тепловые потери на излучение (Q_{rad}), тепловые потери на

внутреннюю конвекцию ($Q_{conv.in}$) и тепловых потерь на внешнюю конвекцию ($Q_{conv.ex}$) (24):

$$Q_{loss} = Q_{rad} + Q_{conv.in} + Q_{conv.ex} \quad (24)$$

Для того, чтобы произвести дальнейшие расчеты необходимо обозначить параметры связанные с окружающей средой, а также геометрическими и изоляционными характеристиками внешнего колпака. Данные характеристики представлены в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристики колпака и окружающей среды [3, 16]

Наименование параметра	Значение	Ед.изм
Температура окружающей среды (T_{amb})	20	°C
Средняя скорость воздуха в Алматы (V_{air})	1,94	м/с
Динамическая вязкость воздуха (μ_{air})	$18,25 \cdot 10^{-6}$	Н·с/м ²
Плотность воздуха (ρ_{air})	1,2	кг/м ³
Диаметр внешнего колпака ресивера (D_{cav})	8	см
Толщина изоляции (t_{ins})	2	см
Теплопроводность минваты (k_{ins})	0,062	Вт/м·К

3.2.3 Тепловые потери на внешнюю конвекцию

Тепловые потери на внешнюю конвекцию ($Q_{conv.ex}$) – это потери на конвекцию внутренней полости колпака (рисунок 4) ресивера в окружающую среду и включают тепловые потери проводимости. Эти тепловые потери можно рассчитать с помощью соответствующего теплового сопротивления полости (Q_{cav}), как показано ниже (25):

$$Q_{conv.ex} = \frac{T_{rm} - T_{amb}}{R_{cav}} \quad (25)$$

Средняя температура приема (T_{rm}) рассчитываются как среднеарифметическое от T_{out} и T_{in} (26):

$$T_{rm} = \frac{T_{in} + T_{out}}{2} = 550,186 \text{ К} \quad (26)$$

Для расчетов конвекции сначала необходимо определить некоторые параметры окружающей среды, такие как число Рейнольдса, число Нуссельта и т.д. Первым делом необходимо найти кинематическую вязкость воздуха в Алматы (27):

$$\gamma_{air} = \frac{\mu_{air}}{\rho_{air}} = 1,521 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \quad (27)$$

Таким образом можно найти число Рейнольдса, которое представлено следующим уравнением (28):

$$Re_{air} = V_{air} \cdot \frac{D_{rec}}{\gamma_{air}} = 1,565 \cdot 10^4 \quad (28)$$

Для чисел Рейнольдса, составляющих от 0,1 до 1000, число Нуссельта задается уравнением (29):

$$Nu = 0,40 + 0,54Re^{0,52} \quad (29)$$

Учитывая, что $Re_{air}=1643,8$, для чисел Re , составляющих от 1000 до 50 000, уравнение (29) выражается как (30):

$$Nu_{air} = 0,30Re_{air}^{0,6} = 98,587 \quad (30)$$

Для расчета коэффициента конвекции h_{out} мы учитываем теплопроводность воздуха (k_{air}), диаметр внешнего колпака приемника (D_{cav}) и число Нуссельта (Nu), которое необходимо рассчитать по числу Рейнольдса (Re) (31):

$$h_{out} = Nu_{air} \cdot \frac{k_{air}}{D_{cav}} = 24,647 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (31)$$

Тепловое сопротивление конвекции рассчитывается следующим образом (32):

$$R_{conv.ex} = \frac{1}{h_{out} \cdot A_{cav}} = 8,072 \text{ Вт}^{-1} \quad (32)$$

Тепловое сопротивление проводимости рассчитывается как (33):

$$R_{cond} = \frac{t_{ins} \cdot A_{cav}}{k_{ins}} = 1,621 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}^{-1} \quad (33)$$

Тепловое сопротивление полости (R_{cav}) рассчитывается следующим образом (34):

$$R_{cav} = R_{conv.ex} + R_{cond} = 8,073 \text{ Вт}^{-1} \quad (34)$$

Возвращаясь к уравнению (25), получаем количество теплоты на внешние потери:

$$Q_{conv.ex} = \frac{T_{rm} - T_{amb}}{R_{cav}} = 31,836 \text{ Дж} \quad (25)$$

3.2.4 Тепловые потери на внутреннюю конвекцию

Тепловые потери внутренней конвекции можно рассчитать с помощью схожих с использованными в предыдущей части уравнениями для чисел Нуссельта и Рейнольдса, так как, условия потоков воздуха остаются такими же, однако коэффициент конвекции будет рассчитан в зависимости от диаметра спирального ресивера.

Таким образом коэффициент внутренней конвекции рассчитывается как (35):

$$h_{out} = Nu_{air} \cdot \frac{k_{air}}{D_{cav}} = 5,799 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (35)$$

Тепловые потери на внутреннюю конвекцию рассчитываются следующим образом (36):

$$Q_{conv.ex} = A_{rec} \cdot h_{in} \cdot (T_{rm} - T_{amb}) = 79,138 \quad (36)$$

3.2.5 Радиационные тепловые потери

Радиационные тепловые потери суммарного приемника рассчитываются следующим образом (37) [17]:

$$Q_{rad} = A_{rec} \cdot \xi_r \cdot \sigma \cdot (T_{out}^4 - T_{in}^4) = 125,588 \text{ Дж} \quad (37)$$

Эти тепловые потери выделяются в каждом змеевике в отдельности, таким образом его можно записать для «n» оборотов в виде (38):

$$Q_{rad.n} = A_n \sum_{j=1}^N F_{n-j} (\xi_n \sigma T_{r.n}^4 - \xi_n \sigma T_{j.n}^4) \quad (38)$$

3.2.6 Теплопередача от ресивера к жидкости

Для того, чтобы произвести дальнейшие расчеты необходимо обозначить параметры связанные с рабочей жидкостью. Данные характеристики представлены в таблице 7.

Таблица 7 – Характеристики рабочей жидкости

Наименование параметра	Значение	Ед.изм
Динамическая вязкость жидкости (μ_{fluid})	$80 \cdot 10^{-6}$	Н·с/м ²
Плотность жидкости (ρ_{fluid})	1000	кг/м ³
Теплопроводность жидкости k_{fluid}	0,011	Вт/м·К
Удельная теплоемкость рабочей жидкости (c_p)	4200	Дж/кг·К
Внутренний радиус трубки ресивера $2R_{rec.in}$	0,002	м
Длина архимедовой спирали l_{tube}	12	м

Первым рассчитывается число Рейнольдса для теплообмена между спиральным ресивером и рабочей жидкостью (39):

$$Re_{fluid} = \frac{4 \cdot m_{flow}}{\pi \cdot 2R_{rec.in} \cdot \mu_{fluid}} = 10^4 \quad (39)$$

Исходя из этого можно рассчитать коэффициент трения (f_r), который будет использоваться для расчета числа Нуссельта (40):

$$f_r = 0,316 \cdot Re_{fluid}^{-0,25} + 0,41^{0,9} = 0,48 \quad (40)$$

Рассчитывается число Прандтля, как показано ниже (41):

$$Pr_{fluid} = \mu_{fluid} \cdot \frac{c_p}{k_{fluid}} = 30,545 \quad (41)$$

Имея значение которого становится возможным рассчитать число Нуссельта согласно следующему уравнению (42):

$$Nu_{fluid} = \frac{\frac{f_r}{8} Re_{fluid} Pr_{fluid}}{1 + 12,8 \cdot \sqrt{\frac{f_r}{8}} (Pr_{fluid}^{0,68} - 1)} = 612,209 \quad (42)$$

Коэффициент теплопередачи (h_f) можно рассчитать следующим образом [18] (43):

$$h_{fluid} = \frac{2R_{rec.in} \cdot Nu_{fluid}}{k_{fluid}} = 222,621 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \quad (43)$$

Передача тепла от ресивера к рабочему телу описывается следующим образом (44):

$$Q_{u.trans} = h_{fluid} \cdot S_{tr.sec} \cdot (T_{out} - T_{rm}) = 5,195 \cdot 10^3 \quad (44)$$

Потери на кинетику и прочее будут выражаться в разнице суммарного полезного количества теплоты и переданного жидкости количеству теплоты (45):

$$Q_{loss.kin} = Q_u - Q_{u.trans} = 231,133 \text{ Дж} \quad (45)$$

Падение давления (ΔP) внутри спирального ресивера рассчитывается следующим образом (46):

$$\Delta P = f_r \frac{l_{tube}}{2R_{rec.in}} \cdot (0,5\rho_{fluid} \cdot v_{fluid}^2) = 2,879 \cdot 10^4 \text{ Па} \quad (46)$$

3.2.7 Эксергетический КПД солнечного коллектора

Эксергетический КПД – это показатель, позволяющий оценить солнечный концентратор как тепловой преобразователь, в частности, а также применяется для оценки эквивалентной системы с солнечным концентратором в сочетании с двигателем Карно для производства работы/мощности. Эксергетическая эффективность солнечного коллектора (η_{ex}) определяется как произведение полезной эксергии (E_u) на эксергию солнечного излучения (E_s) (47):

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_s} \quad (47)$$

Полезная эксергия E_u может быть записана как (48):

$$E_u = Q_u - m_{flow} \cdot c_p \cdot T_{amb} \cdot \ln \frac{T_{out}}{T_{in}} - m_{flow} \cdot T_{amb} \cdot \frac{\Delta P}{\rho_{fluid} \cdot T_{rm}} = 2,292 \cdot 10^3 \text{ Дж} \quad (48)$$

Также можно выразить в следующем виде, что показывает правильность расчетов (49):

$$E_u = m_{flow} \cdot c_p \left[(T_{out} - T_{in}) - T_{amb} \cdot \ln \left(\frac{T_{out}}{T_{in}} \right) \right] = 2,292 \cdot 10^3 \text{ Дж} \quad (49)$$

Средней температурой жидкости будет среднее значение входной и выходной жидкости температуры. Поток эксергии солнечного излучения (E_s) рассчитывается с использованием модели Петелы [19]. Эта модель подходит для лучистого излучения, которое используется в коллекторах солнечных тарелок.

Эталонной выбрана температура окружающей среды (T_{amb}) равной 293,16 К, солнечная температура (T_{sun}) равна 5770 К, а используемые уровни температуры в уравнениях эксергетического анализа даны в единицах Кельвина. Таким образом солнечная эксергия выражается (50):

$$E_s = Q_s \cdot \left[1 - \frac{4}{3} \cdot \left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}} \right) + \frac{1}{3} \left(\frac{T_{amb}}{T_{sun}} \right)^4 \right] = 6,155 \cdot 10^3 \text{ Дж} \quad (50)$$

Тогда, согласно уравнению (47) эксергетический КПД будет равен:

$$\eta_{ex} = \frac{E_u}{E_s} = 0,37$$

3.3 Гидравлический анализ

Используя перепад давления, можно рассчитать потребность в насосной работе (W_p) (51):

$$W_p = m_{flow} \cdot \frac{\Delta P}{\rho_{fluid}} = 0,072 \text{ Вт} \quad (51)$$

Солнечный концентратор производит полезное тепло и потребляет энергию в насосе для покрытия потери давления. Таким образом, можно оценить общую эффективность системы с использованием критерия, учитывающего все эти факторы. Практически этот индекс оценивает чистую производство первичной полезной энергии коллектора [20] (52):

$$\eta_{over} = \frac{Q_u - \frac{W_p}{\eta_s}}{Q_s} = 0,822 \quad (52)$$

3.4 Компьютерное моделирование процессов

После того как параболический концентратор и спиральный ресивер были смоделированы в программе Solidworks, необходимо было построение детализированной расчетной сетки данных элементов в Ansys Mesh. На рисунках 24 и 25 показаны расчетные сетки в тетраэдральном режиме построения.

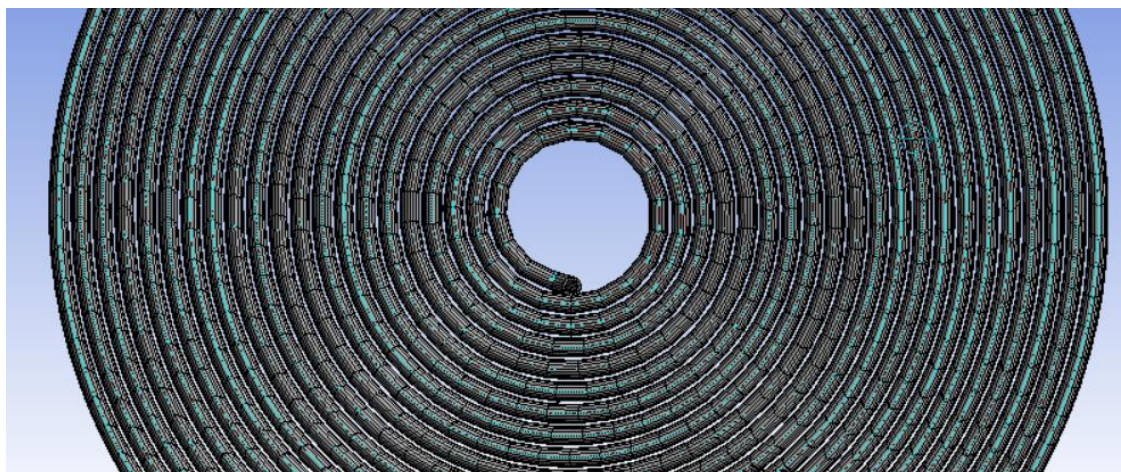


Рисунок 24 – Построение расчетной сетки спирального ресивера

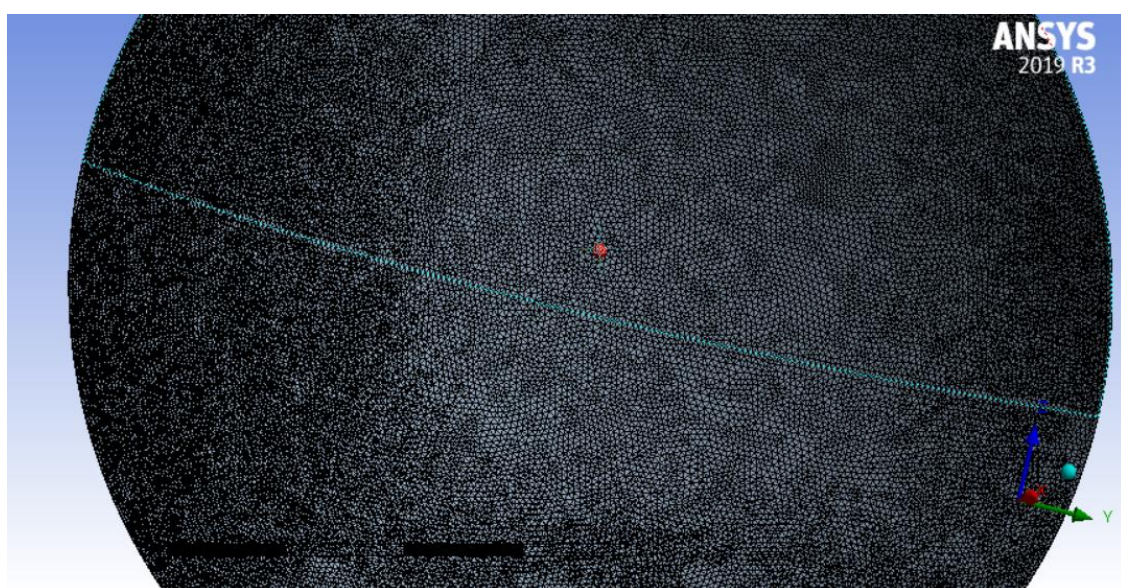


Рисунок 25 – Построение расчетной сетки параболического концентратора

После того как были смоделированы расчетные сетки, объекты загружаются в процессор Setup – где присваиваются характеристики материалов и задаются параметры моделирования аналогично тем, что были использованы в аналитическом расчете, также выбирается модель в нашем случае это конвекция, лучистый теплообмен S2S.

На основании введенных данных произведено моделирование, результаты которого получились с очень маленькой девиацией по сравнению с аналитическим расчетом.

Первым делом была рассмотрена модель трассировки лучей, которая наглядно показывает фокус лучей в спиральном ресивере (рисунок 26).

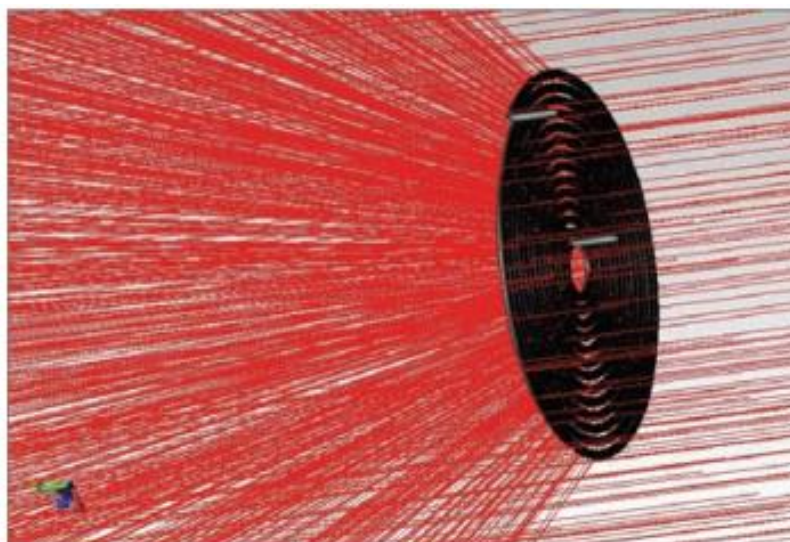


Рисунок 26 – Трассировка лучей в программе Trace Pro

Далее была запущена симуляция в программной среде Ansys Fluent, на рисунке 27 мы можем увидеть, что смоделированные значения совпадают с расчетными значениями, с девиацией в пару градусов. На рисунке 28 показана скорость воды при температуре 808 К.

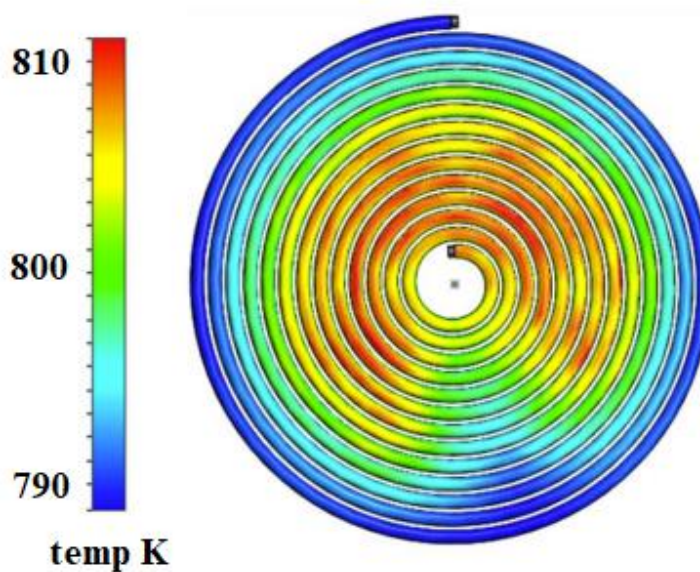


Рисунок 27 – Распределение температуры по спиральному ресиверу

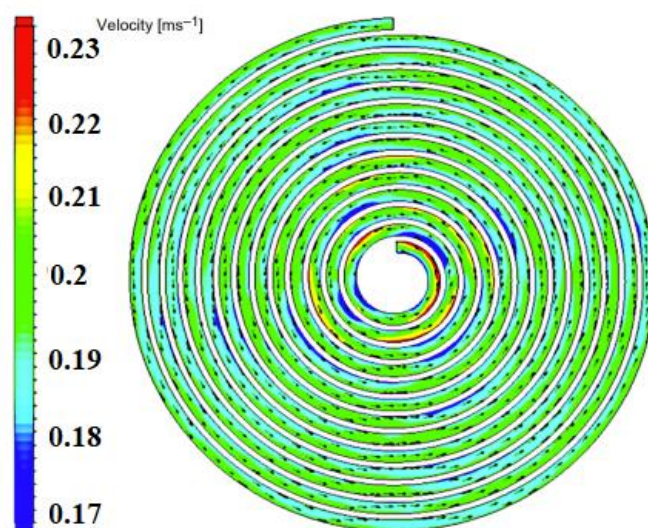


Рисунок 28 – Скорость жидкости внутри ресивера при максимальной температуре ресивера.

Течение воды внутри трубы характеризуется, большей скоростью в правой части, из-за центробежной силы. Это явление более интенсивно проявляется ближе к центру, где вращение потока больше.

На рисунке 29 – изображен спиральный ресивер в поперечном сечении с иллюстрацией температуры жидкости в °C, при объемном расходе 71,5 л/час.

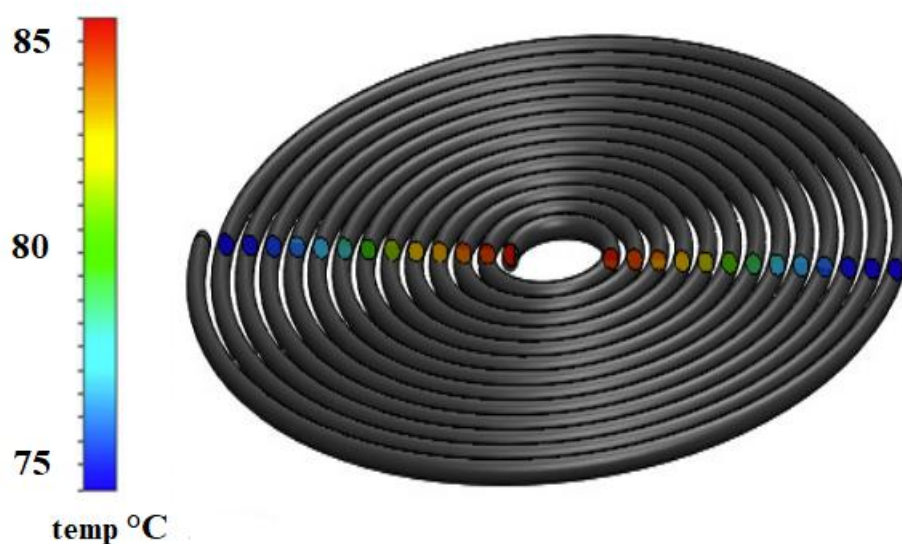


Рисунок 29 – Распределение температуры жидкости в спиральном ресивере

4 Теория двигателя Стирлинга

Двигатель Стирлинга – тепловая машина, в которой рабочее тело в виде газа или жидкости движется в замкнутом объеме, разновидность двигателя внешнего сгорания. [21] Он основан на периодическом нагреве и охлаждении рабочего тела за счет рекуперации энергии, которая изменяется в зависимости от объема рабочего тела. Он может работать не только со сжиганием топлива, но и с любым источником тепла.

4.1 Виды двигателей Стирлинга

Двигатели Стирлинга подразделяются на три различных вида:

Альфа-Стирлинг – содержит два отдельных силовых поршня в отдельных цилиндрах, один — горячий, другой – холодный. Цилиндр с горячим поршнем находится в теплообменнике с более высокой температурой, с холодным — в более холодном. У данного вида двигателя отношение мощности к объему достаточно велико, но, к сожалению, высокая температура «горячего» поршня создает определенные технические трудности. Регенератор находится между горячей частью соединительной трубки и холодной.

Бета-Стирлинг – цилиндр всего один, горячий с одного конца и холодный с другого. Внутри цилиндра движутся поршень (с которого снимается мощность) и вытеснитель, изменяющий объем горячей полости. Газ перекачивается из холодной части цилиндра в горячую через регенератор. Регенератор может быть внешним, как часть теплообменника, или может быть совмещен с поршнем-вытеснителем.

Гамма-Стирлинг – тоже есть поршень и вытеснитель, но при этом два цилиндра – один холодный (там движется поршень, с которого снимается мощность), а второй горячий с одного конца и холодный с другого (там движется вытеснитель). Регенератор может быть внешним, в этом случае он соединяет горячую часть второго цилиндра с холодной и одновременно с первым (холодным) цилиндром. Внутренний регенератор является частью вытеснителя.

На рисунке 30 изображены виды двигателей Стирлинга.

4.2 Принцип действия

Двигатель Стирлинга основан на увеличении объема газа при нагревании и уменьшении при охлаждении. Представьте, что у нас есть какое-то замкнутое тело с воздухом. Часть тела имеет эластичную мембрану (например, поршень),

которая изгибается при нагревании тела, т. е. выполняет определенную функцию в течение определенного периода времени. Это связано с расширением воздуха, заполняющего корпус. Обратный процесс такой же, только происходит наоборот. Тело должно охлаждаться, но не нагреваться. По мере уменьшения объема воздуха мембрана снова начинает изгибаться, но опять бежит в другом направлении. Чтобы использовать эту функцию, должны часто возникать вибрации, а воздух в корпусе должен постоянно охлаждаться, а затем нагреваться. Для автоматизации этого процесса, называемого вытеснением, предусмотрено 6 дополнительных поршней. Его работа заключается в том, чтобы проталкивать оставшийся объем воздуха (горячего или холодного) снизу (горячего) кверху (холодному) корпуса. Этот поршень занимает около половины всего объема корпуса и имеет вид круглого диска, который неплотно прилегает к стенкам корпуса [21].

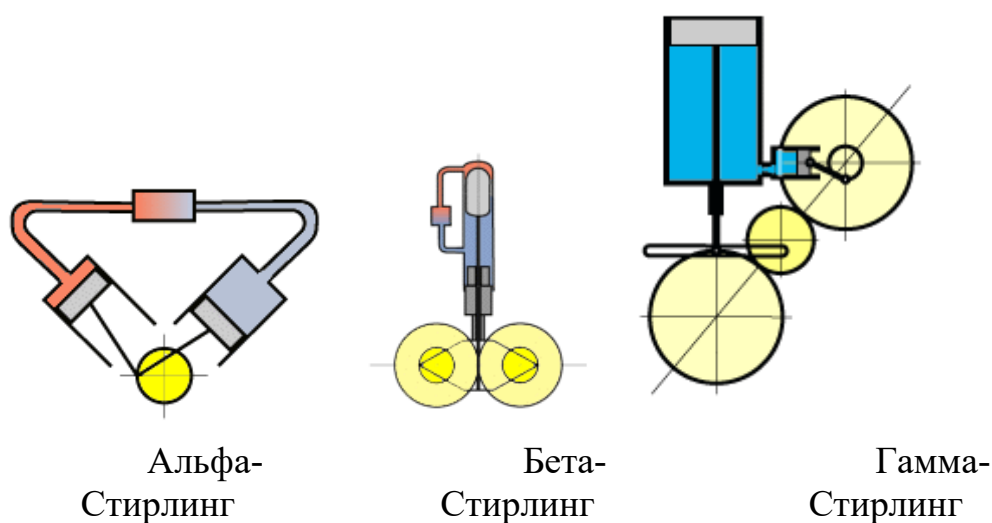


Рисунок 30 – Виды двигателей Стирлинга

Пространство между стенкой и диском необходимо для прохождения воздуха из горячей зоны корпуса в охлаждаемую зону и наоборот. По идее поршень должен быть изготовлен из легкого материала, плохо проводящего тепло, так как он является центральным элементом системы, расположенным на границе раздела двух сред. Таким образом, двигатель Стирлинга состоит из классической шатунно-кривошипной системы, которая соединяет поршень и диафрагму, что позволяет им находиться на одной оси вращения. Это обеспечивает весь механизм цикла, т.е. позволяет двигателю опускать и поднимать поршень. Двигатель Стирлинга представляет собой тепловую машину внешнего сгорания. Тепло для рабочих процессов поступает извне, в случае двигателя внутреннего сгорания топливо сгорает в камере сгорания. Источниками тепла могут быть горелки, использующие различные виды топлива, солнечный свет, дымовые газы котлов, солнечное излучение и простое тепло рук (есть демонстрационные модели, использующие тепло тела). В 19 веке

инженеры хотели создать безопасную альтернативу паровым машинам того времени, котлы которых часто взрывались из-за высокого давления пара и неподходящих материалов конструкции. Хорошей альтернативой паровым двигателям стала разработка двигателей Стирлинга, которые могли преобразовывать любую разницу температур в работу. Основным принцип работы двигателя Стирлинга – постоянный, попеременный нагрев и охлаждение рабочего тела в закрытом цилиндре. В качестве рабочего тела обычно используется воздух, но также используются водород и гелий. Из термодинамики известно, что давление, температура и объем идеального газа связаны и соответствуют закону Менделеева-Клайперона (55):

$$PV = \nu RT \quad (55)$$

Это означает, что при нагревании газа его объем увеличивается, а при охлаждении — уменьшается. Это свойство газов и лежит в основе работы двигателя Стирлинга. Физическая модель двигателя представлена на рисунке 31.

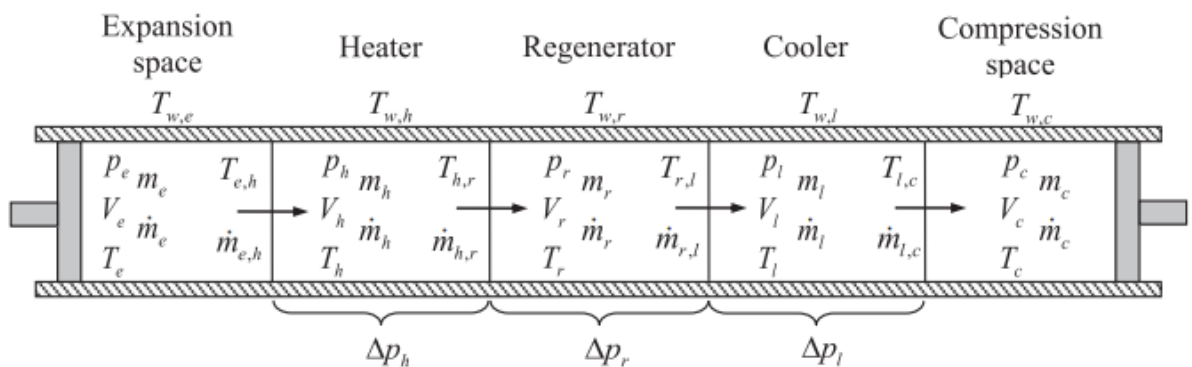


Рисунок 31 – Физическая модель двигателя Стирлинга

В двигателе Стирлинга используется цикл Стирлинга, который по термодинамической эффективности ничем не уступает циклу Карно и даже имеет преимущество. Действительно, цикл Карно состоит из изотерм и адиабатических кривых, мало отличающихся друг от друга. Практическая реализация этого цикла безнадёжна. Цикл Стирлинга позволил получить практичный двигатель подходящего размера [21].

Цикл Стирлинга состоит из четырех фаз и делится на две переходные фазы: нагрев, расширение, переход к холодному глазу, охлаждение, сжатие и переход к источнику тепла. Таким образом, при переходе от горячего источника к холодному газ в баллоне расширяется и сжимается. При этом давление будет меняться, давая вам полезную работу. Рабочая среда нагревается и охлаждается (секции 4 и 2) плунжером. В идеале количество тепла, выделяемого и поглощаемого дайвером, одинаково. Полезная работа обеспечивается только

изотермами, т. е. зависит от разницы температур между нагревателем и охладителем, как в цикле Карно.

Идеальный двигатель Стирлинга описывается следующими фазами, которые наглядно изображены на рисунке 32:

1—2 изотермическое расширение рабочего тела с подводом тепла от нагревателя;

2—3 изохорный отвод тепла от рабочего тела к регенератору;

3—4 изотермическое сжатие рабочего тела с отводом тепла к холодильнику;

4—1 изохорный нагрев рабочего тела с подводом тепла от регенератора.

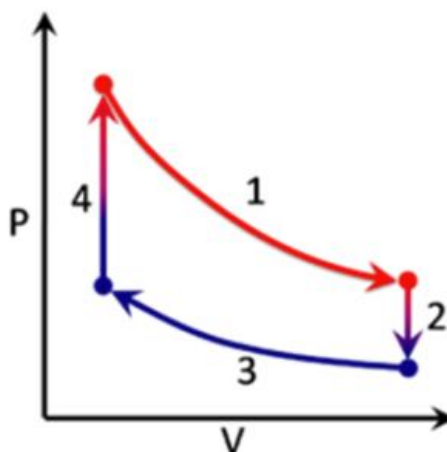


Рисунок 32 – Модель цикла Стирлинга

В двигателе Стирлинга движение рабочего поршня смещено на 90° относительно движения плунжера. В зависимости от знака этого сдвига машина может быть двигателем или тепловым насосом. При 0° смещения машина вообще не работает (кроме потерь на трение).

Термический КПД идеального цикла Стирлинга определяется формулой (53):

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (53)$$

где (T_1) – температура нагревателя;

(T_2) – температура охладителя.

Теоретически любой источник тепла (солнце, электричество, топливо) может питать двигатель внутреннего сгорания. Принцип работы картера заключается в использовании гелия, водорода или воздуха. Идеальная схема имеет максимально возможный тепловой КПД. В этом случае выход составляет от 30 до 40%. Эффективный регенератор может обеспечить высокую эффективность. Встроенные теплообменники обеспечивают регенерацию, обмен

и охлаждение современных двигателей. Ваше преимущество – работа без масла. В целом двигатель требует меньше смазки. Среднее давление в баллоне колеблется от 10 до 20 МПа. Хорошая система уплотнения и способность масла проникать в рабочие пространства очень важны. Согласно теоретическим расчетам, КПД двигателя Стирлинга сильно зависит от температуры и может достигать даже 70 %. Во второй половине 20 века ромбовидный двигатель на испытаниях превысил 35%. Эффективность в кулере для воды и температуре 55 градусов Цельсия. В некоторых экспериментальных моделях усовершенствования конструкции привели к повышению эффективности до 39%. Практически все современные бензиновые двигатели имеют одинаковую топливную экономичность 28-30%. Турбодизели достигают около 35%. Самые передовые модели двигателей Стирлинга, разработанные компанией Mechanical Technology Inc. в США, показывают КПД до 43%. После разработки термостойкой керамики и 9 других инновационных материалов стало возможным дальнейшее повышение комнатной температуры. В таких случаях выход может достигать даже 60%. Очень удобно совмещать «Стирлинг» с системой отопления. Прогреваем мотор, а он своим радиатором греет воду, которая идет на привод. Теплоемкость приличного дома около 10 кВт, даже если КПД 10% - достаточно для хозяйственных нужд. Все затраты остаются в системе и служат своему основному назначению – отоплению. Единственная проблема - сделать достаточно прочный двигатель по разумной цене.

4.3 Недостатки двигателя Стирлинга

1) Основными недостатками поршневых версий двигателя являются вес и материалоемкость. Для двигателей внутреннего сгорания вообще и для двигателя Стирлинга в частности рабочее тело необходимо охлаждать, что приводит к значительному увеличению массы и габаритов силовой установки за счет укрупненных охладителей.

2) Для достижения характеристик, сравнимых с двигателем внутреннего сгорания, необходимо использовать высокое давление (более 100 атм) и специальные виды рабочих тел - водород, гелий.

3) Тепло передается не непосредственно рабочему телу, а только через стенки теплообменника. Теплопроводность стен ограничена, поэтому КПД ниже ожидаемого. Теплообменник работает в условиях очень напряженного тепловложения и очень высокого давления, что требует использования качественных и дорогих материалов. Создание теплообменника, отвечающего противоположным требованиям, не является очень большой задачей. Чем больше площадь теплообмена, тем больше потери тепла. Это увеличивает размер теплообменника и количество незадействованной рабочей жидкости. Поскольку источник тепла является внешним, двигатель медленно реагирует на изменение

теплового потока к цилиндру и может не сразу выдать требуемую мощность при запуске.

4) Для быстрого изменения мощности двигателя применяются способы, отличные от применяемых в двигателях внутреннего сгорания: переменная объемная буферная емкость, изменение среднего давления рабочего тела в камерах, изменение фазового угла между поршнем двигателя и рабочим объемом. В последнем случае реакция двигателя на команды водителя почти мгновенная.

4.4 Преимущества двигателя Стирлинга

1) Двигатель "двойственен" - как и все двигатели внешнего внутреннего сгорания (точнее, внешнего подвода тепла), двигатель Стирлинга может работать практически при любой разнице температур: например, между разными слоями воды от моря, солнца, атомный или изотопный обогреватель, угольная или дровяная печь и т. д.

2) Простота конструкции – конструкция двигателя очень проста и не требует дополнительных систем типа газораспределительного механизма. Он запускается сам по себе и не требует стартера. Его характеристики позволяют избавиться от коробки передач.

3) Повышенный ресурс – простота конструкции, отсутствие многих «чувствительных» узлов позволяет «Стирлингу» обеспечивать беспрецедентный для других двигателей запас хода с десятками и сотнями тысяч часов непрерывной работы.

4) Эффективность. Стирлинги часто являются наиболее эффективным типом двигателя для использования определенных видов тепловой энергии, особенно при низких перепадах температур. Например, в случае преобразования солнечной энергии в электрическую Стирлинги иногда предлагают более высокий КПД, чем паровые двигатели (до 31,25%).

5) Экологическая чистота - «Стирлинг» не имеет выхлопных газов, то есть уровень шума у него значительно ниже, чем у поршневых двигателей. Бета-Стирлинг с алмазным механизмом — очень сбалансированный прибор и имеет очень низкий уровень вибрации при достаточно большой мощности (амплитуда вибрации менее 0,0038 мм). В самом Стирлинге нет компонентов или процессов, способствующих загрязнению. Не потребляет рабочую жидкость.

4.5 Применение двигателей Стирлинга

Универсальные источники энергии – с двигателями Стирлинга любое тепло может быть преобразовано в электричество. Надеемся на строительство солнечных электростанций. Они служат автономным генератором для туристов. Некоторые компании производят газогенераторы [21].

Насосы. Эффективность систем отопления или охлаждения повышается, если в контуре установлен насос принудительной циркуляции. Стирлинг для перекачивания жидкостей может быть намного проще обычной схемы «мотопомпа». В двигателе Стирлинга вместо рабочего поршня может использоваться перекачиваемая жидкость, которая также используется для охлаждения рабочей жидкости. Насос на базе двигателя Стирлинга можно использовать для перекачивания воды в оросительные каналы с использованием солнечного тепла для снабжения дома горячей водой от солнечной батареи (в системах отопления теплоаккумулятор стараются устанавливать как можно ниже, чтобы вода могла проникать в радиаторы). Насос Стирлинга можно использовать для перекачки химикатов, поскольку он герметичен.

Тепловые насосы. Экономить тепло можно с помощью тепловых насосов. Принцип работы такой же, как и у кондиционера (кондиционер – это тот же тепловой насос), только кондиционер охлаждает помещение, нагревая окружающее пространство, а тепловой насос вообще обогревает помещение. путем охлаждения наружного воздуха, колодезной воды или других низкопотенциальных источников тепла. Как правило, используются электрические тепловые насосы. Устройство, сочетающее в себе двигатель Стирлинга и тепловой насос Стирлинга, упрощает ситуацию. Двигатель Стирлинга передает остаточное тепло от «холодного» цилиндра в систему отопления, а полученная механическая энергия используется для поглощения дополнительного тепла из окружающей среды.

Охлаждение. Почти во всех холодильниках используются одни и те же тепловые насосы. Что касается систем охлаждения, то их судьба сложилась более счастливо. Ряд производителей бытовых холодильников планируют устанавливать Стирлинги в свои модели. Они очень эффективны и используют в качестве рабочего тела обычный воздух.

При очень низких температурах двигатель Стирлинга может работать и в режиме охлаждения (обратный цикл Стирлинга). Для этого его приводит в действие любой другой внешний двигатель (в том числе еще один Стирлинг). Такие машины хорошо зарекомендовали себя для сжижения газов. Там, где не требуются большие объемы (например, в лаборатории), Стирлинги более эффективны, чем турбины. Маленькие «стирлинги» полезны для охлаждения датчиков в очень точных приборах. о Подводные лодки Преимущество «Стирлингов» заключалось в том, что в первой половине 1960-х годов в военно-морском уставе указывалась возможность их установки на подводные лодки.

Двигатели работают на жидком кислороде, который затем используется для дыхания, уровень шума очень низкий, а упомянутые выше недостатки (шум и охлаждение) несущественны для подводной лодки.

Энергетические батареи. Это позволяет экономить энергию, используя в качестве источника тепла накопление тепла в расплавленных солях. Эти батареи лучше с точки зрения накопления энергии и дешевле, чем химические батареи. Механическая энергия может накапливаться за счет торможения двигателя с использованием изменения фазового угла между поршнями для регулировки мощности. В этом случае двигатель становится тепловым насосом.

Солнечные электростанции. С двигателем Стирлинга солнечная энергия может быть преобразована в электричество. Для этого двигатель Стирлинга монтируется в фокусе параболического зеркала (аналогично параболической антенне) так, что зона нагрева постоянно освещается. При наблюдении за солнцем параболический рефлектор управляется по двум координатам. Энергия солнца сосредоточена на небольшой площади. Зеркала отражают около 92% падающей на них солнечной радиации. Водород или гелий обычно используются в качестве рабочего тела для двигателя Стирлинга.

4.6 Расчет температуры на горячей стороне

Как видно из уравнения (53), КПД двигателя Стирлинга полностью зависит от разницы температур. Следует также отметить, что в дальнейших расчетах, в отличие от расчета спирального ресивера, потерями тепла можно пренебречь, так как полезная работа в основном зависит от внешних параметров температуры, а также внутреннего объема и давления, а также дизайн. свойства [21].

Исходные данные для расчета коэффициента концентрации приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Параметры параболического концентратора

Наименование параметра	Значение	Ед.изм
Радиус апертуры концентратора	2,4	м
Диаметр теплообменника двигателя Стирлинга	0,150	м
Прямое среднее солнечное излучение в Алматы	800	Вт/м ²
Коэффициент отражения концентратора	0,88	
Коэффициент поглощения ресивера	0,8	
Постоянная Стефана-Больцмана	$5,67 \cdot 10^8$	Вт/м ² ·К
Температура окружающей среды	20	°С

Площадь апертуры параболического концентратора можно вычислить с помощью уравнения (54):

$$A_a = \pi \cdot \frac{D_a^2}{4} = 4,524 \text{ м}^2 \quad (54)$$

Тогда как площадь теплообменника двигателя Стирлинга будет равна (55):

$$A_{stirling} = \pi \cdot \frac{D_{stirling}^2}{4} = 0,018 \text{ м}^2 \quad (55)$$

Зная два этих значения, можно найти коэффициент концентрации (56):

$$C_{con} = \frac{A_a}{A_{stirling}} = 256 \quad (56)$$

Аналитически была найдена температура в фокусной точке (57) для заданных параметров. Данный расчет был основан на Законе лучистого теплообмена Стефана-Больцмана:

$$T_{out} = \frac{\sqrt[4]{G_b \cdot \rho_{con} \cdot \alpha_{rec} \cdot C_{con}}}{4\sigma} = 1038 \text{ К} \quad (57)$$

Данное значение показано в Кельвинах, для удобства восприятия переведем в градусы Цельсия (58):

$$T_{out.cels} = T_{out} - 273,15 = 764,561 \text{ °C} \quad (58)$$

Также немаловажным аспектом является полная поступающая теплота от солнечной инсоляции, которая рассчитывается следующим образом (59):

$$Q_s = A_a \cdot G_b = 6,602 \cdot 10^3 \text{ Дж} \quad (59)$$

Важность данного параметра является актуальной, потому что у рассматриваемого двигателя будет иметь предел мощности, равный энергии в момент времени от поступающей солнечной радиации.

4.7 Методика Шмидта расчёта двигателя Стирлинга

Назначение методики: определение и расчет энергетических параметров, а также производительность по заданным параметрам (температура горячей и

холодной полостей, частота вращения коленчатого вала n , давление наполнения, геометрические размеры рабочих полостей). базовой модели. Исходные данные представлены в таблицах 9 и 10.

Скорость двигателя выбирается на основе номера партии, который представляет собой эмпирическую взаимосвязь между частотой и расчетными характеристиками. Частота рассматриваемого двигателя составляет 25 Гц.

Этот метод также сочетается с методом итераций, который рассчитывается в Excel. Таким образом, числовые данные не вводятся сразу, а задаются в таблице итерационных расчетов.

Процедура допускает плавное движение поршней и отдельных блоков машины, но основными допущениями остаются изотермические процессы сжатия и расширения и идеальная регенерация. Таким образом, эта теория также идеализирована, но более реалистична, чем идеальный цикл Стирлинга.

Основные допущения цикла Шмидта:

- 1) Регенеративные процессы идеальны;
- 2) мгновенные давления в системе одинаковы;
- 3) рабочее тело подчиняется уравнению состояния идеального газа;
- 4) нет течи рабочей жидкости; масса рабочего тела остается постоянной;
- 5) изменение объемов газа в рабочих полостях синусоидальное;
- 6) теплообменники не имеют градиента температуры;
- 7) температура стенок цилиндра и поршня постоянна;
- 8) в полостях цилиндра происходит идеальное перемешивание рабочей жидкости;
- 9) температура рабочего тела во вспомогательных полостях системы постоянна;
- 10) скорость машины постоянна;
- 11) Условия состояния - установившееся состояние.

Таблица 9 – Конструктивные особенности двигателя Стирлинга

Наименование параметра	Значение	Ед.изм
Внешний диаметр теплообменной части	150	мм
Площадь поперечного сечения теплообменной части	0,0176715	м ²
Рабочий ход горячего поршня,	10	мм
Рабочий ход холодного поршня	10	мм
Длина горячего теплообменника	15	мм
Длина холодного теплообменника	15	мм
Длина регенератора	30	мм
Пористость горячего теплообменника	0,3	
Пористость холодного теплообменника	0,3	
Пористость регенератора	0,3	

Таблица 10 – Термодинамические параметры

Наименование параметра	Значение	Ед.изм
Температура нагрева	°С	765
Температура охлаждения	°С	20
Температура нагрева	К	1038,15
Температура охлаждения, К	К	297,15
Усреднённая температура регенератора	°С	293,5668219
Молярная масса газа (гелий)	кг/моль	0,004
Давление в холодном двигателе	Па	1500000
Масса газа в рабочем объёме	кг	0,008709
Разность фаз между движением поршней	град	90
Частота колебаний поршней	Гц	25

4.7.1 Определение оптимального угла поворота

Оптимальным углом $\varphi_{\text{опт}}$ называется угол поворота коленчатого вала, при котором суммарный объём рабочих полостей максимален. При таком положении коленчатого вала при гармоническом законе изменения объёмов рабочих полостей количество заправленного рабочего тела будет максимально.

Текущие объёмы рабочих полостей:

Горячей полости (60):

$$V_{\text{г}} = 0,5V_{\text{ог}}(1 + \cos\varphi). \quad (60)$$

Холодной полости (61):

$$V_{\text{х}} = 0,5K \cdot V_{\text{ог}}(1 + \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)). \quad (61)$$

Выразим объём заправки через объёмы горячей, холодной и регенеративной полости, в уравнениях (62-64):

$$V_3 = V_{\Sigma\text{max}} = (V_{\text{г}} + V_{\text{х}} + V_{\text{р}})_{\text{max}}, \quad (62)$$

при $\varphi_{\text{опт}}$.

$$V_3 = 0,5V_{\text{ог}}(1 + \cos\varphi) + 0,5KV_{\text{ог}}(1 + \cos\left(\varphi - \frac{\pi}{2}\right)) + V_{\text{ог}} \cdot \varphi, \quad (63)$$

$$V_{\text{р}} = V_{\text{ог}} \cdot \varphi. \quad (64)$$

Суммарный объём можно записать в виде (65):

$$V_{\Sigma} = V_{ог}(0,5 \cdot \sin\varphi - 0,5K\cos\varphi + X)\varphi_{опт} = 0. \quad (65)$$

Из этого уравнения выразим $\varphi_{опт}$. После преобразований получим (66-68):

$$\sin\varphi = K\cos\varphi, \quad (66)$$

$$\operatorname{tg}\varphi = K, \quad (67)$$

$$\varphi_{опт} = \operatorname{arctg}K. \quad (68)$$

Полученное значение $\varphi_{опт}$ подставляем в уравнение (65) и находим V_3 , но для этого вначале необходимо найти неизвестное значение $V_{ог}$. Для нахождения искомого параметра необходимо определить давление в цикле как функцию от угла поворота φ (69):

$$p = p(\varphi) \quad (69)$$

4.7.2 Расчет текущего давления в цикле

Масса рабочего тела в горячей полости определяется по уравнению состояния как (70):

$$m_{г} = \frac{P_{г} \cdot V_{г}}{R \cdot T_{г}} \quad (70)$$

Аналогично для холодной полости (71):

$$m_{х} = \frac{P_{х} \cdot V_{х}}{R \cdot T_{х}} \quad (71)$$

И мёртвого объёма (72):

$$m_{р} = m_{М} = \frac{P_{М} \cdot V_{М}}{R \cdot T_{М}} \quad (72)$$

При этом $P_{г} = P_{г} = P_{М} = P$

Так как общая масса рабочего тела во внутреннем контуре остается постоянной, то (73):

$$m_3 = m_{г} + m_{х} + m_{р} \quad (73)$$

Либо можно выразить в следующем виде (74):

$$m_3 = \frac{P_{г} \cdot V_{г}}{R \cdot T_{г}} + \frac{P_{х} \cdot V_{х}}{R \cdot T_{х}} + \frac{P_{М} \cdot V_{р}}{R \cdot T_{ср}} = \frac{P}{R} \left(\frac{V_{г}}{T_{г}} + \frac{V_{х}}{T_{х}} + \frac{V_{р}}{T_{ср}} \right) \quad (74)$$

Отсюда текущее давление в цикле (75):

$$P = \frac{m_3 \cdot R}{\frac{V_\Gamma + V_x + V_P}{T_\Gamma + T_x + T_{CP}}} \quad (75)$$

При известном объёме заправки V_3 , температуре заправки T_3 и давлении заправки P_3 общая масса, т.е. масса заправки рабочего тела m_3 , определяется как (76):

$$m_3 = \frac{P_3 \cdot V_3}{R \cdot T_3} \quad (76)$$

Если допустить, что изменение температуры рабочего тела в мёртвом объёме проходит в осевом направлении по линейному закону, то средняя температура рабочего тела в мёртвом пространстве определяется в первом приближении как среднеарифметическая (77):

$$T_{CP} = \frac{T_\Gamma + T_x}{2} \quad (77)$$

Текущее давление с учетом вышепринятого определяется выражением (78):

$$\begin{aligned} P &= \frac{P_3 \cdot V_3}{T_3 \left(\frac{V_\Gamma}{T_\Gamma} + \frac{V_x}{T_x} + \frac{V_P}{T_{CP}} \right)} = \frac{P(V_x + V_\Gamma + X \cdot V_{ог})_{\varphi_{опт}}}{T_3 \left(\frac{V_\Gamma}{T_\Gamma} + \frac{V_x}{T_x} + \frac{V_{ог}}{T_{CP}} \right)} \\ &= \frac{P_3(K \cdot 0,5V_{ог}(1 + \cos \varphi_{опт}) + 0,5KV_{ог}(1 + \cos \varphi_{опт} + V_{ог} \cdot \varphi))}{T_3 \left(\frac{0,5V_{ог}(1 + \cos \varphi)}{T_\Gamma} + \frac{0,5V_{ог}(1 + \sin \varphi)}{T_x} + \frac{X}{T_{CP}} \cdot V_{ог} \right)} \\ &= \frac{P_3(K \cdot 0,5(1 + \sin \varphi_{опт}) + 0,5(1 + \cos \varphi_{опт}) + X)}{T_3 \left(\frac{(1 + \cos \varphi)}{2T_\Gamma} + \frac{K(1 + \sin \varphi)}{2T_x} + \frac{X}{T_{CP}} \right)} \end{aligned} \quad (78)$$

Следовательно, $P = P(\varphi)$.

Из (78) следует, что давление и характеристики рабочего процесса термодинамически не связаны с газовой постоянной R . Текущее давление в цикле не зависит от величины описанного объёма рабочих полостей. Из выражения (78) также видно, что текущее давление рабочего тела зависит при $T_x = \text{const}$ и $T_\Gamma = \text{const}$ и X , от угла поворота коленчатого вала φ (рисунок 33). Задаваясь φ от 0 до 360 градусов, необходимо построить зависимость $P = P(\varphi)$.

Т.к. масса рабочего тела в каждой из полостей непрерывно изменяется, то работу сжатия и расширения в удельных величинах подсчитать нельзя. По этой

же причине нельзя определить удельную работу для всего внутреннего контура. В связи с вышеизложенным, цикл в механических координатах P - V правомерно изображать и оценивать по величине полного объёма V , м³.



Рисунок 33 – Зависимость давления от угла поворота

По полученному графику $P = P(\varphi)$ находим P_{max} и P_{min} , определяется величина среднего давления в цикле (79):

$$P_{cp} = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} \quad (79)$$

По заданной мощности и частоте оборотов определяется работа за цикл (80):

$$L_{цикл} = \frac{60 \cdot N}{n} \quad (80)$$

4.7.3 Расчёт максимального объёма горячей полости

С другой стороны, работу за цикл можно определить как сумму тепловых энергий, подводимых и отводимых за цикл (81):

$$L_{цикл} = Q_1 + Q_2 \quad (81)$$

отсюда Q_1 – тепло, подводимое в цикле (82):

$$Q_1 = \pi \cdot P_{cp} \cdot V_{ог} \cdot \delta \cdot \frac{\sin \theta}{1 + (1 - \delta^2)^{0.5}} \quad (82)$$

Q_2 – тепло, отводимое в цикле (83):

$$Q_2 = \pi \cdot P_{\text{ср}} \cdot K \cdot V_{\text{ог}} \cdot \delta \cdot \frac{\sin(\theta - \alpha)}{1 + (1 - \delta^2)^{0.5}} \quad (83)$$

δ – вспомогательный параметр (84):

$$\delta = \frac{\sqrt{\tau^2 K^2 + 2 \cdot \tau \cdot K \cdot \cos \alpha}}{\tau + K + 2 \cdot S} \quad (84)$$

Отношение температур будет выражено (85):

$$\tau = \frac{T_{\text{х}}}{T_{\text{г}}} \quad (85)$$

Приведенный мертвый объем рассчитывается через (86):

$$S = \frac{2 \cdot X \cdot \tau}{\tau + 1} \quad (86)$$

Тогда следующий угол сдвига можно найти через (87):

$$\theta = \arctg\left(\frac{K \cdot \sin \alpha}{\tau + K \cdot \cos \alpha}\right) \quad (87)$$

Тогда мощность можно выразить через (88):

$$L_{\text{цикл}} = \pi \cdot P_{\text{ср}} \cdot V_{\text{ог}} \cdot \delta \cdot \frac{\sin \theta}{1 + (1 - \delta^2)^{0.5}} + \pi \cdot P_{\text{ср}} \cdot K \cdot V_{\text{ог}} \cdot \delta \cdot \frac{\sin(\theta - \alpha)}{1 + (1 - \delta^2)^{0.5}} \quad (88)$$

Отсюда объем горячей полости (89):

$$V_{\text{ог}} = \frac{L_{\text{цикл}}}{\frac{\pi \cdot P_{\text{ср}} \cdot \delta}{1 + (1 - \delta^2)^{0.5}} \cdot (\sin \theta + K \cdot \sin(\theta - \alpha))} \quad (89)$$

Определим значение подводимой и отводимой теплоты с учетом найденного значения $V_{\text{ог}}$.

4.7.4 Определение текущих объёмов рабочих полостей и построение P-V диаграммы рабочих полостей

Объем горячей полости также определить с помощью рабочего хода горячего поршня и пористости материала с учетом угла относительного смещения [21].

Аналогично определяется объем холодной полости, так как рабочий ход горячего и холодного поршней одинаковы, соответственно одинаков и объем.

По полученным зависимостям объёмов рабочих полостей от угла поворота строим их зависимости $V_r = V_r(\varphi)$, $V_x = V_x(\varphi)$ и $V_\Sigma = V_\Sigma(\varphi)$ при изменении от 0 до 360 градусов (рисунок 34-35):

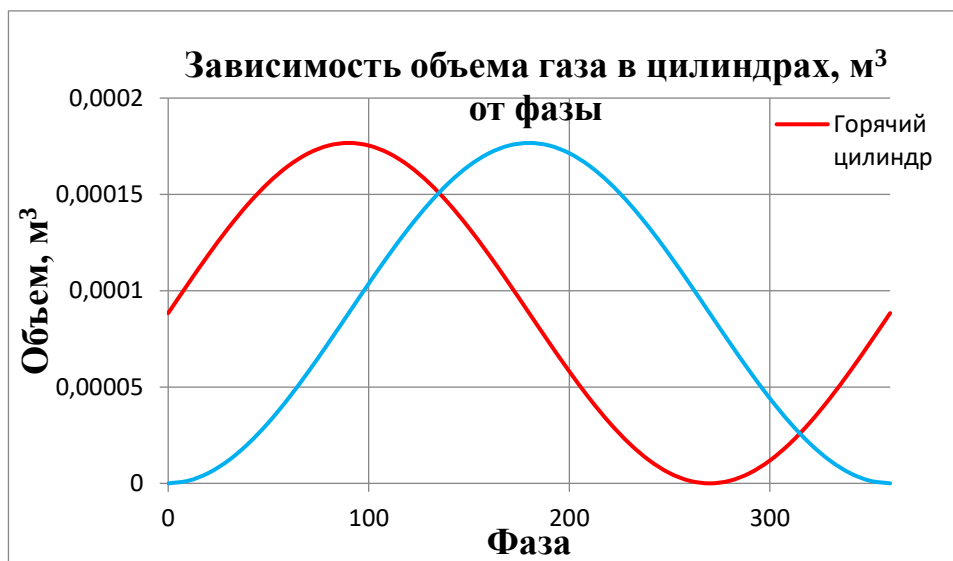


Рисунок 34 - Зависимость объёма горячей и холодной полостей от угла поворота

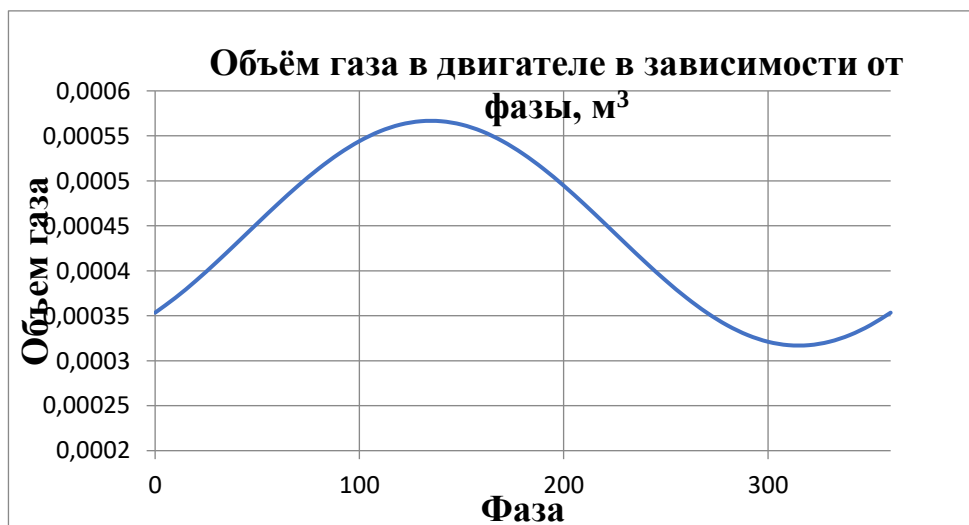


Рисунок 35 - Зависимость суммарного объёма от угла поворота

4.7.5 Построение P - V диаграммы рабочих полостей

При работе двигателя существенное отклонение от идеальности происходит вследствие непрерывного движения поршней в отличие от прерывистого движения для идеального случая. В результате цикл в P - V диаграмме несколько видоизменяется; в этом случае он имеет вид непрерывной плавной кривой, а четыре термодинамических процесса не имеют резких

переходов. Неизотермичность процессов сжатия и расширения – другая важная причина отклонения действительного цикла от идеального. По полученным результатам строятся P-V диаграммы детандерной, компрессорной и суммарной полостей (рис. 36-37). Результаты расчетов занесены в таблицу 11.

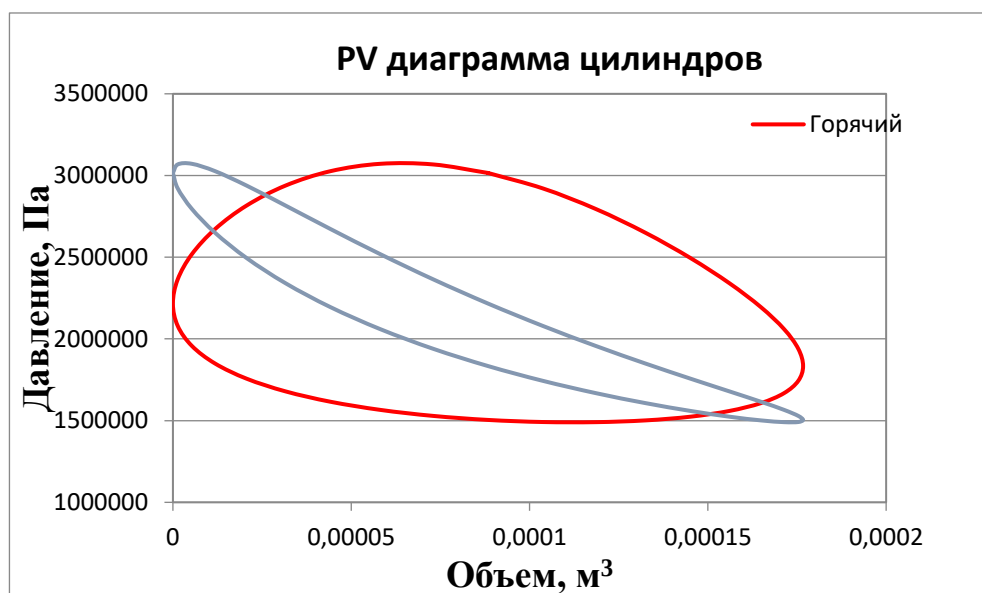


Рисунок 36 – Зависимость давления от объема полостей

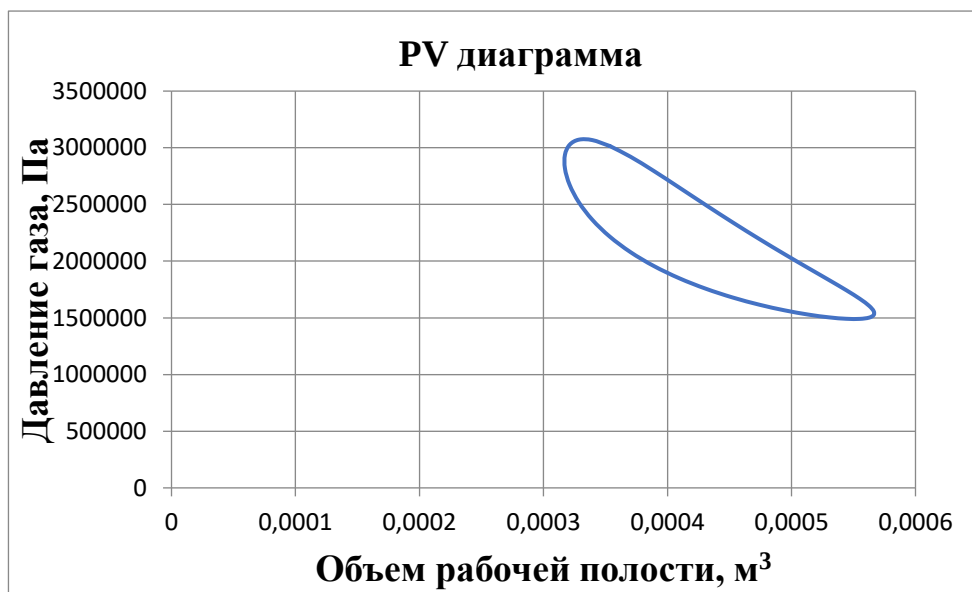


Рисунок 37 – Зависимость давления от суммарного объема

На рисунке 38 изображена взаимосвязь распределения скорости газа в зависимости от фазы.

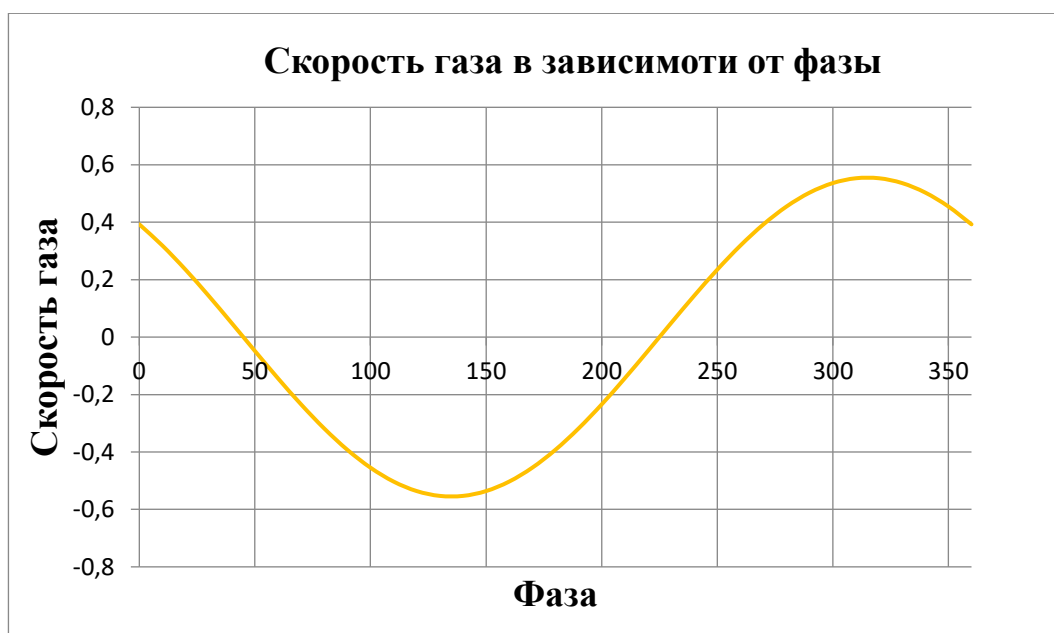


Рисунок 38 - Распределение скорости газа в зависимости от фазы

Таблица 11 – Результаты произведенных расчетов

Наименование параметра	Значение	Ед.изм
Максимальное давление в цикле	3071642,714	атм
Минимальное давление в цикле	1490715,610	атм
Среднее давление в цикле	2281179,162	атм
Амплитуда колебаний давления в % от среднего значения	34,652	%
Работа горячего поршня за период колебаний	204,047	Дж
Работа холодного поршня за период колебаний	-57,620	Дж
Работа двигателя за период колебаний	146,427	Дж
Мощность горячего поршня	5101,2	Вт
Мощность холодного поршня	-1440,5	Вт
Мощность двигателя	3660,7	Вт

Согласно формуле (53), КПД такого двигателя Стирлинга будет составлять:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{1038,15 - 297,15}{1038,15} = 0,71$$

4.8 Подбор синхронного генератора

Трехфазная синхронная машина с самого начала развития альтернативной энергетики рассматривалась как один из основных типов генераторов. Его конструктивные исполнения бывают с электромагнитным возбуждением или с постоянными магнитами, которые позволяют добиваться хороших массогабаритных характеристик. Основная проблема у данного типа электрических машин заключается в том, что для генерирования переменного тока определенных параметров (частота и амплитуда напряжения) необходимо поддерживать постоянную скорость вращения ротора. В случае с электромагнитным возбуждением есть возможность поддерживать в определенном интервале амплитуду генерируемого возбуждения за счет изменения возбуждения, которое регулируется током обмотки возбуждения. Однако добиться поддержания определенной частоты напряжения при изменении скорости вращения невозможно без применения дополнительных устройств. [22] Структурная схема генерации электричества на основе синхронного генератора (СГ) приведена на рисунке 39.

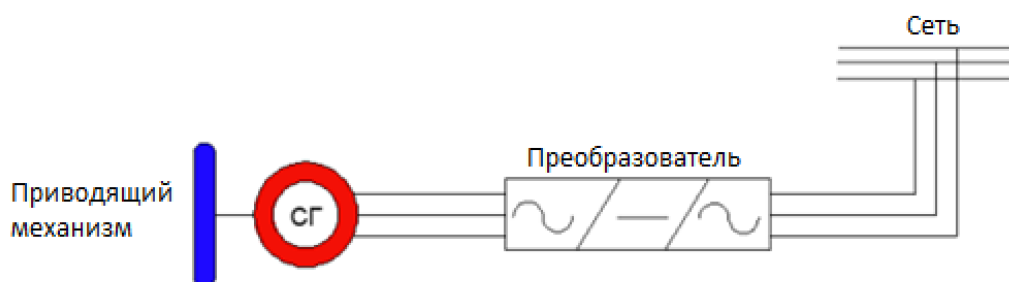


Рисунок 39 – Структурная схема электрогенерации

Как видно из схемы, в состав генераторной установки, помимо турбины и самого генератора, входит электронный преобразователь частоты (ПЧ). Данный преобразователь первоначально выпрямляет генерируемое напряжение, а потом инвертирует его в переменное напряжение с заданными параметрами. Данный тип ветрогенераторов в настоящее время довольно широко используется в ветроустановках различной мощности. Однако в ВЭУ большой мощности СГ применяются мало из-за ограниченных возможностей силовой электроники. Кроме этого, большое количество ступеней преобразования снижает общий КПД генерирующей системы.

Выбор синхронного осуществляется исходя из условия (90):

$$P_{\text{ном.г}} \geq P_{\text{ном.дв}} \quad (90)$$

Также выборочным параметром будет число пар полюсов, которое зависит от частоты вращения (91):

$$p = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2 \quad (91)$$

По заданным условиям был выбран однофазный 2-полюсный синхронный генератор переменного тока Месс Alte, с номинальной мощностью 3,8 кВт, и частотой вращения 1500 об/мин, который изображен на рисунке 40.



Рисунок 40 – Синхронный генератор Месс Alte

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Потенциал использования гелиоэнергетики в Казахстане очень высок, о чем свидетельствует статистика метеостанций, представленная в данной главе 1. С использованием этих данных были определены необходимые значения средней солнечной радиации, скорости ветра, средней продолжительности и количества солнечных дней в условиях Алматы, которые используются для дальнейших расчетов.

Рассмотрены различные виды изготовления параболических концентраторов, на основании которого можно сделать вывод, что самым распространенным является метод моллирования стекла. Однако для сооружения экспериментального образца и упрощение изготовления достаточным будет покрытие светоотражающим материалом существующей параболической поверхности, в нашем случае это спутниковая параболическая антенна.

Большую значимость для КПД концентратора и ресивера имеют оптические и теплофизические характеристики материала, такие как коэффициент отражения, излучения и поглощения, таким образом для улучшения КПД необходимо повысить качество отражателя и приемника. На величину потерь играет роль скорость ветра, форма и изоляция ресивера, таким образом можно оптимизировать и эту составляющую. Также немаловажным является взаимоотношение массового расхода и температуры, которая имеет обратную пропорцию.

Произведен обзор существующих технологий генерации концентрированного солнечного излучения. Наибольшее распространение получили параболическая тарелка с двигателем Стирлинга в виде ресивера, в виду его простоты, надежности и высокого КПД. Остальные тепловые машины имеют потенциал развития, однако имеются сложности как технического, в виду низкого КПД, нестабильности, больших массогабаритных показателей, так и экономической целесообразности.

Был разработан и смоделирован солнечный спиральный ресивер тепла, при помощи которого в совокупности с параболическим концентратором возможно произвести 71 л воды, разогретой до 85 °С в час, а суммарный КПД установки равняется 0,82.

По методике Шмидта, с использованием метода итераций был рассчитан двигатель Стирлинга с заданием начальных параметров давления и конструктивных особенностей. При коэффициенте концентрации 256 температура на горячей стороне составила 765 °С. Двигатель заданных габаритов имеет хорошие показатели и способен генерировать электроэнергию в приемлемых масштабах. Мощность двигателя составила 3660,7 кВт, а КПД составляет 0,71.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Лаборатория Мауна Лоа. Электронный ресурс. – в режиме доступа: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html#mlo>. (Дата обращения 31.03.2021 г.).
- 2 Чередов В.О., Каримов А.М., Акылбекова А.Ж. – Оценка потенциала солнечного излучения в пределах территории Республики Казахстан для выработки электроэнергии
- 3 Электронный ресурс – в режиме доступа: <http://kazakhstan.pogoda360.ru/670571/avg> (Дата обращения 24.12.2021 г.)
- 4 Электронный ресурс. – в режиме доступа: <http://atlassolar.kz/Maps/Demo?map=solar#>. (Дата обращения 24.12.2021 г.).
- 5 Обухов С.Г. – Системы генерирования электрической энергии с использованием возобновляемых энергоресурсов /Обухов С.Г. Учеб. пособие. Томского политехнического университета. - 2008.- 140 с.
- 6 Goswami D. Energy conversion. / Goswami D., Kreith F. // CRC. -2008.
- 7 Стребков Д. С., Тверьянович В. – Солнечные электростанции: концентраторы солнечного излучения 2-е изд. Учебное пособие для вузов
- 8 Электронный ресурс <https://ecotechnica.com.ua/energy/solntse/74-solnechnyj-kontsentrator-ripasso-samyj-effektivnyj-sposob-preobrazovaniya-solnechnoj-energii.html> (Дата обращения 05.07.2021 г.).
- 9 Электронный ресурс – в режиме доступа: <https://eenergy.media> (Дата обращения 05.07.2021 г.).
- 10 Электронный ресурс – в режиме доступа: <https://zedsolar.com/> (Дата обращения 05.07.2021 г.).
- 11 Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения. - Л.: Наука, 1989. 310 с.
- 12 Bellos E., Bousi E., Tzivanidis C., Pavlovic S. Optical and thermal analysis of different cavity receiver designs for solar dish concentrators
- 13 Электронный ресурс – в режиме доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B2%D0%B8%D0%B3%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%A1%D1%82%D0%B8%D1%80%D0%B%D0%B8%D0%BD%D0%B3%D0%B0. (Дата обращения 05.05.2021 г.).
- 14 Электронный ресурс – в режиме доступа: <https://jtecenergy.com/patents-3>. (Дата обращения 13.07.2021 г.).
- 15 Электронный ресурс – в режиме доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%83%D1%80%D0%B1%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D0%A2%D0%B5%D1%81%D0%BB%D0%B0. (Дата обращения 14.07.2021 г.).

- 16 Электронный ресурс – в режиме доступа: <https://mash-xxl.info/info/548175/> - Энциклопедия физических свойств веществ и материалов. (Дата обращения 22.08.2021 г.).
- 17 Cengel Y.A., Ghajar A. Heat and mass transfer (a practical approach, SI 727 version), McGraw-Hill Education, 2011
- 18 Leinhard IV J., Leinhard V J., A Heat Tranfer Textbook, (fourth ed.), 729 Philogiston Press, USA, 2012, 354-360
- 19 Petela R., Exergy of undiluted thermal radiation, Solar Energy 2003;74:469-488
- 20 Bellos E., Tzivanidis C., Tsimpoukis D. Enhancing the performance of parabolic 734 trough collectors using nanofluids and turbulators, Renewable and Sustainable Energy 735 Reviews 2018;91:358-375
- 21 Белозерцев В.Н. Методы расчета и экспериментальные исследования тепловых машин Стирлинга: учеб. пособие / В.Н. Белозерцев, А.А. Горшкалев, С.О. Некрасова, А.А. Шиманов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2015. – 76 с.: ил.
- 22 Электронный ресурс <https://www.tskenergo.ru/product/alternator/>. (Дата обращения 01.05.2022г.).
- 23 Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. 1990.-392 с.
- 24 Вейнберг В.Б. Оптика в установках для использования солнечной энергии. - Л.: Оборонгиз, 1959.
- 25 Григорьев В.А., Зорин В.М. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент. -М.: Энергоиздат, 1982. С. 157, 178.

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Эжібек Темірлан

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Разработка и исследование солнечных спиральных ресиверов при помощи компьютерного моделирования

Научный руководитель: Диас Умышев

Коэффициент Подобия 1: 8.1

Коэффициент Подобия 2: 6.5

Микропробелы: 23

Знаки из здругих алфавитов: 3

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:

В диссертации не имеется признаков плагиата

2022-06-07

Дата

Нуржан Балгаев

проверяющий эксперт



[Handwritten signature]

Протокол

о проверке на наличие неавторизованных заимствований (плагиата)

Автор: Эжібек Темірлан

Соавтор (если имеется):

Тип работы: Магистерская диссертация

Название работы: Разработка и исследование солнечных спиральных ресиверов при помощи компьютерного моделирования

Научный руководитель: Диас Умышев

Коэффициент Подобия 1: 8.1

Коэффициент Подобия 2: 6.5

Микропробелы: 23

Знаки из здругих алфавитов: 3

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:

Допущен к защите

2022-06-07

Дата



Заведующий кафедрой "Тергетика"
Сурсеибай Е.А.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И.Сатпаева

РЕЦЕНЗИЯ

на магистерскую диссертацию (проект)

магистрант Әжібек Темірлан
специальность 7М0711300 – Энергетика и электротехника;

Диссертационная работа на тему:

«Разработка и исследование солнечных спиральных ресиверов при помощи компьютерного моделирования»

1. Характеристика актуальности работы

Работа актуальна, актуальность темы научного исследования выражена в том, что в условиях роста потребления энергоресурсов и населения, а также все большим экологическим следом ископаемых источников энергии актуальны задачи снижения расхода электроэнергии, повышения качества продукции, генерации зеленого тепла и электроэнергии, а также сокращения экологической нагрузки.

2. Характеристика самостоятельности подхода автора

Автор самостоятельно провел обзор существующих технологий солнечной энергетики, их возможности, достоинства и недостатки, установлено, что для технологий CSP оптимальным решением является использование параболического концентратора вместе с двигателем Стирлинга для генерации электроэнергии. Также разработана модель спирального ресивера тепла при помощи компьютерного моделирования.

3. Анализ точки зрения автора магистерской диссертации

Актуальность темы научного исследования выражена в том, что в условиях роста потребления энергоресурсов и населения, а также все большим экологическим следом ископаемых источников энергии актуальны задачи снижения расхода электроэнергии, повышения качества продукции, генерации зеленого тепла и электроэнергии, а также сокращения экологической нагрузки.

Цель данной научной работы – это разработать и исследовать модель солнечного параболического концентратора и спирального ресивера для производства тепла, а также исследования двигателя Стирлинга заданных параметров для возможности генерации электроэнергии.

Содержание работы полностью соответствует заявленному направлению.

Автор достаточно уделит внимание аналитическому расчету тепловых процессов, проходящих в рамках лучистого и конвективного теплообмена, также провел расчетно-теоретическое исследование по методике Шмидта для расчета двигателя Стирлинга и произвел компьютерное моделирование тепловых процессов, протекающих в спиральном ресивере, сформировал выводы по способам повышения энергоэффективности.

4. Анализ умения магистранта пользоваться методами научного исследования

Работа выполнена с учётом всех поставленных задач исследования. Диссертация имеет четкую логическую структуру, прослеживается поэтапность и логическая последовательность выполнения задач исследования, анализа результатов, выводов,

рекомендаций и предложений по практическому их применению. Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, и выводов, полученных соискателем достаточная.

5. Степень обоснованности выводов и рекомендаций магистранта

Были выявлены основные параметры, влияющие на оптический, тепловой и эксергетический КПД спирального ресивера. Также сделаны выводы по возможности повышения КПД двигателя Стирлинга в рамках использования с предложенным параболическим концентратором.

6. Анализ достоверности полученных магистрантом результатов

Достоверность полученных магистрантом результатов подтверждена

- 1) использованием стандартных справочных методик, которые согласуются с выбранным методом теории электро- и теплоэнергетических систем;
 - 2) использованием достоверных авторских исходных данных высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения;
- апробация полученных данных на республиканских конференциях

7. Анализ новизны и практической значимости работы

Практическая значимость работы в том, что результаты научных исследований по анализу, расчету и моделированию солнечных параболических концентраторов и различных приемников-преобразователей лучистой энергии могут быть использованы для дальнейшего конструирования опытного образца.

8. Анализ недостатков диссертации

В диссертационной работе имеется расчетная часть, выполненная на основе аналитического метода с использованием справочных данных, также расчет с помощью итераций по методике Шмидта. Из содержания магистерской диссертации видно, что собран и проанализирован впечатляющий объем справочных данных, получены конкретные научно-обоснованные результаты. Замечание по диссертационной работе нет.

ОЦЕНКА РАБОТЫ

В целом работа обладает достаточной теоретической и практической значимостью, изложена в логической последовательности, грамотно и аккуратно оформлена. В заключении работы сделаны четкие выводы. Выводы и рекомендации обоснованы.

Считаю, что автор данной работы, Эжібек Темірлан, заслуживает присуждения академической степени магистра технических наук по специальности

7M0711300 – Энергетика и электротехника.

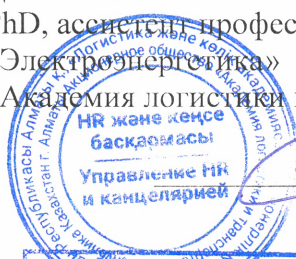
Оценка по балльно-рейтинговой буквенной системе 97 баллов,

Должность:

PhD, ассистент профессора кафедры

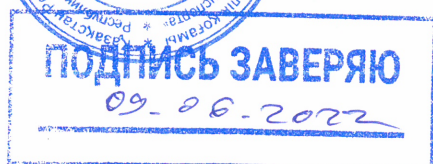
«Электроэнергетика»

«Академия логистики и транспорта»



подпись

Калиев Ж.Ж.



" 09 " 06 2022 г.

Меладва И.С.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

**Казахский национальный исследовательский технический университет
имени К.И.Сатпаева**

**Отзыв научного руководителя
на магистерскую диссертацию (проект)**

магистрант Әжібек Темірлан
специальность 7M07113 – Электротехника и энергетика

Диссертационная работа на тему:

«Разработка и исследование солнечных спиральных ресиверов при помощи компьютерного моделирования»

Актуальность темы научного исследования выражена в том, что в условиях роста потребления энергоресурсов и населения, а также все большим экологическим следом ископаемых источников энергии актуальны задачи снижения расхода электроэнергии, повышения качества продукции, генерации зеленого тепла и электроэнергии, а также сокращения экологической нагрузки.

Цель данной научной работы – это разработать и исследовать модель солнечного параболического концентратора и спирального ресивера для производства тепла, а также исследования двигателя Стирлинга заданных параметров для возможности генерации электроэнергии.

Содержание работы полностью соответствует заявленному направлению. Автор достаточно уделит внимание аналитическому расчету тепловых процессов, проходящих в рамках лучистого и конвективного теплообмена, также провел расчетно-теоретические исследование по методике Шмидта для расчета двигателя Стирлинга и произвел компьютерное моделирование тепловых процессов, протекающих в спиральном ресивере, сформировал выводы по способам повышения энергоэффективности.

Работа выполнена с учётом всех поставленных задач исследования. Диссертация имеет четкую логическую структуру, прослеживается поэтапность и логическая последовательность выполнения задач исследования, анализа результатов, выводов, рекомендаций и предложений по практическому их применению. Степень обоснованности положений, выносимых на защиту, и выводов, полученных соискателем достаточная.

Были выявлены основные параметры, влияющие на оптический, тепловой и эксергетический КПД спирального ресивера. Также сделаны выводы по возможности повышения КПД двигателя Стирлинга в рамках использования с предложенным параболическим концентратором.

Достоверность полученных магистрантом результатов подтверждена

1) использованием стандартных справочных методик, которые согласуются с выбранным методом теории электро- и теплоэнергетических систем;

2) использованием достоверных авторских исходных данных высоковольтных измерительных трансформаторов напряжения;

апробация полученных данных на республиканских конференциях

В диссертационной работе имеется расчетная часть, выполненная на основе аналитического метода с использованием справочных данных, также расчет с помощью

итераций по методике Шмидта. Из содержания магистерской диссертации видно, что собран и проанализирован впечатляющий объем справочных данных, получены конкретные научно-обоснованные результаты. Замечание по диссертационной работе нет.

ОЦЕНКА РАБОТЫ

В целом работа обладает достаточной теоретической и практической значимостью, изложена в логической последовательности, грамотно и аккуратно оформлена. В заключении работы сделаны четкие выводы. Выводы и рекомендации обоснованы.

Считаю, что автор данной работы, Ғжібек Темірлан, заслуживает присуждения академической степени магистра технических наук по специальности 7M07113 – Электротехника и энергетика.

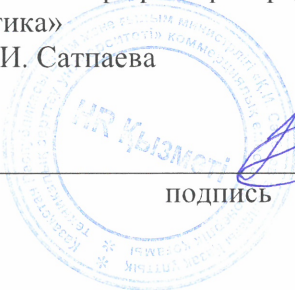
Оценка по балльно-рейтинговой буквенной системе 96 баллов,

Должность:

Phd, ассоциированный профессор кафедры

«Электроэнергетика»

КазНУТУ им. К.И. Сатпаева


подпись

Д.Р. Умышев

"31" "05" 2022 г.