

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Новосибирский государственный технический университет»

На правах рукописи

Хорева Валентина Александровна



ЭКСЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ
ТРИГЕНЕРАЦИИ НА БАЗЕ ИНСОЛЯЦИИ ЮГА СИБИРИ

Специальность 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Елистратов Сергей Львович

Новосибирск – 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	12
1.1 Место и роль солнечной энергетики в мире и России	12
1.2 Общая характеристика гелиотехнологий монопроизводства электроэнергии, теплоты и холода.....	16
1.2.1 Современные технологии фотовольтаики для прямого преобразования потока солнечной радиации в электроэнергию	16
1.2.2 Солнечные энергоустановки, использующие термодинамические циклы	20
1.2.3 Основные технологии и оборудование для трансформации потока солнечной радиации в тепловую энергию	22
1.2.4 Получение холода положительных и отрицательных температур на основе солнечной энергии	29
1.3 Фотоэлектрические тепловые коллекторы	31
1.4 Системы тригенерации на основе солнечной энергии	36
Выводы по главе 1	37
ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНСОЛЯЦИИ.....	38
2.1 Оценка возможностей использования солнечной инсоляции для создания систем тригенерации.....	38
2.1.1 Использование энергии Солнца вне атмосферы Земли	38
2.1.2 Инсоляция в пределах земной атмосферы	41
2.2 Общая характеристика традиционных моделей расчета солнечной инсоляции	42
2.3 Моделирование солнечной инсоляции с учетом переменной плотности атмосферы.....	51
2.4 Анализ результатов расчета по авторской модели для региона юга Сибири	57

2.5 Экологическая эффективность солнечных водонагревательных коллекторов на юге Сибири.....	66
2.6 Результаты экологического расчета	68
Выводы по главе 2.....	71
ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ГИБРИДНЫХ ГЕЛИОСИСТЕМ	73
3.1 Гибридная система производства электроэнергии на основе солнечной энергии.....	73
3.1.1 Определение термических условий работы гибридной системы	73
3.1.2 Выбор рабочего тела для органического цикла Ренкина	75
3.1.3 Выбор теплообменников для гибридных солнечных энергоустановок .	76
3.2 Схема гибридного производства электроэнергии	79
3.3 Расчет органического цикла Ренкина в составе гибридной солнечной энергоустановки	81
3.4 Расчетные показатели эффективности гибридной энергоустановки	83
Выводы по главе 3.....	85
ГЛАВА 4 ПОЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ И ХОЛОДА ОТ СОЛНЧЕНОЙ ЭНЕРГИИ	87
4.1 Экспериментальные исследования вакуумного солнечного коллектора ..	87
4.1.1 Экспериментальная установка и методика исследования	87
4.1.2 Анализ полученных результатов на основе эксергетического метода	89
4.2 Плоский солнечный коллектор (авторская разработка).....	94
4.2.1 Общая характеристика	94
4.2.2 Характеристика новизны	96
4.2.3 Методика эксперимента и результаты	97
4.3 Оценка эксергии веществ и материалов	99
4.4 Сравнение эффективности использования эксергии солнечного излучения на юге Сибири и на экваторе Земли.....	101
4.5 Анализ эффективности абсорбционной холодильной машины, использующей солнечную энергию	105
Выводы по главе 4.....	109

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТРИНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ	110
5.1 Схема тригенерации на основе солнечной энергии	110
5.2 Использование только солнечной энергии	112
5.3 Эксергетическая диаграмма сквозного преобразования потока солнечной радиации в системе тригенерации.....	113
Выводы по главе 5.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	117
ПРИЛОЖЕНИЕ «А» РАСЧЕТ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА ...	133
ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	137
ПРИЛОЖЕНИЕ «В» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Солнце является бесплатным и бесконечным источником энергии. Достоинствами солнечной энергии являются экологичность и безопасность, а одним из самых существенных недостатков – неравномерность. К тому же, мощность продолжительность поступления солнечной радиации зависит от места расположения приемника [1-10].

Суммарная солнечная радиация, поступающая на территорию юга Сибири, характеризуется существенной пространственной и сезонной изменчивостью. К югу Сибири относятся: Кемеровская область, Республика Хакасия, Республика Тыва, Республика Бурятия, Забайкальский край, Республика Алтай, Алтайский край [11].

Южные районы Сибири относятся к солнечным регионам [12]. Здесь годовой приход солнечной радиации при ясном небе (максимальное поступление солнечной энергии на данной широте) колеблется от 4100 МДж/м² до 5700 МДж/м² [6, 7]. Среднегодовое число пасмурных дней на юге Западной Сибири в 2,6 раза меньше, чем в европейской части России на соответствующих широтах [13].

Факторами, стимулирующими использование солнечной энергетики на юге Сибири, являются удаленные населенные территории, до которых не дотянуты ЛЭП, или слабое развитие сети линий электропередач в этих местах.

Использование солнечной энергии в южных регионах Сибири возможно, не смотря на зависимость солнечной генерации от сезона, времени суток, погоды и нестабильности выработки солнечной электроэнергии. Солнечные электростанции обычно обеспечивают теплом или электроэнергией небольшие отдаленные объекты [14].

На январь 2023 г. на юге Сибири работают шестнадцать солнечных электростанций общей суммарной установленной мощностью более

275 МВт. Они расположены в Республике Бурятия, Республике Алтай и Республике Хакасия [15].

Наиболее эффективное решение заключается в создании на основе солнечной энергии систем тригенерации для получения тепла, холода и электроэнергии.

Солнечная энергия является неотъемлемой частью современной энергетики, ориентированной на экологически чистое производство электроэнергии, теплоты и холода.

Использование энергии, приходящей от Солнца, позволяет решить следующие вопросы экологически чистого энергообеспечения:

1. Сокращение углеродного следа и снижение выбросов от технологий производства электроэнергии и теплоты за счет экономии органического топлива.

2. Обеспечение автономного энерго- и теплоснабжения в регионах с низкой плотностью населения.

3. Повышение надежности энергообеспечения, тепло- и холодоснабжения удаленных территорий и объектов производственного и социального назначения за счет создания автономных источников в дополнение к основным.

4. Энергоснабжение фермерских хозяйств, зон рекреации, мест сезонной работы, садово-огородных строений, индивидуального жилья и дач.

Существуют два принципиально разных способа использования солнечной радиации:

1. Прямое преобразование в фотоэлементах электромагнитного излучения в постоянный ток с последующим преобразованием в переменный.

2. Термодинамический, основанный на преобразовании солнечной энергии в тепловую, которая может быть использована для нужд тепло- и холодоснабжения и выработки электроэнергии.

Целью диссертационной работы является оценка эффективности технологий тригенерации на основе солнечной энергии применительно к региону юга Сибири.

Задачи исследования:

1. Разработка модели поступления потока солнечной энергии на приемник, учитывающей его пространственно-временное расположение, а так же градиент плотности атмосферы.
2. Разработка, апробация и оценка эффективности тепловых солнечных коллекторов для систем теплоснабжения.
3. Оценка эффективности объединения разнородных технологий выработки электроэнергии на основе солнечной радиации.
4. Разработка и анализ энергоэффективности схемы тригенерационной установки на основе сочетания монотехнологий производства холода, теплоты и электроэнергии.

Степень разработанности темы исследования.

В научной литературе вопросы сравнительного анализа эффективности систем преобразования солнечной энергии в системах тригенерации не освещены в достаточной мере, позволяющей определить эксергетическую эффективность этих технологий.

Анализ совершенства системы является первым этапом создания высокоэффективных энергетических технологий. Именно эксергетический метод анализа эффективности систем с различными по своей физической природе потоками энергии позволяет объективно произвести такое сравнение.

Конечным результатом эксергетического анализа является относительная оценка совершенства системы, то есть, эксергетический КПД.

Анализ научных исследований отечественных и зарубежных ученых в области гелиоэнергетики: Ж.И. Алферова, Б.В. Лукутина, В.З. О.С. Малининой, С.В. Мериуца, А.Б. Алхасова, А.В. Винникова, О.С. Попеля, М.Ю. Румянцева, Б.С. Сажина, Хоу С. (Китай), М. Грина (Австралия) и др.

определил, что существуют отдельные технологии по преобразованию потока солнечного излучения только в электроэнергию, тепло или холод. В литературе присутствуют отрывочные несистематизированные сведения по вопросам тригенерации на основе солнечной энергии.

Таким образом, разработка систем тригенерации имеет высокую актуальность для выполнения фундаментальных и прикладных исследований.

Методы исследования:

1. Математическое моделирование потока солнечной радиации в пределах земной атмосферы.
2. Эксергетический метод, как универсальный метод анализа эффективности технологий производства теплоты, холода и электроэнергии.
3. Экспериментальное исследование современных систем тепловых солнечных коллекторов.

Научная новизна работы:

1. Разработан комплексный подход определения эффективности основных технологий тригенерации, использующих солнечную радиацию.
2. Усовершенствована модель расчета солнечной радиации, приходящей на приемные устройства (фотоэлемент, солнечный теплогенератор и т.д.), с учетом нелинейности плотности атмосферы и спектра солнечного излучения.

Практическая значимость полученных результатов:

1. Установлены границы применимости солнечных технологий для региона юга Сибири.
2. Проведено сопоставление эффективности выработки электроэнергии на основе технологий фотовольтаики и технологий на основе термодинамических циклов.
3. Предложена схема установки тригенерации, обеспечивающей повышение эффективности использования солнечной радиации.

4. Разработан, изготовлен и апробирован опытный образец авторского плоского солнечного коллектора для ГВС и отопления для малоэтажного домостроения.

Личный вклад автора.

Личный вклад автора заключается в самостоятельном проведении теоретического анализа, натурных исследований, обработке и оценке полученных данных, разработке авторской модели плоских солнечных коллекторов.

Все разработки и результаты исследований, изложенные в основном тексте диссертации без ссылок на другие источники, получены лично автором либо при его непосредственном участии. В совместных публикациях вклад автора равнозначный.

Научная специальность, которой соответствует диссертация.

Диссертационная работа Хоревой Валентины Александровны «Эксергетическая эффективность технологий тригенерации на базе инсоляции юга Сибири» соответствует паспорту научной специальности 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы по следующим направлениям:

1. Разработка методов расчета, алгоритмов и программ энергетических установок на возобновляемых видах энергии.

2. Математическое моделирование, численные и натурные исследования рабочих процессов, протекающих в установках на возобновляемых видах энергии.

6. Теоретический анализ, математическое моделирование, проектирование энергоустановок, на основе преобразования возобновляемых видов энергии с целью исследования их параметров, режимов работы, экономии ископаемых видов топлива и решения проблем экологического и социально-экономического характера.

7. Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем и установок на их финансово-экономические и инвестиционные показатели.

Положения, выносимые на защиту:

1. Уточненная модель расчета потока солнечной радиации, учитывающая пространственно-временное расположение приемника солнечной радиации, а так же энергетическую составляющую волнового спектра солнечного излучения и градиент плотности атмосферы.

2. Результаты эколого-экономического анализа работы системы теплоснабжения на основе авторского варианта плоского солнечного коллектора.

3. Схема тригенерации с гибким регулированием отпуска тепла, холода и электроэнергии в широком диапазоне параметров на основе потока солнечной радиации.

Степень достоверности результатов обеспечивается применением апробированного метода эксергетического анализа различных по физической природе потоков энергии. Достоверность экспериментальных результатов подтверждается использованием современного оборудования, приборов и материалов, используемых в солнечной энергетике и соответствием расчетных результатов многолетним статистическим данным актинометрических наблюдений.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (г. Новосибирск, 2020, 2021, 2022, 2023); Всероссийской конференции «Сибирский теплофизический семинар» (г. Новосибирск, 2020, 2021, 2022); Всероссийской научно-практической конференции «Aspire to science» (г. Новосибирск, 2020); Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика: современные вызовы» (г. Севастополь, 2021; г. Сочи, 2022; г. Махачкала, 2023); Всероссийской научной конференции «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий» (г. Новосибирск, 2022); Международной научной конференции «Sustainable and efficient use of energy, water and natural resources» (г. Санкт-Петербург, 2021); Международный симпозиум

«Устойчивая энергетика и энергомашиностроение – 2021: SUSE 2021» (Казань, 2021); Технопром-2023 (Новосибирск).

Публикации. Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 21 научной работе, из них: 2 научные статьи в журналах, входящих в перечень ВАК; 3 научные статьи в журналах Scopus, 14 – в сборниках трудов конференций. Получено 1 свидетельство на программу ЭВМ, 1 патент на изобретение.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка используемой литературы из 161 наименования, 3 приложений. Текст диссертации изложен на 141 странице печатного текста, содержит 61 рисунок, 25 таблиц.

ГЛАВА 1 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

1.1 Место и роль солнечной энергетики в мире и России

В мировом энергобалансе поступающая на поверхность Земли солнечная энергия занимает лидирующее место, о чем свидетельствуют данные Мирового энергетического агентства (Рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Мировые запасы энергетических ресурсов, млрд. т. у. т.

На поверхность Земли за год приходит количество солнечной энергии, равное $1,2 \cdot 10^{14}$ т у.т., что больше разведанных запасов органического топлива ($6 \cdot 10^{12}$ т у.т.).

Использование энергии, приходящей от Солнца, позволяет решить следующие вопросы:

- сокращение углеродного следа от технологий производства электроэнергии и теплоты;
- сокращение выбросов от сжигания органического топлива;
- обеспечение автономного энергоснабжения в регионах с низкой плотностью населения;

- повышение надежности энергообеспечения удаленных территорий за счет создания дополнительных автономных (резервных) источников тепло-, холодо- и электроснабжения.

Схематично алгоритм преобразования потоков солнечной радиации в энергетические продукты представлен на рисунке 1.2.

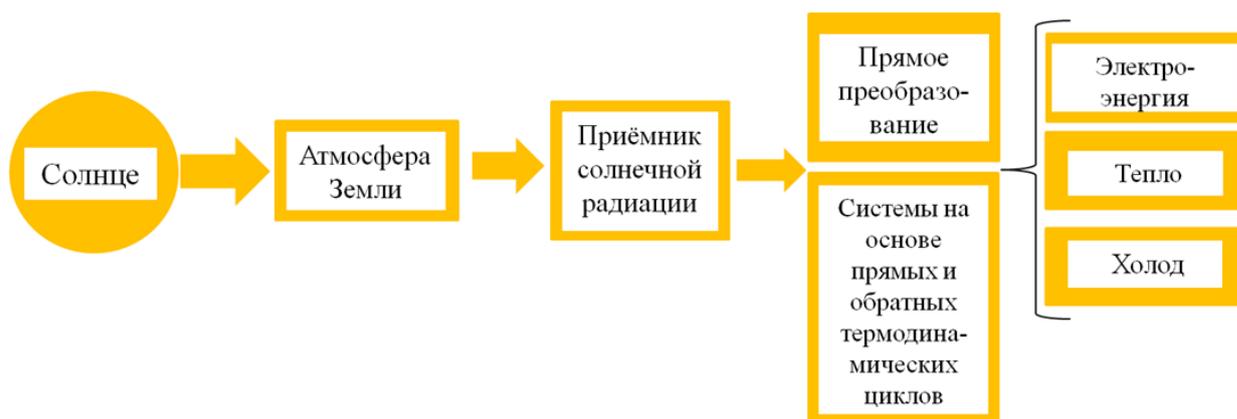


Рисунок 1.2 – Общая схема преобразования потока солнечной радиации

Тепловые потребители – самые крупные потребители энергии. На отопление приходится около 52% всего объема потребляемой энергии. Из них более половины использовалось в промышленности и около 46% – в строительном секторе. В то время как 72% тепла вырабатывалось за счет прямого сжигания ископаемого топлива, только 7% приходилось на современные возобновляемые источники энергии, такие как солнечная тепловая энергия, биотопливо или геотермальная энергия.[16].

Темпы роста солнечной энергетики в мире уже несколько лет подряд составляют 30% и более, что превышает темпы роста традиционной угольной и газовой энергетики. В 2022 году доля энергии Солнца в выработке мировой электроэнергии составляла около 2,6%. По установленным мощностям солнечных фотоэлектрических электростанций в 2022 году лидируют Китай, Япония, США и Германия [17-21].

Мощность потока солнечного излучения на входе в атмосферу Земли составляет около $1,36 \text{ кВт/м}^2$ [22]. В России уровень инсоляции варьируется от $810 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ в отдаленных северных районах до $1400 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ в южных районах, в отдельных регионах Сибири и Дальнего Востока.

С 2015 года солнечная энергетика стала крупнейшим сектором мировой электроэнергетики по объемам ежегодно привлекаемых инвестиций и вводимых мощностей. Самой мощной в мире является солнечная электростанция «Уарзат» в Марокко электрической пиковой мощностью 580 МВт, в которой объединены передовые технологии непрерывного производства электроэнергии с использованием накопителей тепловой энергии солнечного излучения.

За год на территорию России поступает больше солнечной энергии больше, чем имеется в разведанных запасах топлива на ее территории. Солнечный спектр делится на три области: УФ излучение ($\lambda < 0,4 \text{ мкм}$) – 9% интенсивности; видимое излучение ($0,4 < \lambda < 0,7 \text{ мкм}$) – 45% интенсивности; ИК излучение ($\lambda > 0,7 \text{ мкм}$) – 46% интенсивности.

Атмосфера (озон, водяной пар и двуокись углерода) поглощает (абсорбирует) солнечное излучение определенных длин волн. Существенное ослабление (уменьшение) в большей части ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра является результатом поглощения и обуславливает процесс экологического влияния на климат Земли (Рисунок 1.3).

По состоянию на август 2022 года установленная мощность солнечных электростанций в России (включая СЭС Крымского полуострова) превысила 1,5 ГВт. Эти цифры показывают рост установленной мощности почти в 2,5 раза с 2017 года.

Солнечная энергетика на юге Сибири также обладает большим потенциалом практического использования по причине значительного количества часов солнечного сияния – в среднем 2050 часов, а также

особенностей рельефа, где большое количество территорий расположено на высоте 500 и более метров над уровнем моря [13].

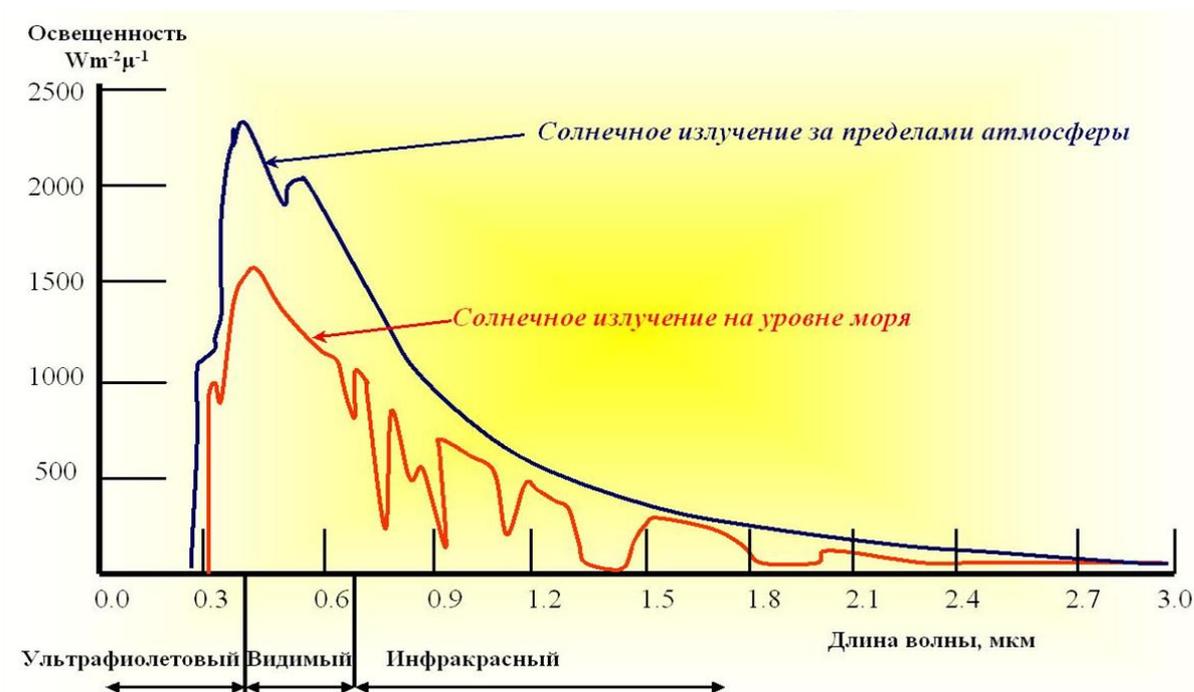


Рисунок 1.3 – Изменение волнового спектра солнечного излучения

Использование энергии Солнца для получения тепла, холода и электричества на юге Сибири может способствовать решению проблемы обеспечения энергетических потребностей населения, сельского хозяйства и малой промышленности в удаленных районах.

Таким образом, преобразование солнечной энергии в конечные полезные продукты: электрическую энергию, теплоты для теплоснабжения, а также холода для систем кондиционирования и хранения продуктов с максимальным использованием всего спектра солнечного излучения позволит решить важную задачу энергоснабжения на обширной территории юга Сибири и снизит общий уровень загрязнения окружающей среды.

1.2 Общая характеристика гелиотехнологий монопроизводства электроэнергии, теплоты и холода

1.2.1 Современные технологии фотовольтаики для прямого преобразования потока солнечной радиации в электроэнергию

Для получение электрической энергии на основе потоков солнечной радиации на практике используются два основных способа. Первый основан на прямом преобразовании энергии волнового спектра излучения в направленный поток электронов постоянного тока. На этом принципе основана работа фотоэлектрических электростанций. Во втором выработка электроэнергии осуществляется с использованием термодинамических циклов, для реализации которых предварительно используются процессы преобразования потоков солнечной энергии в тепловую. На этом принципе основана выработка электроэнергии на солнечных тепловых электростанциях.

К устройствам безциклового получения энергии относятся фотоэлектрические панели. Фотоэлектрические панели содержат множество фотоэлектрических ячеек, обычно изготовленных из кремния. Когда солнечные лучи падают на эти ячейки, фотоны солнечного света выбивают электроны из атомов кремния, создавая тем самым электрический ток. Постоянный ток затем собирается и преобразуется в переменный с помощью инверторов. КПД современных промышленно производимых солнечных батарей составляет 9-24% [23]. На рисунке 1.4 представлена схема типового солнечного фотоэлемента.

Фотоэлементы и модули подразделяются на монокристаллические, поликристаллические, аморфные (гибкие, пленочные).

Современные КПД современных промышленно производимых солнечных панелей составляет 9-24% [24]. На рисунке 1.5 в исторической ретроспективе представлены значения эффективности фотоэлементов и

модулей, достигнутые в лабораторных условиях с 2006 года по настоящее время.

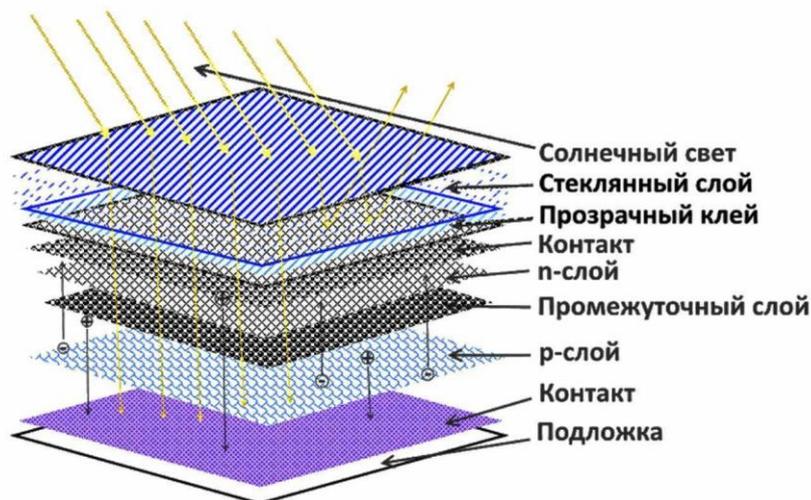


Рисунок 1.4 – Принцип работы солнечного фотоэлемента

Значительный прогресс в области фотовольтаики в последние годы связан с разработкой перовскитных солнечных элементов.

Перовскитные солнечные элементы состоят из соединения карбоната кальция и оксида титана. Их преимуществом является дешевизна и гибкость. За развитие технологий промышленного производства электроэнергии на основе перовскитных элементов с КПД более 20% ученому из Австралии Мартину Грину в 2018 году была присуждена престижная международная премия «Глобальная Энергия».

В Национальном исследовательском технологическом университете (НИТУ) МИСИС создали промышленные прототипы перовскитных солнечных элементов с высоким содержанием брома, которые способны генерировать электроэнергию с высоким КПД в условиях низкой освещенности [25]. Их важным преимуществом стала высокая интенсивность поглощения светового потока широкого волнового спектра, благодаря чему перовскитные фотоэлементы могут вырабатывать электроэнергию не только

от солнечного света, но и от искусственных источников – светодиодных и флуоресцентных ламп. КПД перовскитных элементов может меняться в зависимости от цветовой температуры света.

Это обеспечило высокий КПД выработки электроэнергии: 36,1% в сравнении с 20-25% для кремниевых пластин при «теплом» искусственном освещении, температура которого составляет 1700 К. Этот температурный показатель более чем вдвое ниже температуры освещения от люминесцентной лампы холодного света, составляющей 4000 К.

Не смотря на очевидные успехи современной фотовольтаики, необходимо отметить, что их общим принципиальным недостатком является снижение КПД выработки электроэнергии с ростом температуры.

Фотоэлектрические элементы обычно достигают электрической эффективности от 15% до 20%, в то время как наибольшая доля солнечного спектра (65-70%) преобразуется в тепло, повышая температуру фотоэлектрических модулей. Снижение КПД с ростом температуры t для промышленно выпускаемых фотоэлементов можно определить по экспериментально установленной зависимости [26]:

$$\eta(t) = 17 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (t - 25)). \quad (1.1)$$

Процесс охлаждения позволяет не только сохранить номинальные показатели их энергетической эффективности, но и в разы увеличить срок их службы. Решение этой задачи в настоящее время связано со значительными техническими трудностями. Для этого, например, используются такие экзотические системы, как плавучие солнечные электростанции [27], фотоэлектрические модули которых охлаждаются за счет более низких температур воды и конвективных воздушных потоков у поверхности воды.

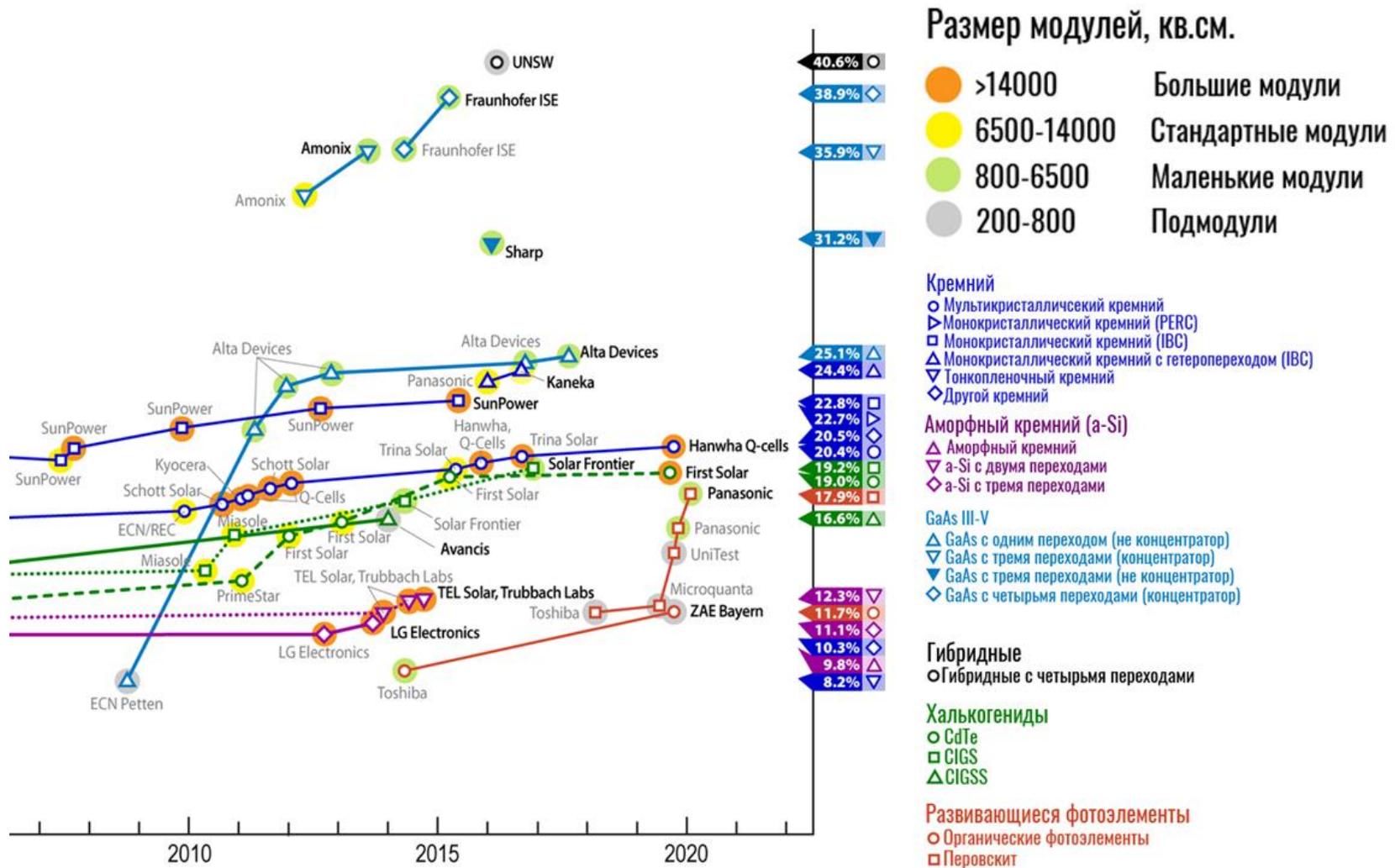


Рисунок 1.5 – Максимальная эффективность фотовольтаических модулей

Особенностью фотоэлектрических элементов является снижение эффективности при нагреве. Повышение температуры элемента на 1 К снижает его эффективность на 0,2 – 0,5% [28-36]. Следовательно, отвод тепла от фотоэлементов может снизить их температуру и, таким образом, повысить эффективность элементов. Увеличение срока службы фотоэлемента является еще одним преимуществом более низких рабочих температур.

Таким образом, одной из задач, решение которой позволит увеличить эффективность технологий прямого преобразования потока солнечного излучения в электроэнергию является охлаждение фотоэлектрических панелей.

1.2.2 Солнечные энергоустановки, использующие термодинамические циклы

К технологиям получения электроэнергии с использованием термодинамических теплосиловых циклов относятся энергоустановки, работающие на основе циклов Ренкина или Стирлинга с внешним подводом тепла. Для их реализации используют концентраторы солнечного излучения и различного типа солнечные тепловые коллекторы. В отличие от фотоэлектрических панелей здесь основным процессом является перевод энергии солнечного излучения сначала в тепловую энергию, а затем в процессе реализации термодинамических циклов в работу, обеспечивающую механическую энергию для вращения электрогенераторов.

Основными проблемами при практической реализации этих технологий являются следующие:

1. Концентрирование слабых по интенсивности потоков солнечной радиации для достижения высоких температур рабочего тела термодинамического цикла. В соответствии с известным циклом Карно его максимальная термодинамическая эффективность определяется как:

$$\eta_{\text{к}} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (1.2)$$

где T_1 и T_2 - соответственно температуры источников нагрева и охлаждения рабочего тела термодинамического цикла.

Особенностью термодинамических циклов для выработки электроэнергии является необходимость подвода и отвода из тепловой машины большого количества тепловой энергии. Только часть подведенной к рабочему телу тепловой энергии может быть преобразовано в механическую работу. Согласно (1.2) её максимальные значения не могут при $T_2 = 293 \text{ К}$ (20°C) превысить 62% при температуре $T_1 = 773 \text{ К}$ (500°C) и будут менее 25% при $T_1 \leq 373 \text{ К}$ (100°C).

Эффективность реальных энергоустановок будет иметь более низкие значения КПД. Использование следящих за Солнцем гелиоконцентраторов для получения водяного пара в солнечных электростанциях башенного типа с давлением в сотни атмосфер и температурой в сотни градусов Цельсия, которые являются типовыми для ТЭС на органических видах топлива, материально затратно и требует отчуждения больших территорий, что ограничивает область их использования пустынными регионами.

2. Использование для целей выработки электроэнергии органических циклов Ренкина для монопроизводства электроэнергии возможно только для узкого температурного диапазона повышения температур T_1 и снижения T_2 . Имеется ограниченный перечень рабочих тел, отвечающих одновременно экологическим требованиям озонобезопасности и влияния на потепление климата.

3. Суточная и сезонная неравномерность поступления солнечной энергии требует создания эффективных систем накопления тепловой энергии в ночной период.

4. Необходимость резервирования работы солнечных энергоустановок либо за счет совместной работы с ТЭС другого типа, в том числе на

ископаемых видах топлива, либо за счет совместной работы с имеющейся централизованной региональной энергосистемой.

1.2.3 Основные технологии и оборудование для трансформации потока солнечной радиации в тепловую энергию

Технологии, обеспечивающие преобразование потока солнечной энергии в теплоту получили самое широкое распространение благодаря простоте реализации и высокой востребованности для производства электроэнергии и холода.

Для горячего водоснабжения и отопления помещений обычно применяются солнечные коллекторы [37]. Солнечный коллектор — устройство для сбора тепловой энергии Солнца (гелиоустановка), переносимой видимым светом и ближним инфракрасным излучением.

В отличие от солнечных фотоэлектрических батарей солнечные тепловые коллекторы производят нагрев материала-теплоносителя. Солнечные коллекторы преобразуют прямые и рассеянные солнечные лучи в тепло. Инфракрасное излучение, которое проходит сквозь облака, также поглощается и преобразуется в тепло.

Плоский коллектор, представленный на рисунке 1.6, состоит из элемента, поглощающего солнечное излучение (абсорбер), прозрачного покрытия и теплоизолирующего слоя. При отсутствии забора тепла плоские коллекторы способны нагреть воду до 190-210 °С [38].

Чем больше падающей энергии передаётся теплоносителю, протекающему в коллекторе, тем выше его эффективность. Повысить её можно, применяя специальные оптические покрытия, не излучающие тепло с поверхности коллектора в инфракрасном спектре.

Солнечная тепловая труба имеет устройство, схожее с бытовыми термосами. Только внешняя часть трубы прозрачна, а на внутренней трубке нанесено высокоселективное покрытие, улавливающее солнечную энергию.

Пространство между внешней стеклянной и внутренней трубками вакуумируется. Именно вакуумная прослойка даёт возможность сохранить около 95% улавливаемой тепловой энергии (Рисунок 1.7).

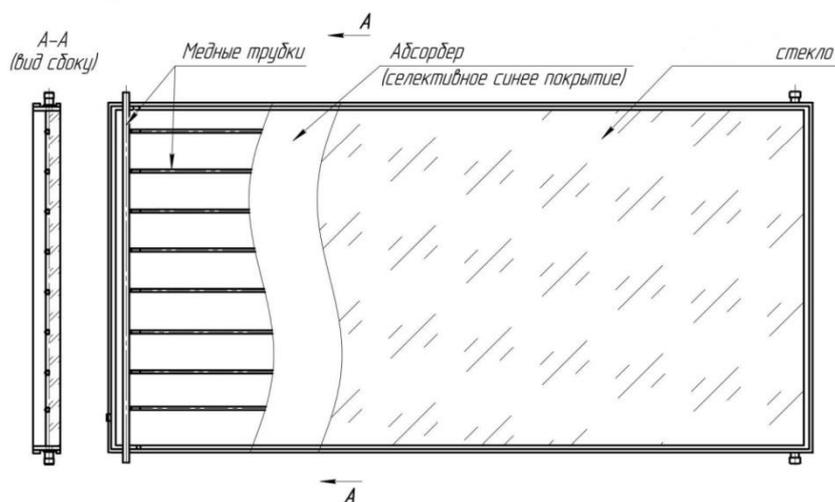


Рисунок 1.6 – Плоский солнечный коллектор

Солнечная тепловая труба имеет устройство, схожее с бытовыми термосами. Только внешняя часть трубы прозрачна, а на внутренней трубке нанесено высокоселективное покрытие, улавливающее солнечную энергию. Пространство между внешней стеклянной и внутренней трубками вакуумируется. Именно вакуумная прослойка даёт возможность сохранить около 95% улавливаемой тепловой энергии (Рисунок 1.7).

В вакуумных солнечных коллекторах нашли применение тепловые трубки, выполняющие роль проводника тепла (Рисунок 1.8). При облучении установки солнечным светом жидкость, находящаяся в нижней части трубки, нагреваясь, превращается в пар. Пары поднимаются в верхнюю часть трубки (конденсатор), где, конденсируясь, передают тепло коллектору. Использование данной схемы позволяет достичь большего КПД (по сравнению с плоскими коллекторами) при работе в условиях низких температур и слабой освещенности.

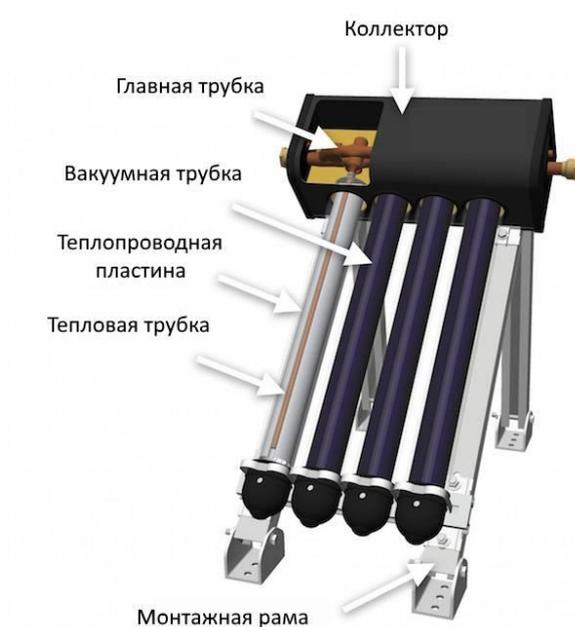


Рисунок 1.7 – Вакуумный солнечный коллектор с тепловыми трубками

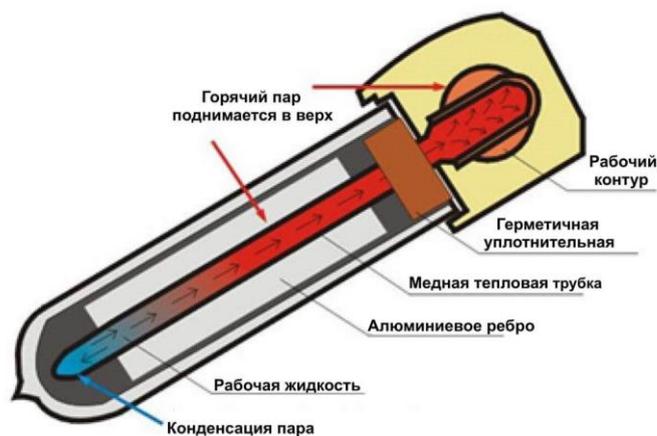


Рисунок 1.8 – Разрез тепловой трубки

В тёплый период (с марта – апреля по сентябрь) на юге Сибири средняя дневная сумма солнечного излучения составляет 4,0-5,0 кВт·ч/м², что позволяет нагревать для бытовых целей около 100 л воды с помощью солнечного коллектора площадью 2 м² с вероятностью до 80%, то есть практически ежедневно. По среднегодовому поступлению солнечной радиации лидерами являются Приморье и юг Сибири. За ними идут юг

европейской части (приблизительно до 50° с.ш.) и значительная часть Сибири [8].

Использование солнечных коллекторов в России составляет величину порядка 0,2 м²/1000 чел. В Германии эксплуатируется 140 м²/1000 чел., в Австрии 450 м²/1000 чел., на Кипре около 800 м²/1000 чел. [39-43].

Установка коллекторов в настоящее время осуществляется, в основном, в Крыму, Краснодарском крае, Приморском и Хабаровском краях и в регионах юга Сибири [22].

Пассивные (Рисунки 1.9, 1.10) системы перемещают воду или незамерзающий теплоноситель через конструктивные элементы за счёт разности плотностей нагретого и охлажденного теплоносителя. Пассивные системы с конвекцией дешевле, чем активные системы, но и менее эффективны из-за медленной циркуляции в системе. Системы с тепловыми трубами более дорогие, чем конвективные, но имеют меньшие эксплуатационные затраты.

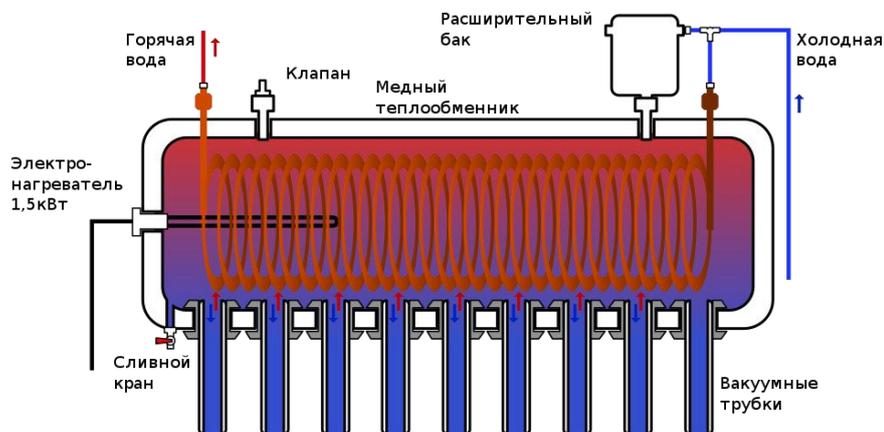


Рисунок 1.9 – Система с пассивной циркуляцией теплоносителя

В таблице 1.1 приведены КПД солнечных водонагревательных коллекторов.

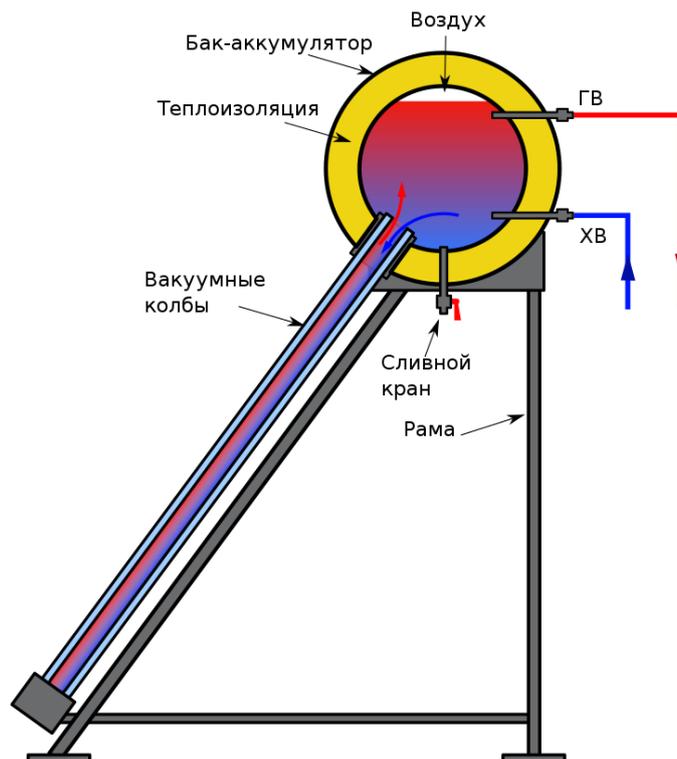


Рисунок 1.10 – Система с пассивной циркуляцией теплоносителя

Таблица 1.1 – Показатели эффективности солнечных водонагревательных коллекторов

Тип солнечного водонагревательного коллектора	КПД
Плоский солнечный коллектор	60-70
Вакуумный солнечный коллектор с тепловыми трубками	85-90

Активные системы (Рисунок 1.11) используют насосы для циркуляции воды через коллекторы. Активные системы с открытым контуром являются популярными в регионах с положительными температурами или при сезонном использовании. Могут эксплуатироваться при температурах воздуха до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ или даже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ [44-46].

Одним из экологически эффективных способов аккумулирования и преобразования солнечной энергии в тепло являются солнечные пруды [47-

49]. Аккумулированная в них тепловая энергия может использоваться на нужды отопления, горячего водоснабжения, опреснения морской воды, получения электроэнергии и другие цели.

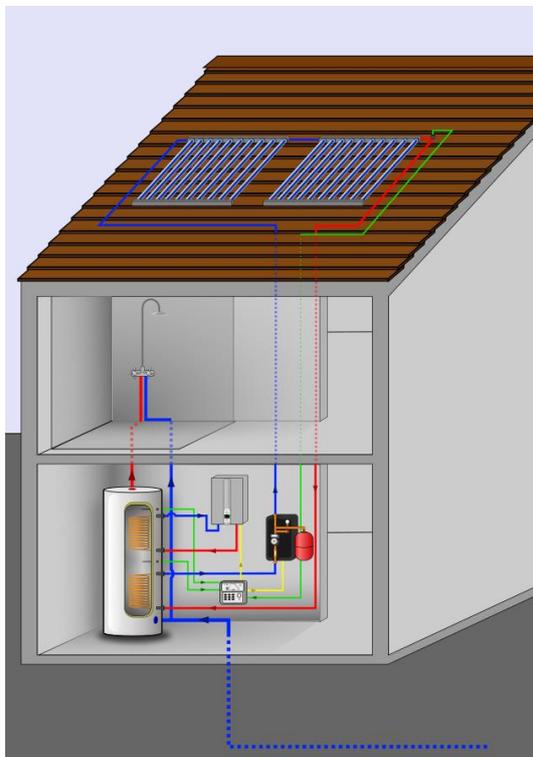


Рисунок 1.11 – Пример системы с активной циркуляцией теплоносителя (с системой догрева от котла на традиционном топливе)

В солнечном пруду (Рисунок 1.12) происходит одновременно улавливание и накапливание солнечной энергии в большом объеме жидкости. В пресном водоеме поглощаемая солнечная энергия нагревает в основном поверхностный слой, и эта теплота довольно быстро теряется, особенно в ночные часы и при холодной ненастной погоде из-за испарения воды и теплообмена с окружающим воздухом.

Солнечная энергия, проникая через всю массу жидкости в солнечном пруду, поглощается окрашенным в темный цвет дном и нагревает прилегающие слои жидкости, в результате чего температура ее может достигать 90-100 °С, в то время, как температура поверхностного слоя остается на уровне 20 °С. Благодаря высокой теплоемкости воды в

солнечном пруду за летний сезон накапливается большое количество теплоты, и вследствие низких тепловых потерь падение температуры в нижнем слое в холодный период года происходит медленно, так что солнечный пруд служит сезонным аккумулятором энергии. Теплота к потребителю отводится из нижней зоны пруда.

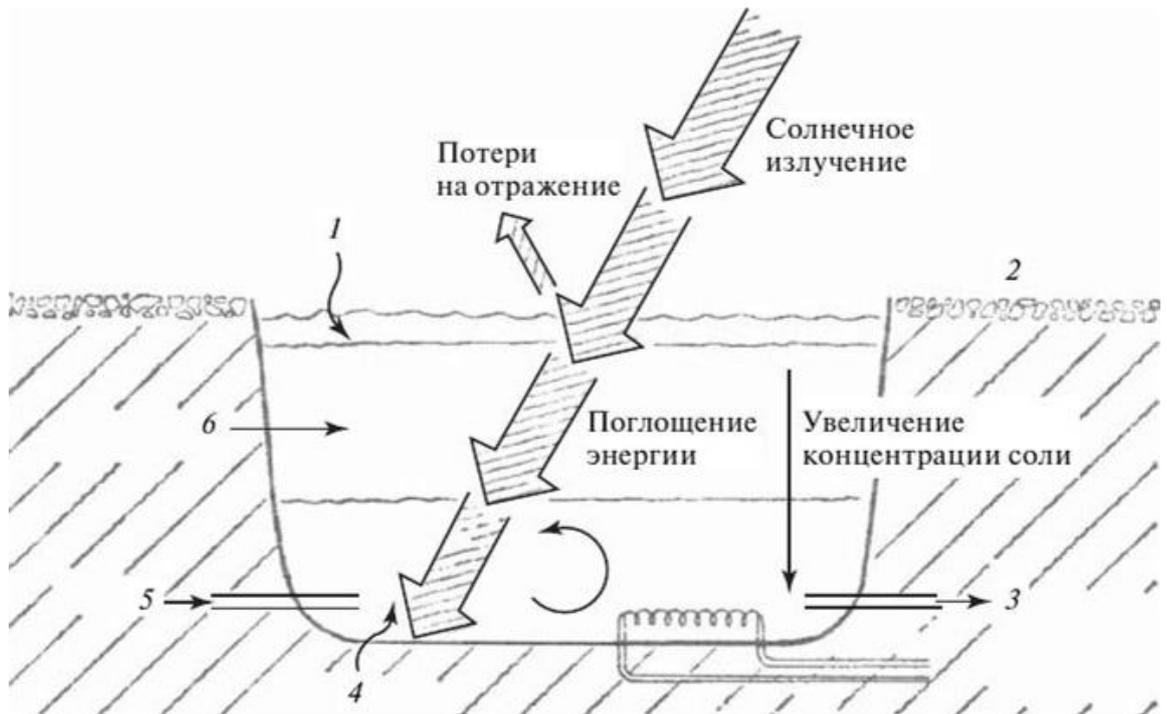


Рисунок 1.12 – Схема работы солнечного пруда:

1 – поверхностный слой пресной воды; 2 – верхний теплоизолирующий слой грунта; 4 – придонный слой с высокой температурой; 3-4-5 – организация потока нагретого теплоносителя для технологического использования; 6 – слой с градиентом концентрации соли

Солнечные пруды могут быть использованы в гелиосистемах отопления и горячего водоснабжения жилых и общественных зданий, для получения теплоты для технологических процессов, в системах кондиционирования воздуха абсорбционного типа, для производства электроэнергии.

1.2.4 Получение холода положительных и отрицательных температур на основе солнечной энергии

Абсорбционные холодильные машины широко применяются для получения холода в системах кондиционирования [48]. В отличие от холодильных машин парокомпрессионного типа, использующих для получения холода электроэнергию, в абсорбционных машинах используется теплота относительно низкого температурного потенциала. Это делает целесообразным их использование для выработки холода на основе солнечной энергии, предварительно трансформированной в тепловую энергию.

Схема холодильной установки показана на рисунке 1.13 [50-61]. Принцип работы абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машин (АБХМ) основан на способности концентрированного раствора бромида лития (LiBr) абсорбировать (поглощать) пары воды при относительно высоких температурах. В АБХМ вода кипит (испаряется) в испарителе в условиях вакуума при температуре около 3 °С. Тепло для этого процесса поступает от внешнего теплоносителя (охлаждаемой воды) температура которой снижается с 12 °С до 5 °С. В результате кипения образуются пары воды, которые поглощаются концентрированным раствором бромистого лития в абсорбере. Поглощение происходит с выделением тепла, поэтому раствор необходимо охлаждать обратной водой от градирни.

Чем ниже температура раствора и больше его концентрация, тем более высокой становится его поглощающая способность. Абсорбируя воду, раствор снижает относительную концентрацию соли. Затем раствор низкой концентрации перекачивается насосом через теплообменник в генератор, где при нагреве из него удаляется в процессе кипения водяной пар. В качестве источников нагрева могут выступать горячая вода, водяной пар низких параметров, дымовые газы и другие теплоисточники высокой температуры. Пар поступает в конденсатор, где

охлаждается и конденсируется. Конденсат подается самотеком в испаритель, а крепкий раствор из генератора подается в абсорбер. Рабочий цикл при этом замыкается.

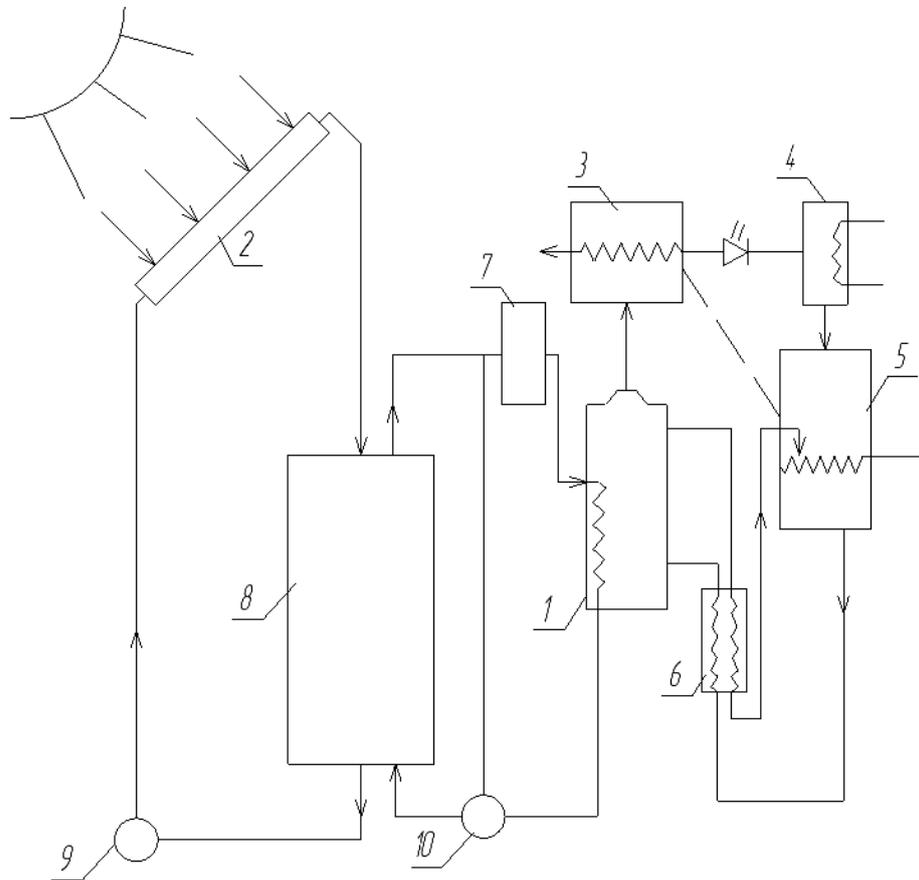


Рисунок 1.13 – Схема абсорбционной системы солнечного охлаждения с дополнительным источником тепла:

- 1 – парогенератор; 2 – плоский солнечный коллектор; 3 – конденсатор;
 4 – испаритель; 5 – абсорбер; 6 – регенеративный теплообменник;
 7 – дополнительный нагреватель; 8 – бак-аккумулятор; 9 – насос;
 10 – трехходовой вентиль

Экспериментально [55] проверена работа модифицированного серийного кондиционера воздуха на бромиде лития, в генератор которого вместо пара подавалась горячая вода от плоского солнечного коллектора. Характеристики этой установки изучены как при кратковременной работе, так и при непрерывном действии в течение ряда «полных» суток. В работе

[57] аналитически исследована система солнечного охлаждения на водном растворе бромида лития в комбинации с плоским коллектором и показано, что важное значение в системе имеют эффективность работы теплообменника, расположенного между генератором и абсорбером, температура охлаждающей воды и конструкция генератора. Требования к парогенератору в такой системе более высокие, чем в холодильных системах на обычном топливе, поскольку ее эффективность определяется как работой коллектора, так и работой холодильной части системы. В работе [59] показано, что в некоторых местах (например, на Цейлоне) КПД абсорбционной системы солнечного охлаждения непрерывного действия на водном растворе бромида лития может быть выше, чем КПД электрических компрессионных холодильных систем.

1.3 Фотоэлектрические тепловые коллекторы

Фотоэлектрические тепловые коллекторы способны преобразовывать в рамках комбинированной системы энергию солнечного излучения в тепловую и электрическую энергию. На рисунке 1.14 представлена схема распределения потоков солнечной радиации, падающей на фотоэлектрическую панель.

Фотоэлектрические тепловые панели объединяют в себе фотоэлектрические солнечные элементы, преобразующие энергию солнечного света в электричество, и солнечные тепловые коллекторы, передающие теплоту нагрева фотоэлектрического модуля внешним потребителям. Соединение выработки электроэнергии и тепла в одной системе позволяет повысить КПД использования потока солнечной энергии по сравнению с отдельно взятыми солнечными фотоэлектрическими или тепловыми солнечными батареями.

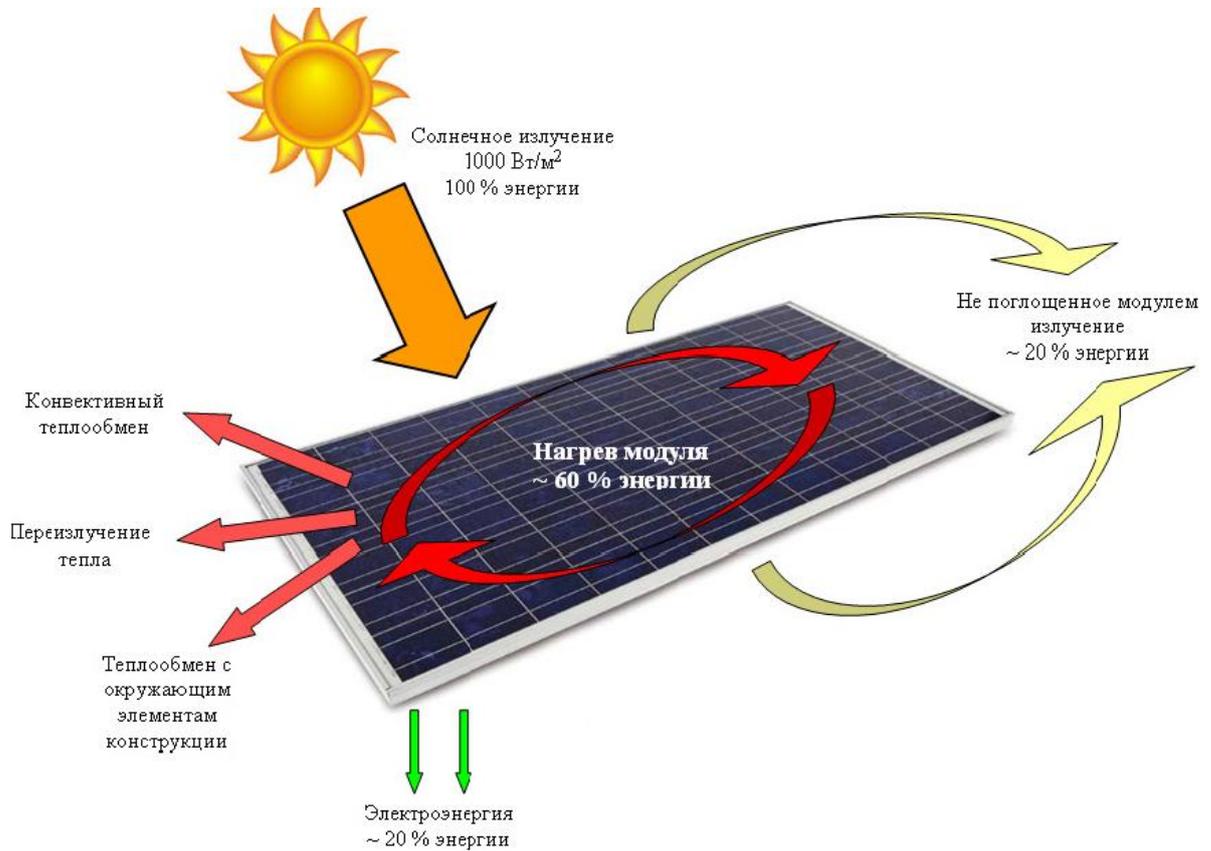


Рисунок 1.14 – Схема типowego распределения потоков солнечной радиации на фотоэлектрической панели

Когенерационные солнечные коллекторы генерируют тепловую и электрическую энергию практически без прямых выбросов CO₂ и поэтому рассматриваются в качестве многообещающей экологически чистой технологии для обеспечения зданий и промышленных процессов электроэнергией и теплом. Солнечные коллекторы объединяют выработку солнечной электроэнергии и тепла в одной системе и, таким образом, достигают более высокой общей эффективности и лучшего использования солнечного спектра, чем обычные фотоэлектрические модули [62-73].

Существует множество технических возможностей комбинировать фотоэлементы и солнечные тепловые коллекторы. В таблице 1.2 приведены сравнительные характеристики современных отечественных (ООО «СОЛЭКС-Р», г. Рязань) и зарубежных солнечных гибридных установок.

Таблица 1.2 – Сравнительная эффективность использования солнечных элементов

Тип установки	СЭУ2/5ТДК	СЭУ компании SunPower	СЭУ компаний AirLight Energy
Тип солнечного фотоэлектрического элемента (СФЭ)	Двухсторонние на кристаллическом кремнии	Односторонние на кристаллическом кремнии	Элементы группы A_3B_5
Размер СФЭ, мм	52x156	52x156	10x10
КПД СФЭ, %	70	57	80
Система слежения за положением солнца	В полярных координатах	По одной оси	По двум осям
Увеличение мощности, %	28	20	32

Температура охлаждающей жидкости на выходе из теплообменника СЭУ2/5ТДК выбирается потребителем в диапазоне 35...70°C, а к потребителю тепла поступает горячая вода с температурой не более 55°C.

Ряд фотоэлектрических коллекторов доступен в качестве коммерческой продукции, которую можно разделить на следующие категории в соответствии с их базовой конструкцией и жидкостью-теплоносителем:

- жидкостные гибридные солнечные коллекторы;
- воздушные гибридные солнечные коллекторы

Гибридные солнечные коллекторы могут быть классифицированы в соответствии с их конструкцией, такой как технология ячейки, материал и геометрия теплообменника, тип контакта между жидкостью и фотоэлектрическим модулем, крепление теплообменника или уровень интеграции в здания [74, 75].

Максимальные рабочие температуры для большинства фотоэлектрических модулей ограничены значениями ниже максимальных сертифицированных рабочих температур (обычно 85 °C) [76]. Тем не менее, на каждую единицу электрической энергии вырабатывается две или более

единиц тепловой энергии, в зависимости от эффективности элемента и конструкции системы.

Базовая конструкция с водяным охлаждением использует каналы для направления потока жидкости с помощью трубопроводов, прикрепленных прямо или косвенно к задней панели фотоэлектрического модуля. В стандартной жидкостной системе рабочая жидкость, обычно вода, гликоль или минеральное масло, циркулирует в теплообменнике за фотоэлементами. Тепло от фотоэлементов проходит через металл и поглощается рабочей жидкостью при условии, что рабочая жидкость холоднее, чем рабочая температура фотоэлементов.

Базовая конструкция с воздушным охлаждением использует либо полый корпус для установки фотоэлектрических панелей, либо управляемый поток воздуха к задней поверхности фотоэлектрической панели. Воздушные коллекторы либо забирают холодный наружный воздух, либо используют воздух в качестве циркулирующего теплоносителя в замкнутом контуре. Тепло излучается от панелей в замкнутое пространство, где воздух либо поступает в систему кондиционирования здания для повторного использования тепловой энергии, либо поднимается и отводится сверху конструкции. Способность воздуха к теплопередаче ниже, чем у обычно используемых жидкостей, и поэтому требуется пропорционально более высокий массовый расход, чем у эквивалентного жидкостного коллектора. Преимущество заключается в том, что необходимая инфраструктура имеет меньшую стоимость и сложность.

Нагретый воздух подается в систему вентиляции и кондиционирования здания для получения тепловой энергии. Вырабатываемое избыточное тепло можно просто отводить в атмосферу. Некоторые версии воздушного коллектора PVT могут работать таким образом, чтобы охлаждать фотоэлектрические панели для выработки большего количества электроэнергии и способствовать снижению теплового воздействия на срок их службы.

Диапазон практического применения гибридных солнечных коллекторов [77-79] можно разделить в соответствии с их уровнями температуры:

- низкие температуры - до 50 °С;
- средние температуры - до 80 °С;
- высокие температуры - более 80 °С.

Соответственно, технологии гибридных солнечных коллекторов могут быть сгруппированы в зависимости от их температурных уровней: пригодность для каждого температурного диапазона зависит от конструкции и технологии гибридного солнечного коллектора. Таким образом, каждая технология имеет разные оптимальные температурные диапазоны. Рабочая температура в конечном счете определяет, какой тип гибридного солнечного коллектора подходит для того или иного применения.

Низкотемпературные области применения включают системы с тепловыми насосами и нагрев плавательных бассейнов или воды спа-салонов до 50°С. Гибридные солнечные коллекторы в системах с тепловыми насосами выполняют роль низкотемпературного источника тепла для испарителей высокотемпературных тепловых насосов, либо на стороне нагрузки – для подачи тепла средней температуры в накопительный бак. Кроме того, возможна регенерация теплоты в подземные горизонты с помощью закачных скважин и в наземные теплообменники и баки накопители. Открытые фотоэлектрические коллекторы с улучшенным теплообменом воздух-вода могут быть единственным источником низкопотенциальной теплоты для теплонасосных систем.

Низкотемпературные и среднетемпературные системы для обогрева помещений и нагрева воды применяются в зданиях с температурой от 20 °С до 80 °С. Температуры конкретной системы зависят от требований системы теплоснабжения к горячей воде для бытовых нужд и для отопления помещений (например, полы с подогревом, радиаторы).

Таким образом, объединения монотехнологий выработки электроэнергии с помощью фотоэлементов, тепловых солнечных коллекторов и тепловых насосов в гибридных системах позволяет осуществить энергетически более эффективный процесс когенерации.

1.4 Системы тригенерации на основе солнечной энергии

С учетом всё возрастающей роли возобновляемой энергии Солнца для развития цивилизации, интерес представляет технологии, обеспечивающие максимально эффективное использование всего волнового спектра солнечного излучения, достигающего поверхности Земли с конечной целью получения электроэнергии, теплоты и холода различного температурного уровня, а также других полезных продуктов.

Выше было показано, что комбинирование отдельных монотехнологий в когенерационные системы позволяет получить синергетический эффект. По этой причине процессы полигенерации на основе солнечной энергии, базовой основой которых являются процессы когенерации и тригенерации, рассматриваются в качестве наиболее перспективного прикладного направления развития солнечной энергетики.

Однако в литературе имеется ограниченное количество работ, посвященных этой тематике и особенно оценкам эффективности тригенерационных и полигенерационных систем, что обусловлено большими сложностями построения схемных решений таких сложных систем и оптимизации режимов их работы. Так, например, авторы исследования [80] анализировали в рамках тригенерации получение кроме электроэнергии и тепловой энергии также пресной воды в качестве полезного продукта. Разработанные ими схемы содержат большое количество взаимозависимых элементов и по признанию самих авторов могут быть оптимизированы только на основе эксергетического метода. Выполнена поэлементная оценка стоимости эксергии солнечной тригенерационной установки, основанной на

использовании концентрированной солнечной энергии в качестве основного энергоресурса.

Автономная система солнечной тригенерации состоит из солнечной батареи, накопителя тепловой энергии, резервной системы на основе органического топлива. Расчетный коэффициент прямого нормального излучения был принят в размере 1010 Вт/м^2 , а оптическая эффективность коллектора – 72%. Накопитель тепловой энергии представляет систему из двух резервуаров косвенного нагрева с использованием расплавленных солей. Её использование обеспечивало производительность когенерационной системы в течение 12 часов в режиме полной загрузки. Блок электрогенерации был реализован на основе регенеративного цикла Ренкина с промежуточным перегревом и шестью отборами водяного пара. Общая электрическая мощность тригенерационной системы составляла 55,0 МВт при давлении на входе в турбину 10,0 МПа и выходе $6 \cdot 10^{-3}$ МПа.

Выводы по главе 1

Описано развитие солнечной энергетики для получения тепла, горячей воды, холода и электроэнергии, а так же эксергетического анализа солнечных коллекторов. Обосновывается актуальность развития эксергетического анализа, как одного из способов совершенствования систем энергоснабжения на основе энергии солнца.

Показано, что КПД лабораторных установок превышает 40%, а КПД рыночных моделей находится в диапазоне 16-20%. Разница более чем в два раза между КПД лабораторных и коммерческих фотовольтаических панелей говорит о перспективности данной технологии получения электричества.

ГЛАВА 2 МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАРАМЕТРОВ ИНСОЛЯЦИИ

При оценке эффективности работы технических систем (Рисунок 1.2), использующих солнечное излучение, принципиально важной является оценка количества и качества солнечной энергии на входе в систему. Необходимо количественно определить пространственно-временные параметры потока солнечной инсоляции на границе взаимодействия с технической системой, которые оказывают определяющее влияние на последующие процессы преобразования разнородных по качеству потоков энергии в полезные результирующие продукты: электроэнергию, теплоту и холод различного термического потенциала. Здесь важное значение имеет оценка прихода энергии Солнца на приемник солнечного излучения, под которым в рамках настоящего исследования понимается определенным образом ориентированная в пространстве поверхность. Возможности использования солнечной инсоляции за пределами и в пределах земной атмосферы для выработки электроэнергии, теплоты и холода сильно различаются. С учетом географического расположения технических систем в условиях высоких широт необходимо учесть в расчетах фактор увеличения пути движения солнечных лучей в земной атмосфере переменной плотности по сравнению с существующими расчетными моделями солнечной инсоляции.

2.1 Оценка возможностей использования солнечной инсоляции для создания систем тригенерации

2.1.1 Использование энергии Солнца вне атмосферы Земли

До границы атмосферы от Солнца доходит только незначительная часть потока солнечной радиации, порядка $1/2000000000$ доли, для

определения количества которой используется понятие «солнечная постоянная».

Солнечная постоянная – суммарная мощность солнечного излучения, проходящего через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку солнечной радиации, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне земной атмосферы. Измеренная со спутника на околоземной орбите солнечная постоянная при максимуме солнечной активности составляет 1362 Вт/м² [81]. Это максимально доступное количество энергии солнца, которое можно преобразовать в полезные продукты: электроэнергию, теплоту и холод различных температурных уровней.

Солнечное излучение вне земной атмосферы – это суммарный поток энергии, распределенной по длинам волн (Рисунок 1.3, Таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Распределение энергии в спектре солнечного излучения

Диапазон волнового излучения Солнца	Ультрафиолетовое излучение	Видимый свет	Инфракрасное излучение
Относительная доля	9,97%	42,86%	47,17%

Большая часть энергии сконцентрирована в видимой и ближней инфракрасной зонах излучения (Рисунок 1.3). Коротковолновое излучение, несмотря на относительно малую долю в общем энергетическом балансе, в космосе имеет важное значение для безопасной работы оборудования и нахождения человека в открытом космическом пространстве.

Показатели энергетического и эксергетического потенциалов солнечной радиации в космосе очень близки. Эксергетический потенциал солнечного излучения можно определить на основе выражений:

$$\delta e_{\varepsilon} = d \cdot q_{\text{изл}} - T_0 \cdot dS, \quad (2.1)$$

$$e_{\varepsilon} = \varepsilon \cdot \sigma \frac{3 \cdot T^4 + T_0^4 - 4 \cdot T_0 \cdot T^3}{3}, \quad (2.2)$$

где $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/К⁴ – постоянная Стефана-Больцмана, $\varepsilon \leq 1$ – степень черноты, T_0 – температура окружающей среды, $q_{\text{изл}}$ – тепловая энергия солнечного излучения.

Можно видеть, что в случае $T_0 \rightarrow 0$ и $\varepsilon \rightarrow 1$ энергия солнечного излучения и его эксергия, т. е. способность совершать работу, становятся равнозначными качественно и количественно. Теоретически в космосе можно весь поток солнечной радиации преобразовать в работу. Даже, приняв во внимание, что температура в космосе, который рассматривается в качестве окружающей среды, составляет $T_0 = 3$ К, разница между энергией солнечного излучения и его эксергией будет незначительной.

Однако вне пределов земной атмосферы необходимо принимать во внимание следующие важные обстоятельства.

При взаимодействии с техническими системами в космосе переход энергии солнечного излучения в тепловую энергию без отвода теплоты вследствие отсутствия эффективных механизмов теплообмена с окружающей средой (теплопроводность, конвекция) при ограниченных возможностях радиационного теплообмена является принципиальным ограничивающим фактором для технологий выработки электрической энергии с использованием термодинамических циклов. Последние достижения в области создания российской космической ядерной энергоустановки мегаваттного класса на смесевом гелий-ксеноновом рабочем теле с КПД 25% обусловлены именно самой возможностью создания специальных механизмов отвода теплоты в космосе за счет капельных холодильников-излучателей, в которых теплоноситель в виде капелек пролетает через открытый космос и отдает ему тепло излучением.

У космической фотовольтаики, где автоматически обеспечивается оптимальная ориентации солнечных панелей к потоку солнечного излучения

КПД достигает 40-45%. Однако из-за огромных температурных перепадов и жесткого космического излучения панели быстрее деградируют. Тем не менее, достойной альтернативы гелиопанелям за пределами планеты для выполнения практических задач по выработке электроэнергии пока не существует.

На основании вышеизложенного можно сделать заключение о том, что в настоящее время, создание систем тригенерации за пределами земной атмосферы имеет принципиальные технические ограничения.

2.1.2 Инсоляция в пределах земной атмосферы

В условиях земной атмосферы, где значения эксергии потока солнечной радиации напрямую зависят от выбора температуры окружающей среды, необходимо также принять во внимание следующие факторы:

- взаимное преобразование разнородных по физической природе потоков энергии;
- обоснование выбора параметров окружающей среды;
- температурный уровень компонентов системы.

В таблице 2.2 показаны возможности взаимного преобразования перечисленных видов энергии. Знак «+» обозначает возможность полного преобразования, знак «-» – неполного.

Таблица 2.2 – Возможности преобразования одних видов энергии в другие

Энергия	№ п/п	I	II	III	IV	VI	VII
Механическая	I	+	+	+	+	+	+
Электрическая	II	+	+	+	+	+	+
Молекулярная	III	-	-	+	-	+	-
Химическая	IV	-	-	+	-	+	-
Ядерная	V	+	+	+	+	+	+
Теплота	VI	-	-	+	-	-	-
Работа	VII	+	+	+	+	+	+

Механическая и электрическая энергии (Таблица 2), так же как и работа могут быть полностью преобразованы в любой вид энергии. В принципе энергия ядерных реакций в недрах Солнца, благодаря которым возникает энергии солнечного излучения, достигающего атмосферы Земли, также может быть преобразована в работу.

С учетом проблем, связанных с определением температуры окружающей среды в пределах земной атмосферы и отсутствия потребителей технологий тригенерации выше земной поверхности в настоящей работе внимание уделено расчету инсоляции непосредственно у земной поверхности.

В земных условиях количественные значения солнечной инсоляции, приходящей на приемник солнечного излучения (солнечный коллектор) в качестве энергии для реализации процессов совместного производства электричества, теплоты и холода, зависят от многих факторов – высоты Солнца над горизонтом, географической широты, высоты установки коллектора над уровнем моря, облачности, состояния атмосферы и т.д. и определяется различными методами.

В процессе настоящего исследования проанализированы различные способы расчета приходящей на солнечный коллектор мощности солнечного излучения. В данном исследовании для сравнительного анализа использованы 5 способов расчета.

2.2 Общая характеристика традиционных моделей расчета солнечной инсоляции

Модель №1

Затухание солнечных лучей определяется составом атмосферы и длиной пути, который солнечные лучи прошли сквозь атмосферу [70].

$$I_T = I_D + I_d; \quad (2.3)$$

I_T – общая мощность солнечного излучения, пришедшего на Землю;

I_D – мощность не рассеянного солнечного света;

I_d – мощность рассеянного солнечного света.

$$I_D = I_{DN} \cdot \cos z ; \quad (2.4)$$

где I_{DN} – прямая мощность не рассеянного солнечного излучения, полученная в [75];

Согласно [75]:

$$I_{DN} = \frac{A}{e^{B/\sin a}} , \quad (2.5)$$

где A и B – функции, в которых приняты во внимание сезонные вариации расстояния от Земли до Солнца, пыль, озон и водяной пар, содержащийся в атмосфере, измерены для определенного местоположения;

a – высота Солнца над горизонтом в градусах.

Согласно [75], формулы (2.3–2.5) позволяют рассчитать мощность солнечного излучения, пришедшего на Землю, при угле подъема Солнца над горизонтом выше 15° , а функции A и B требуют измерения для каждой местности, в которой необходимо провести расчёт.

К тому же, функции A и B могут меняться с течением времени. То есть, способ расчёта не является универсальным.

На рисунке 2.1 приведена зависимость мощности солнечного излучения от угла подъёма Солнца над горизонтом, построенная по этой модели расчета.

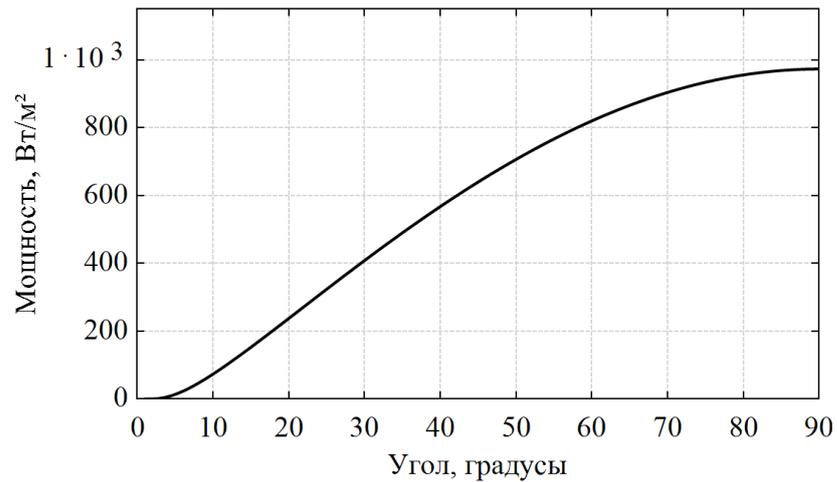


Рисунок 2.1 – Зависимость мощности солнечного излучения от угла подъёма Солнца над горизонтом

Модель № 2

Для длины пути L через атмосферу и солнечного излучения, падающего под углом z относительно нормали к поверхности Земли, коэффициент воздушной массы равен [82]:

$$AM = \frac{L}{L_0}, \quad (2.6)$$

где L_0 – длина пути в зените (то есть, перпендикулярно поверхности Земли) на уровне моря.

Таким образом, количество воздушных масс зависит от пути Солнца по небу и, следовательно, меняется в зависимости от времени суток, смены сезонов года и широты наблюдателя.

Приближение первого порядка для воздушной массы дается выражением:

$$AM \approx \frac{1}{\cos z}, \quad (2.7)$$

где z – зенитный угол в градусах.

Интенсивность солнечной энергии в коллекторе уменьшается с увеличением коэффициента воздушной массы и из-за сложных и переменных атмосферных факторов. Одна приближительная модель зависимости

интенсивности солнечного излучения от массы воздуха дается следующим образом [42]:

$$I = 1,1 \cdot I_0 \cdot 0,7^{(AM^{0,678})}, \quad (2.8)$$

где $I_0=1362 \text{ Вт/м}^2$ – солнечная постоянная [70], коэффициент 1,1 получен при условии, что рассеянная составляющая составляет 10% от прямой составляющей.

Данная методика расчета не является универсальной, так как итоговое значение мощности солнечного излучения не зависит от высоты установки солнечного коллектора над уровнем моря, а формула (2.7) не учитывает конечную высоту атмосферы и предполагает бесконечную воздушную массу на горизонте. Формула (2.7) является достаточно точной только для значений зенитных углов примерно до 75° .

На рисунке 2.2 приведена зависимость мощности солнечного излучения, приходящегося на поверхность Земли, от зенитного угла солнца, построенная согласно модели расчета № 2.

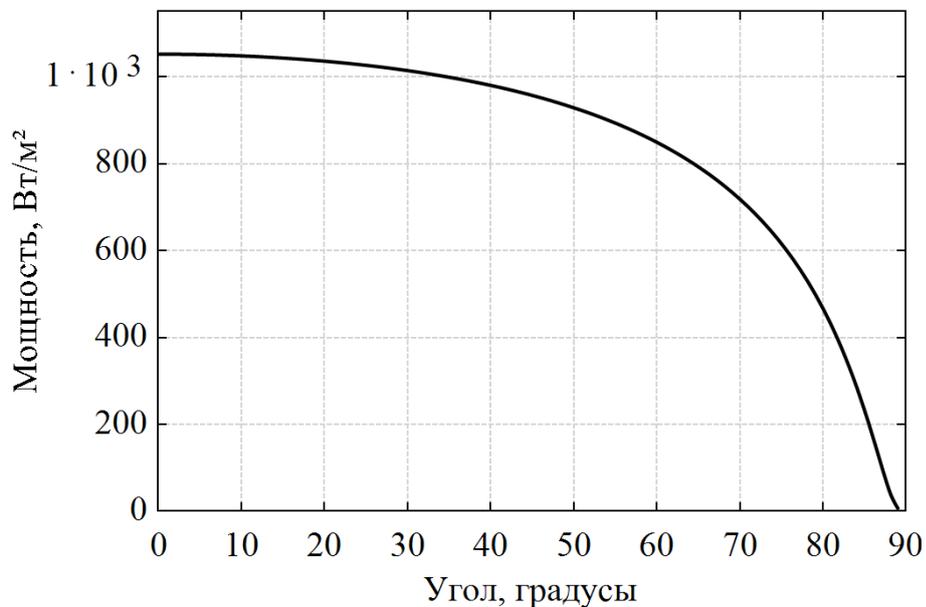


Рисунок 2.2 – Зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от зенитного угла солнца (расчетная модель № 2)

Модель № 3

В [39] предложена усовершенствованная формула для более точного расчета:

$$AM = \frac{1}{\cos z + 0,50572(96,079995 - z)^{-1,6364}}. \quad (2.9)$$

Примерная зависимость увеличения интенсивности с высотой и с точностью до нескольких километров над уровнем моря определяется следующим образом [83]:

$$I = 1,1 \cdot I_0 \cdot \left[\left(1 - \frac{h}{7,1}\right) \cdot 0,7^{(AM)^{0,678}} + \frac{h}{7,1} \right], \quad (2.10)$$

где h – высота солнечного коллектора над уровнем моря, км;

AM – воздушная масса по формуле (2.9), как если бы коллектор был установлен на уровне моря.

На рисунке 2.3 приведена зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от зенитного угла солнца при установке солнечного коллектора на уровне моря, построенная согласно модели расчета № 3. На рисунке 2.4 приведена зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от высоты установки коллектора над уровнем моря в километрах при зенитном угле Солнца $z=70^\circ$, построенная способом 3.

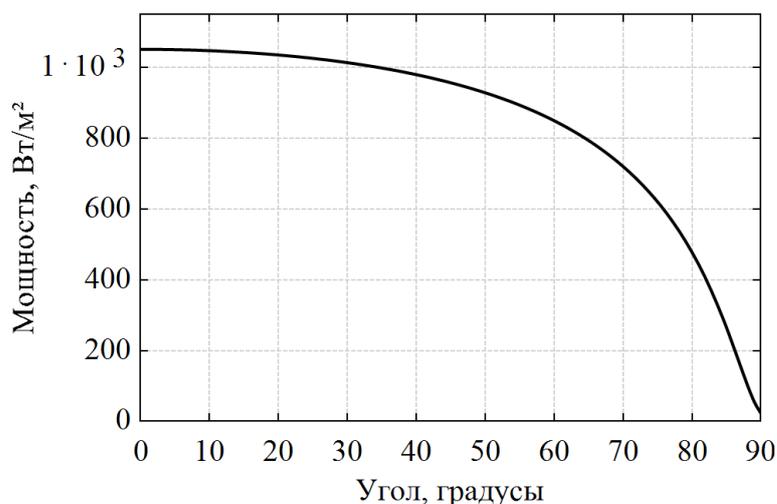


Рисунок 2.3 – Зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли по расчетной модели № 3

Из рисунка 2.4 видно, что при расчете способом 3 при зенитном угле Солнца $z=70^\circ$ на высоте около 5,5 км и выше значение мощности I становится больше значения мощности солнечного излучения в e $I_0=1362 \text{ Вт/м}^2$.

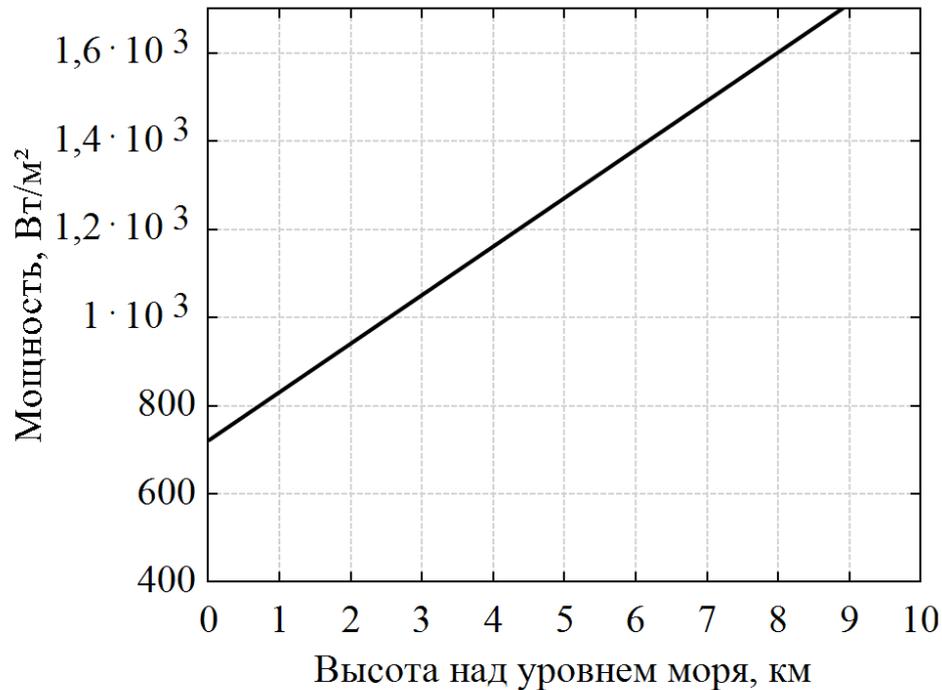


Рисунок 2.4 – Зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от высоты установки коллектора над уровнем моря в километрах при зенитном угле Солнца $z=70^\circ$, построенная по модели 3

Модель № 4

Моделирование атмосферы как однородной сферической модели дает следующее приближение [84]:

$$AM = \sqrt{(r \cdot \cos z)^2 + 2r + 1} - r \cdot \cos z; \quad (2.11)$$

$$r = \frac{R_{\text{Земли}}}{y_{\text{атм}}} \approx 708, \quad (2.12)$$

где $R_{\text{Земли}} = 6371$, км;

$y_{\text{атм}} = 9$ км, – значащая высота атмосферы.

На рисунке 2.5 приведена зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от зенитного угла Солнца при установке солнечного коллектора на уровне моря, расчёт количества воздушной массы проведён по модели № 4. Мощность солнечного излучения рассчитана по формуле (2.10).

На рисунке 2.6 приведен график зависимости мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от высоты установки коллектора над уровнем моря в километрах, при зенитном угле Солнца $z=75^\circ$, расчёт количества воздушной массы проведён согласно модели № 4. Мощность солнечного излучения рассчитана по формуле (2.10)

На рисунке 2.7 приведен график зависимости мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от зенитного угла Солнца, расчёт количества воздушной массы проведён по модели № 4. Мощность солнечного излучения рассчитана по формуле (2.8).

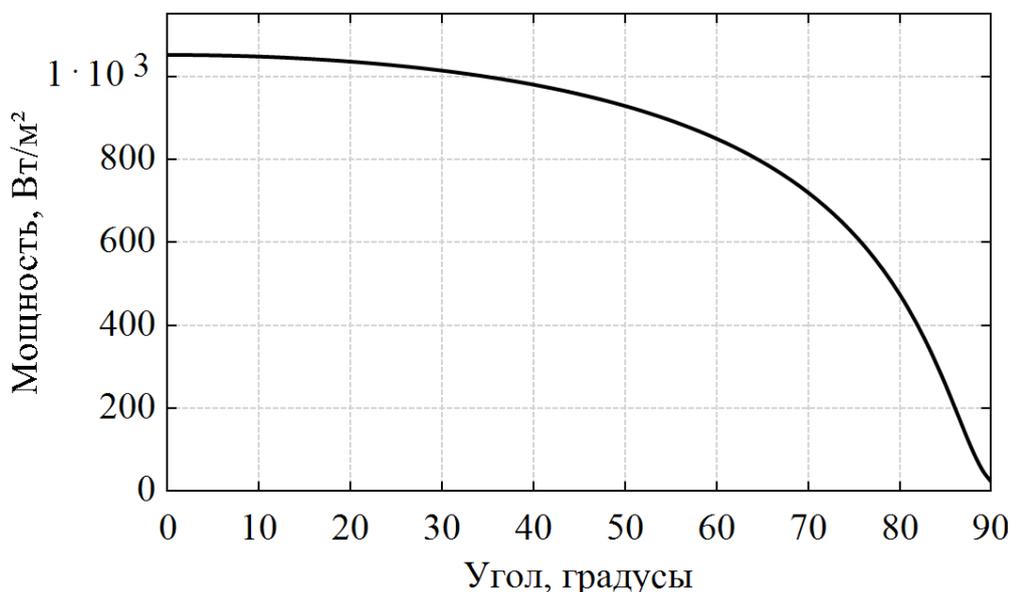


Рисунок 2.5 – Зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от зенитного угла солнца при установке солнечного коллектора на уровне моря

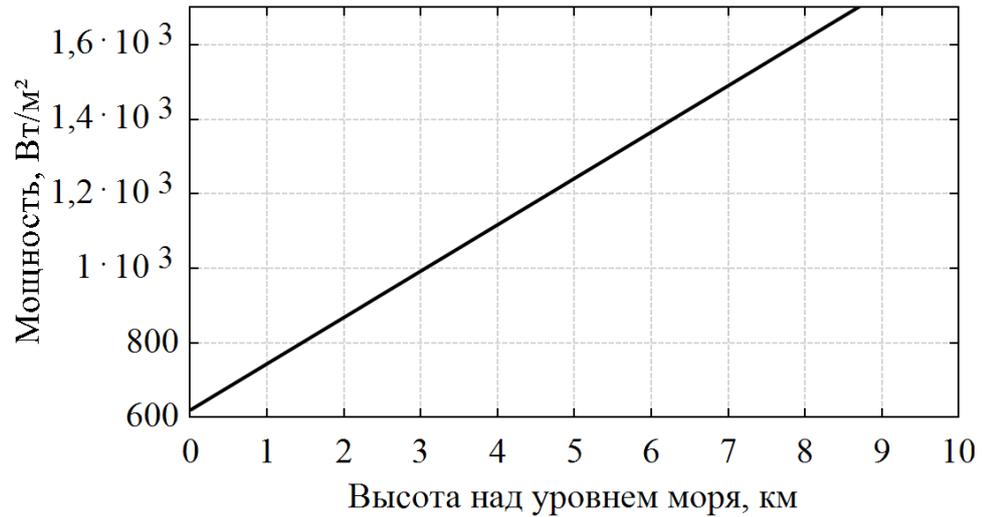


Рисунок 2.6 – Зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от высоты установки коллектора над уровнем моря в километрах, при зенитном угле Солнца $z=75^\circ$

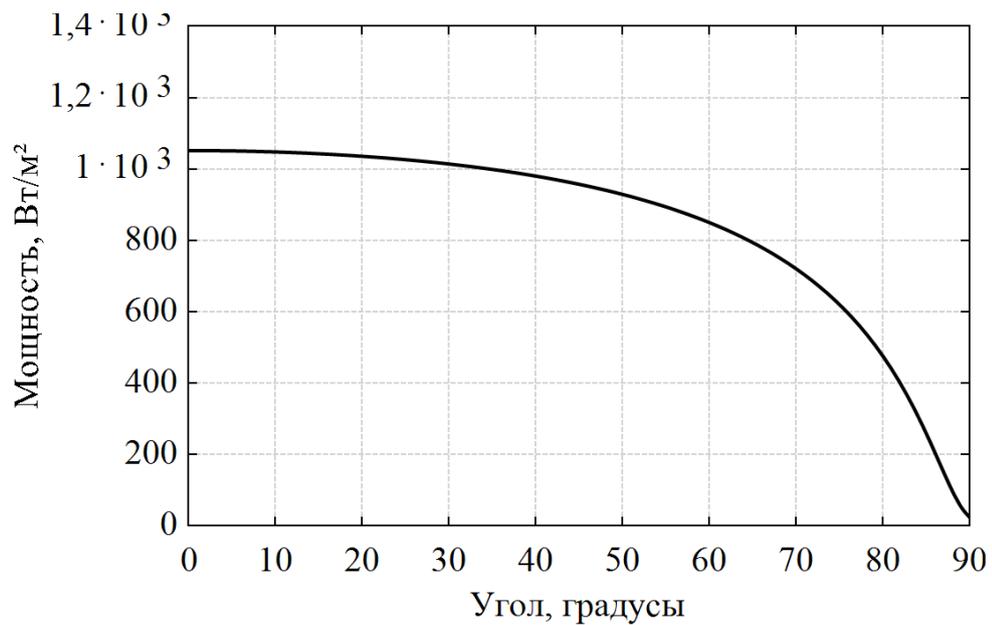


Рисунок 2.7 – Зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от зенитного угла Солнца

Из рисунка 2.6 видно, что при расчете по модели № 4 при зенитном угле Солнца $z=75^\circ$ на высоте около 5,5 км и выше значение мощности I становится больше значения мощности солнечного излучения в космосе $I_0=1362 \text{ Вт/м}^2$.

Модель № 5

В качестве альтернативы, можно применить однородную сферическую модель для оценки AM [85]:

$$AM = \sqrt{(r+c)^2 \cos^2 z + (2r+1+c)(1-c)} - (r+c) \cos z, \quad (2.13)$$

где $r = \frac{R_{\text{Земли}}}{y_{\text{атм}}} \approx 708$, согласно (2.11),

$$c = \frac{h}{y_{\text{атм}}}. \quad (2.14)$$

На рисунке 2.8 приведена зависимость мощности солнечного излучения от зенитного угла Солнца при установке солнечного коллектора на уровне моря, расчёт количества воздушной массы проведён способом 5. Мощность солнечного излучения рассчитана по формуле (2.9).

На рисунке 2.9 приведена зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от высоты установки коллектора в километрах над уровнем моря при зенитном угле Солнца $z=65^\circ$, расчёт количества воздушной массы проведён способом 5. Мощность солнечного излучения рассчитана по формуле (2.10)

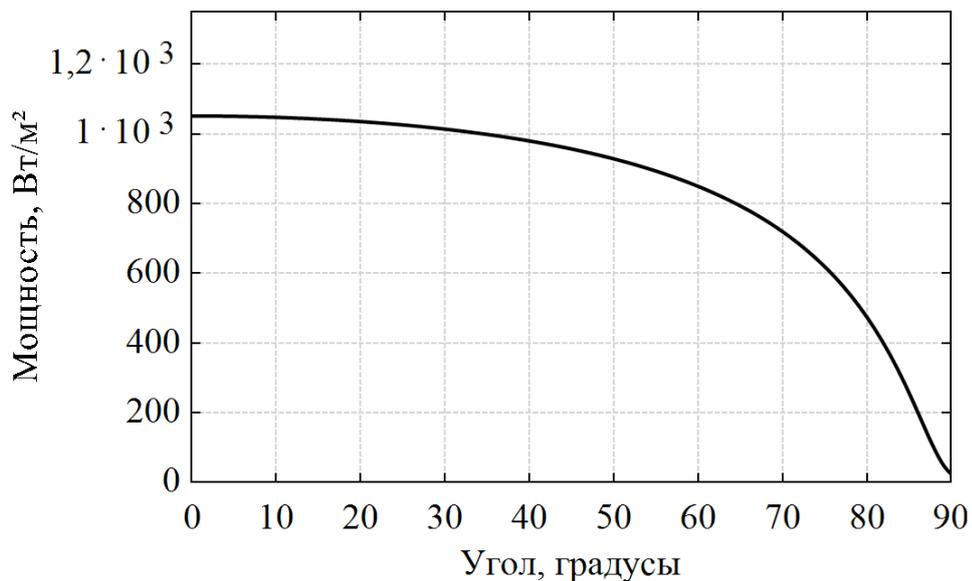


Рисунок 2.8 – Зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от зенитного угла солнца при установке солнечного коллектора на уровне моря

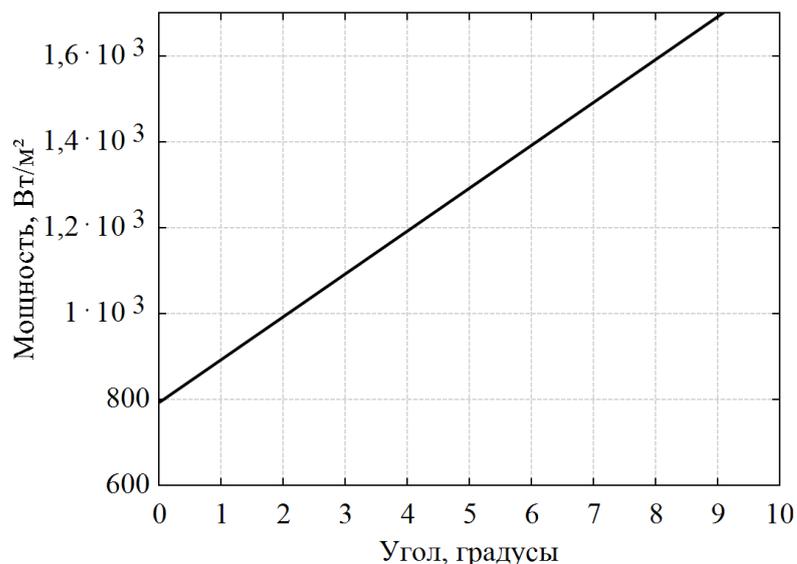


Рисунок 2.9 – Зависимость мощности солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли, от высоты установки коллектора в километрах над уровнем моря при зенитном угле Солнца $z=65^\circ$

Из рисунка 2.9 видно, что при расчете по модели № 4 при зенитном угле Солнца $z=65^\circ$ на высоте около 5,5 км и выше значение мощности I становится больше значения мощности солнечного излучения в космосе $I_0=1362 \text{ Вт/м}^2$.

Таким образом, приведенные выше методики не могут быть использованы для точного расчета солнечной радиации, приходящей на солнечный коллектор, так как не являются универсальными, имеют ограничения по высоте над уровнем моря и/или зенитному углу Солнца.

2.3 Моделирование солнечной инсоляции с учетом переменной плотности атмосферы

Автором предложена следующая методика расчета потока солнечного излучения, приходящего на поверхность Земли. Ее сущность изложена ниже.

Поглощение света в среде зависит от плотности среды земной атмосферы (Рисунок 2.10).

Плотность среды рассчитывается по уравнению Менделеева-Клапейрона [85]:

$$\rho = \frac{P \cdot M}{R \cdot T}, \quad (2.15)$$

где T – изменение в тропосфере температуры в зависимости от высоты установки коллектора над уровнем моря:

$$T = T_0 + L \cdot h, \quad (2.16)$$

P – изменение давления в зависимости от высоты:

$$P = P_0 \left(1 + \frac{L \cdot H_{\text{КОЛ}}}{T_0}\right)^{\frac{-g \cdot M}{R \cdot L}}; \quad (2.17)$$

$P_0 = 101325$ Па – стандартное атмосферное давление на уровне моря;

$T_0 = 288,15$ К – стандартная температура на уровне моря;

$g = 9,80665$ м/с² – ускорение свободного падения;

$L = -0,0065$ К/м – среднее значение вертикальной компоненты градиента температуры в тропосфере;

$R = 8,31447$ Дж/моль К – универсальная газовая постоянная;

$M = 0,0289644$ кг/моль – молярная масса сухого воздуха;

h , м – высота установки коллектора над уровнем моря.

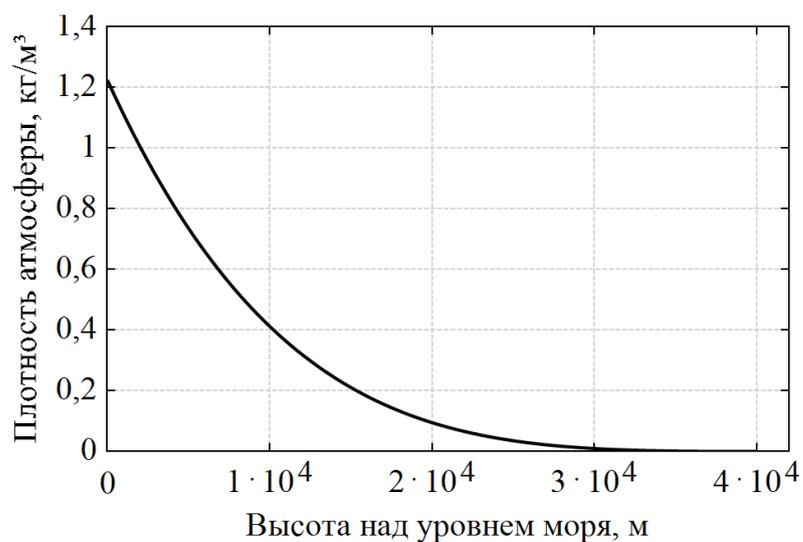


Рисунок 2.10 – Зависимость плотности атмосферы от высоты над уровнем моря в метрах

В таблице 2.3 приведены значения плотности воздуха на разной высоте над уровнем моря [86]. Из таблицы видно, что на высотах 40 км и выше, плотностью атмосферы для расчетов можно пренебречь.

Таблица 2.3 – Значение плотности воздуха на разной высоте над уровнем моря

Высота над уровнем моря, м	Плотность воздуха, кг/м ³	Высота над уровнем моря, м	Плотность воздуха, кг/м ³	Высота над уровнем моря, м	Плотность воздуха, кг/м ³
0	1,2249771	4000	0,8193975	14000	0,2439325
500	1,1672954	5000	0,7364245	16000	0,1825145
1000	1,1117146	6000	0,6600359	20000	0,0955466
1500	1,0581808	7000	0,5898608	24000	0,0445178
2000	1,0066414	8000	0,5255402	30000	0,0100621
2500	0,9570443	9000	0,4667268	35000	1,6228·10 ⁻³
3000	0,9093382	10000	0,413085	40000	6,2057·10 ⁻⁵

Вводится понятие коэффициента плотности. Коэффициент плотности рассчитывается по формуле (2.18), где $\rho_0 = 1,225$ кг/м³ – плотность сухого воздуха при температуре 15 °С и давлении 101330 Па. Для экватора при высоте установки коллектора над уровнем моря $h = 0$ м, $k_\rho = 1$. При $h = 40000$ м, $k_\rho = 0$.

$$k_\rho = \frac{P \cdot M}{\rho_0 \cdot R \cdot T} \quad (2.18)$$

На рисунке 2.11 показана зависимость коэффициента плотности k_ρ и воздушной массы, рассчитанной модели № 5, от высоты установки коллектора над уровнем моря в километрах. Из рисунка 2.11 видно, что коэффициент мощности, в отличие от воздушной массы, меняется в

зависимости от высоты над уровнем моря нелинейно, что соответствует реальной физической плотности.

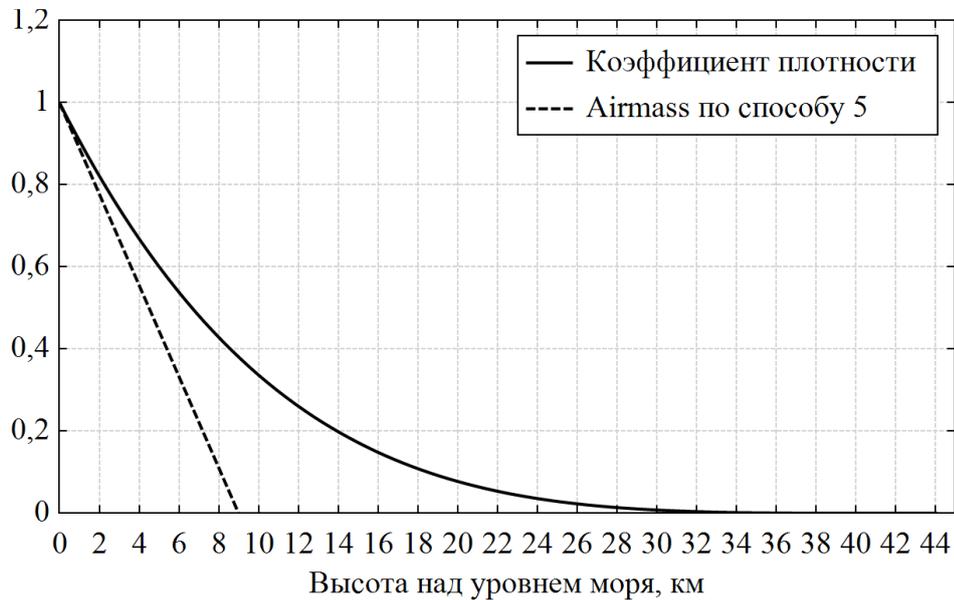


Рисунок 2.11 – Зависимость коэффициента плотности k_p и воздушной массы по расчетной модели №5 от высоты установки коллектора над уровнем моря в километрах

Для экватора, когда Солнце находится в зените, мощность потока солнечного излучения, приходящего на перпендикулярную потоку плоскость, зависит от коэффициента плотности k_p :

$$\frac{dN}{N} = -dk_p. \quad (2.19)$$

Интегрируя правую и левую части уравнения и подставляя пределы интегрирования для коэффициента плотности от 0 до k_p , а для мощности излучения от N до N_0 , где $N_0 = 1362 \text{ Вт/м}^2$, получим:

$$N = N_0 \cdot e^{-k_p}. \quad (2.20)$$

График изменения мощности солнечного излучения на экваторе в зависимости от высоты над уровнем моря, построенный по (2.20) должен начинаться из точки $N_0 = 1362 \text{ Вт/м}^2$ – максимальный поток солнечного

излучения на уровне моря на экваторе. Следовательно, добавляем в (2.20) поправочный коэффициент экспоненты $k_e = 0,26016$:

$$N = N_0 \cdot e^{-k_\rho \cdot k_e}. \quad (2.21)$$

Для общего случая необходимо учесть путь, который солнечные лучи проходят через атмосферу (Рисунок. 2.12).

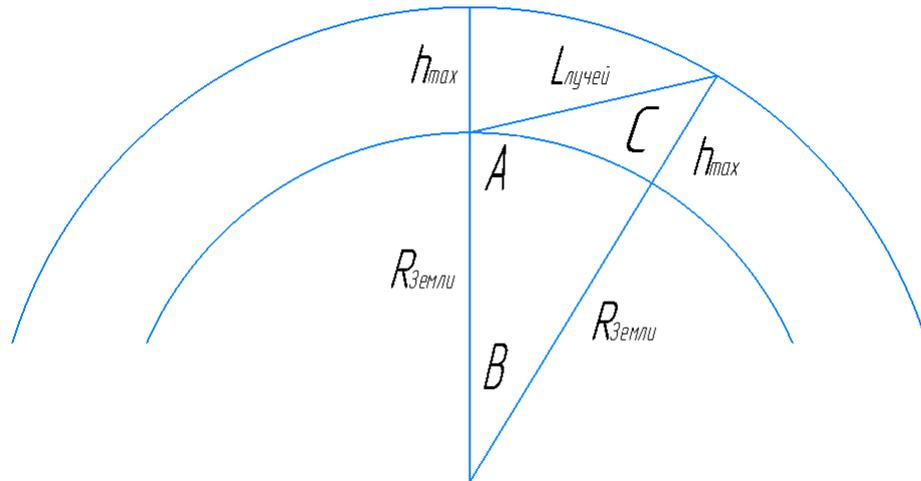


Рисунок 2.12 – Путь солнечных лучей в атмосфере:

$L_{\text{лучей}}$ – длина пути солнечного света через атмосферу; $R_{\text{Земли}} = 6371$ км – радиус Земли; $h_{\text{max}} = 40$ км – значащая высота атмосферы.

$$L_{\text{лучей}} = \sqrt{h_{\text{max}}^2 + 2R_{\text{Земли}}h_{\text{max}} + R_{\text{Земли}}^2 \sin^2 a} - R_{\text{Земли}} \cdot \sin a, \quad (2.22)$$

где $R_{\text{Земли}} = 6371$ км – радиус Земли; a – угол подъема Солнца над горизонтом.

Таким образом, с учетом (2.21) и (2.22) интенсивность прямой солнечной радиации на перпендикулярную поверхность рассчитывается по формуле:

$$N = N_0 \cdot e^{-k_\rho \cdot k_e \cdot \frac{L_{\text{лучей}}}{h_{\text{max}}}}. \quad (2.23)$$

На рисунке 2.13 приведен график изменения мощности солнечного излучения в зависимости от высоты установки солнечного коллектора на

экваторе, построенный по (2.21) для перпендикулярной потоку плоскости для угла подъёма Солнца над горизонтом – 90° .

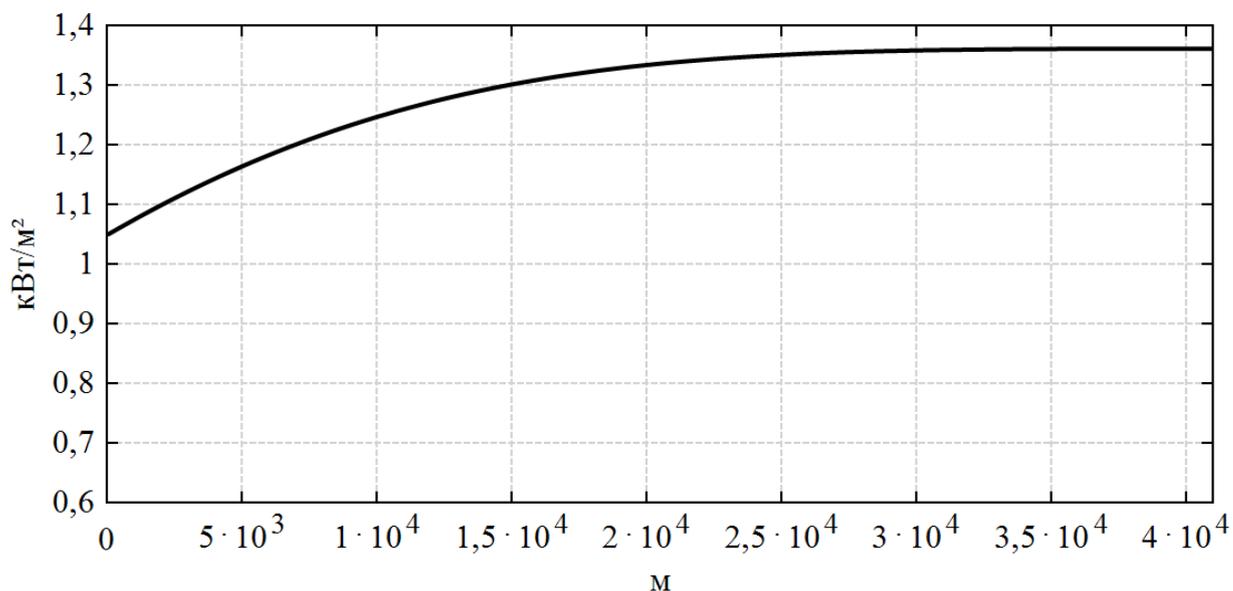


Рисунок 2.13 – График изменения мощности солнечного излучения в зависимости от высоты установки солнечного коллектора на экваторе, построенный по (2.21) для перпендикулярной потоку плоскости. Угол подъёма Солнца над горизонтом – 90°

Угол подъёма Солнца над горизонтом является функцией от времени и широты установки коллектора:

$$a = f(\varphi, t). \quad (2.24)$$

Мощность является функцией от высоты установки коллектора над уровнем моря и угла подъёма Солнца над горизонтом:

$$N = f[h, a(\varphi, t)]. \quad (2.25)$$

Проинтегрировав функцию мощности (2.25) на отрезке времени от 0 до 24 часов, получаем суточную энергию, приходящую на 1 м^2 поверхности, перпендикулярной потоку солнечной радиации:

$$Q_{\text{день}} = \int_0^{24} N[h, a(\varphi, t)] dt. \quad (2.26)$$

Проинтегрировав функцию мощности (2.26) на отрезке времени от 0 до 365 дней, получаем годовую энергию, приходящую на 1 м^2 поверхности, перпендикулярной потоку солнечной радиации:

$$Q_{\text{год}} = \int_0^{365} N[h, a(\varphi, t)] dt = \sum_{\text{день}=1}^{365} Q_{\text{день}}. \quad (2.27)$$

На рисунке 2.14 приведена зависимость длины пути солнечных лучей в атмосфере от угла подъёма Солнца над горизонтом.

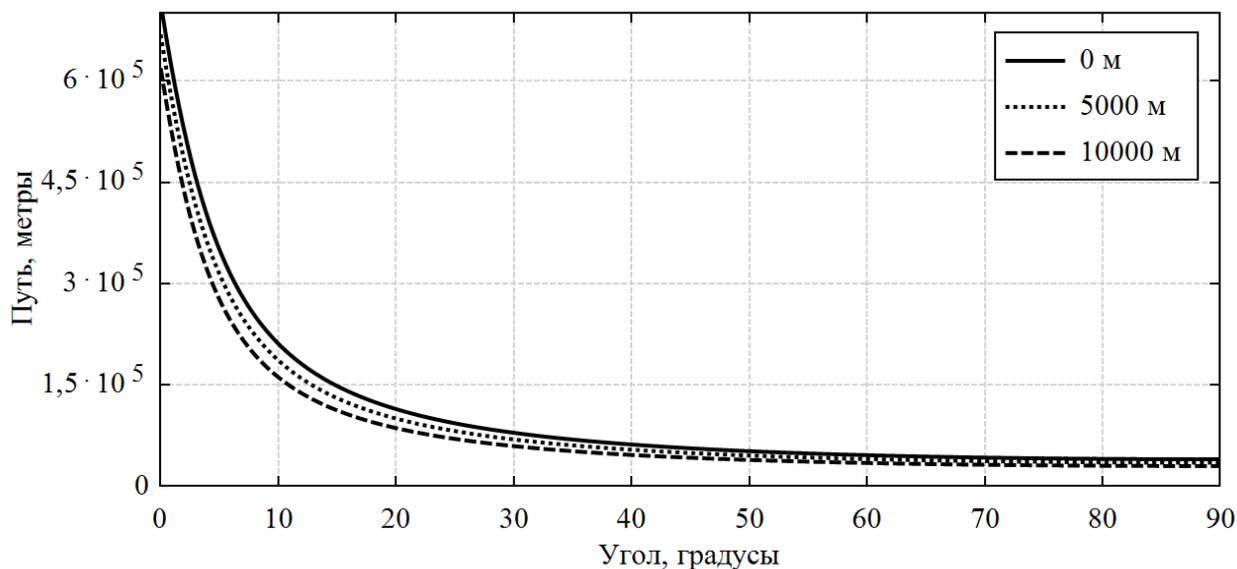


Рисунок 2.14 – Зависимость длины пути солнечных лучей в атмосфере от угла подъёма Солнца над горизонтом

2.4 Анализ результатов расчета по авторской модели для региона юга Сибири

Разработанный автором алгоритм расчета может быть использован для управления системой следящих за Солнцем коллекторов (Рисунок 2.15).

На рисунках 2.16–2.19 приведены графики мощности солнечного излучения, приходящего на перпендикулярную потоку плоскость. Расчеты выполнены для Новосибирска: 55° северной широты, высота над уровнем моря 150 м.

На рисунках 2.20 и 2.21 приведены графики энергии для перпендикулярной потоку площадки, расположенной в Новосибирске.

Годовая солнечная инсоляция для Новосибирска, рассчитанная по (2.27): $Q_{\text{год}} = 2685 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{год}\cdot\text{м}^2)$ (для перпендикулярной потоку солнечной радиации поверхности).

На рисунках 2.22–2.25 приведены графики мощности солнечного излучения, приходящего на горизонтальную плоскость, расположенную в Новосибирске.

На рисунках 2.26 и 2.27 приведены графики энергии солнечного излучения, приходящей на горизонтальную плоскость, расположенную в г. Новосибирске.

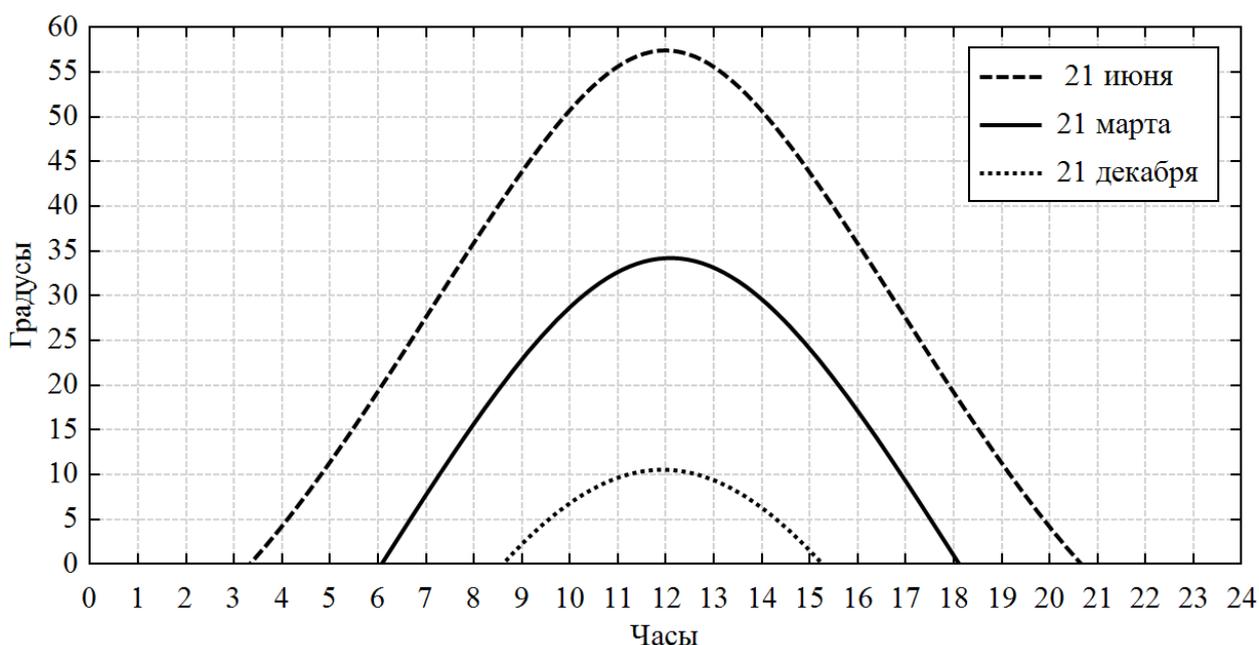


Рисунок 2.15 – Зависимость высоты Солнца над горизонтом от времени суток для 55° северной широты (широта г. Новосибирска)

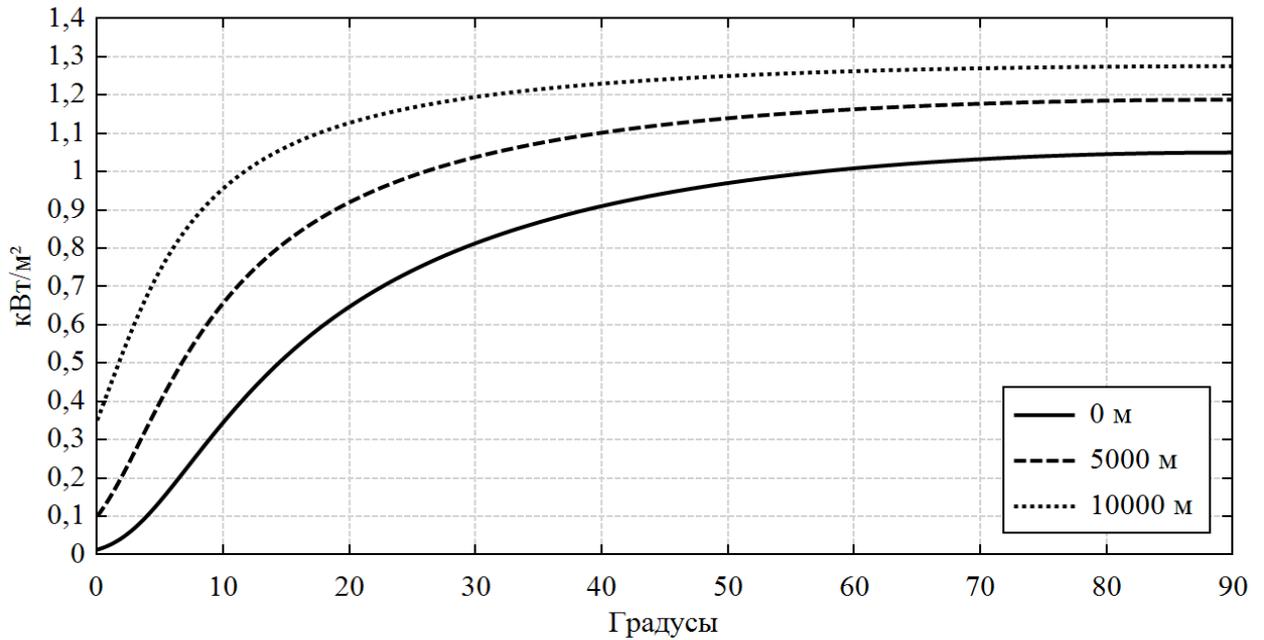


Рисунок 2.16 – Зависимость удельной мощности излучения, поступающей на перпендикулярную потоку плоскость, от высоты Солнца над горизонтом

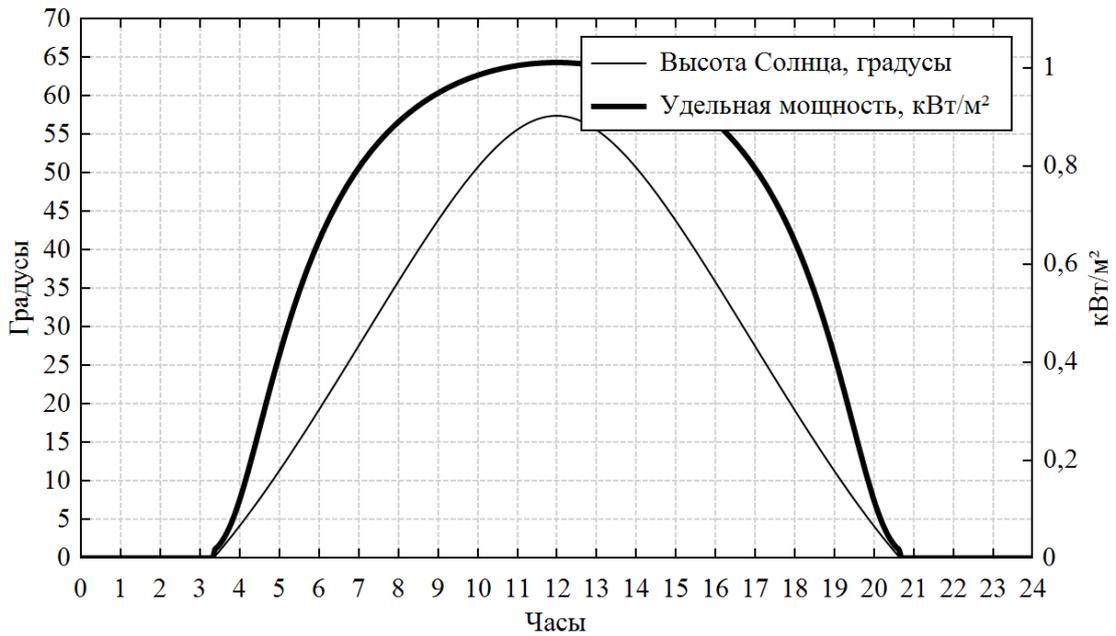


Рисунок 2.17 – Графики зависимости высоты подъема Солнца над горизонтом и удельной мощности от времени для перпендикулярной потоку плоскости

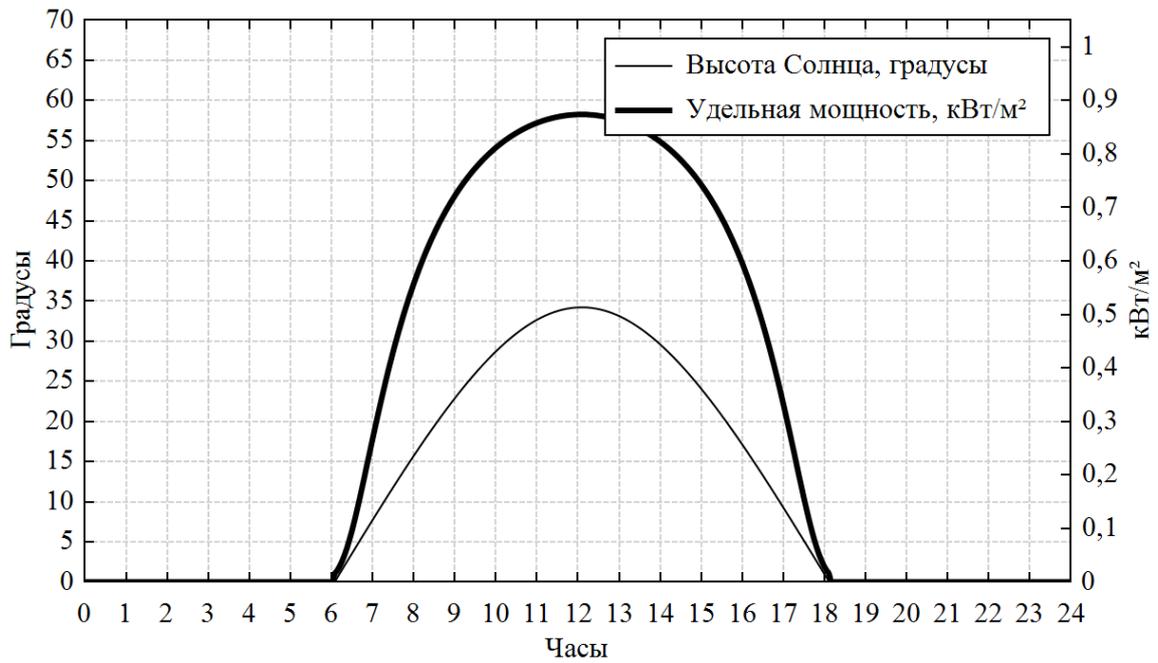


Рисунок 2.18 – Графики зависимости высоты подъема Солнца над горизонтом и удельной мощности от времени для перпендикулярной потоку плоскости солнечного коллектора

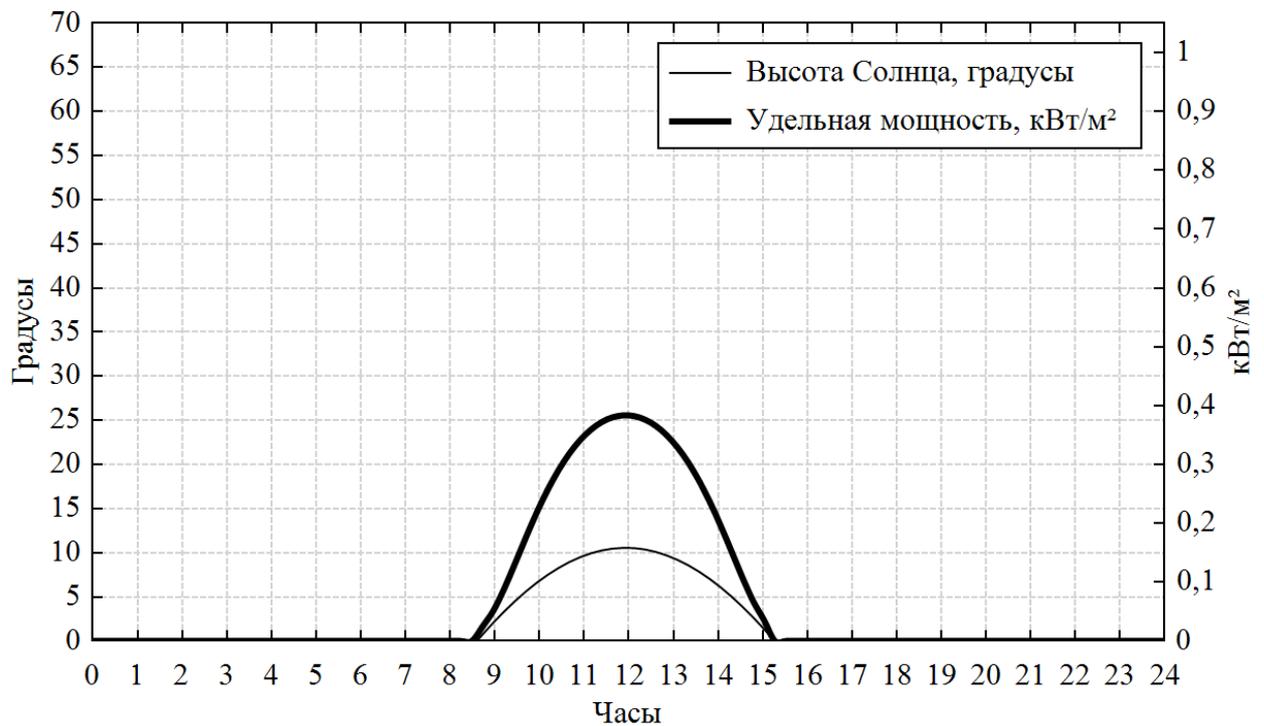


Рисунок 2.19 – Графики зависимости высоты подъема Солнца над горизонтом и удельной мощности от времени для перпендикулярной потоку плоскости

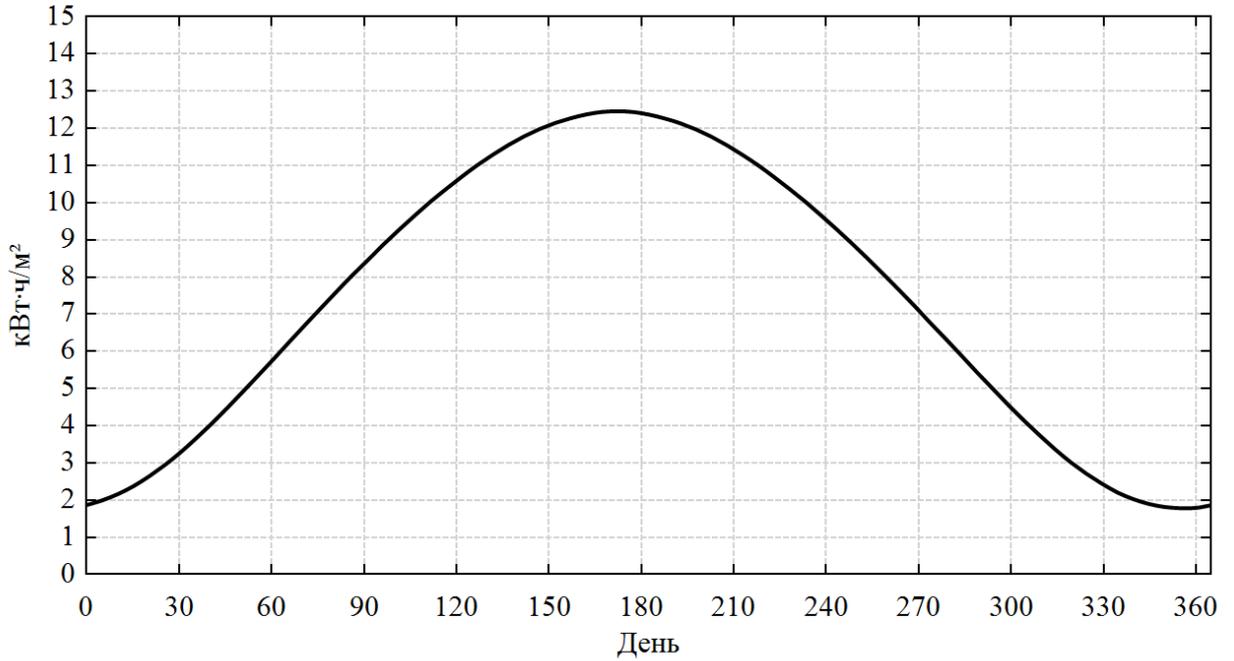


Рисунок 2.20 – Зависимость энергии солнечного излучения, приходящей на перпендикулярную потоку плоскость в зависимости от дня года для г. Новосибирска

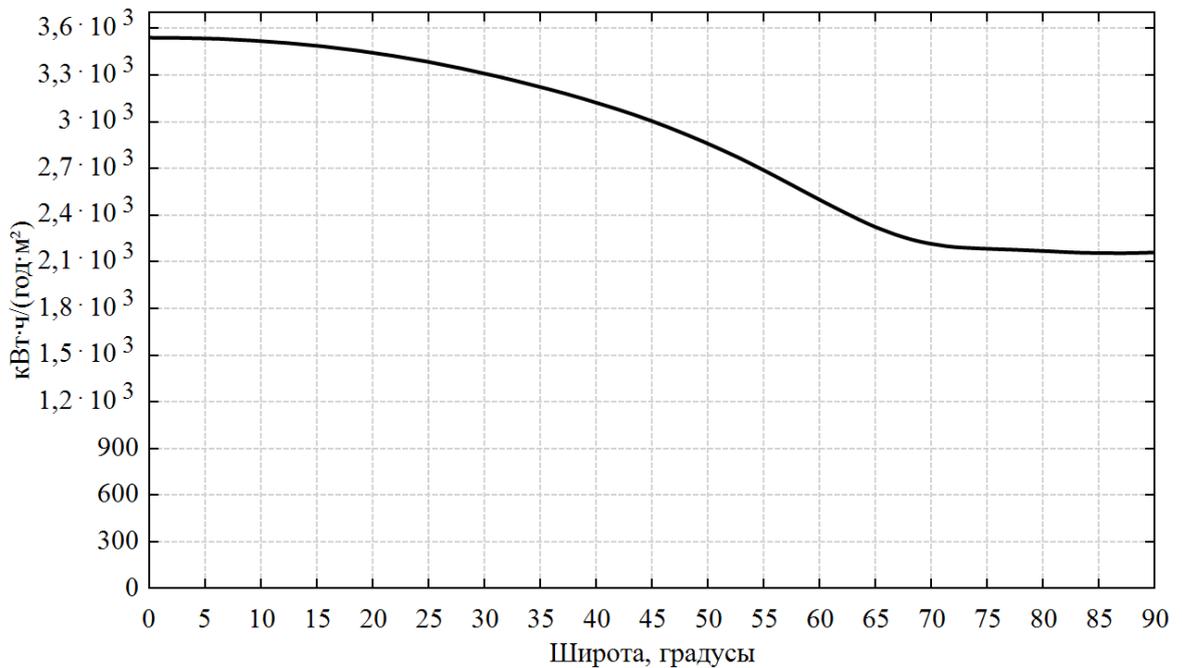


Рисунок 2.21 – Зависимость энергии солнечного излучения, приходящей на перпендикулярную потоку плоскость, в зависимости широты (высота над уровнем моря 150 м)

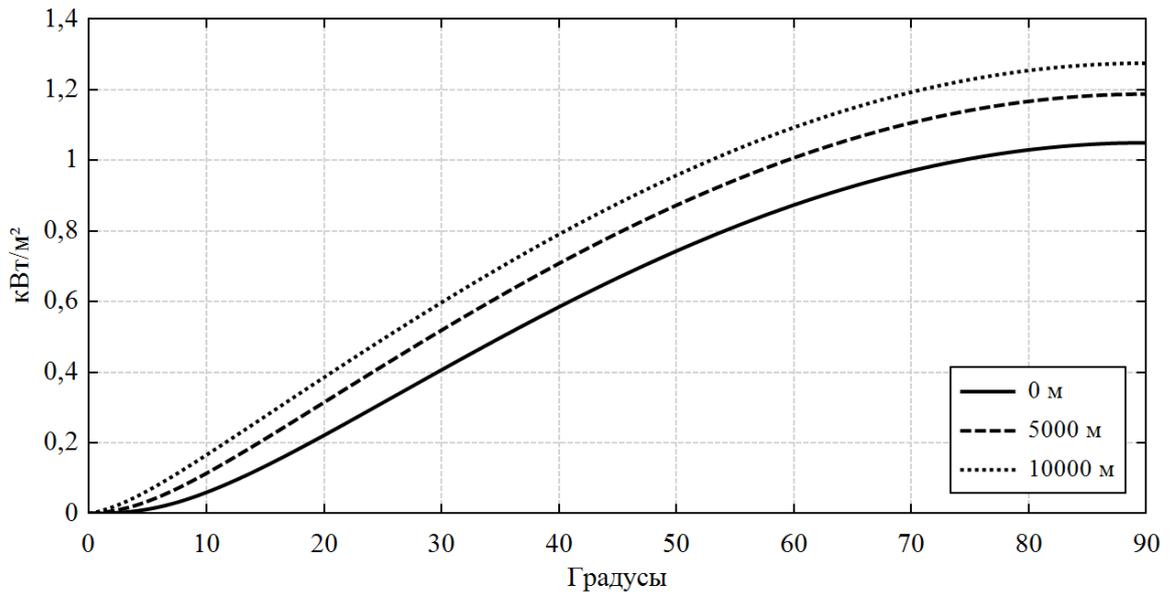


Рисунок 2.22 – Зависимость удельной мощности излучения, приходящей на горизонтальную плоскость, от высоты Солнца над горизонтом

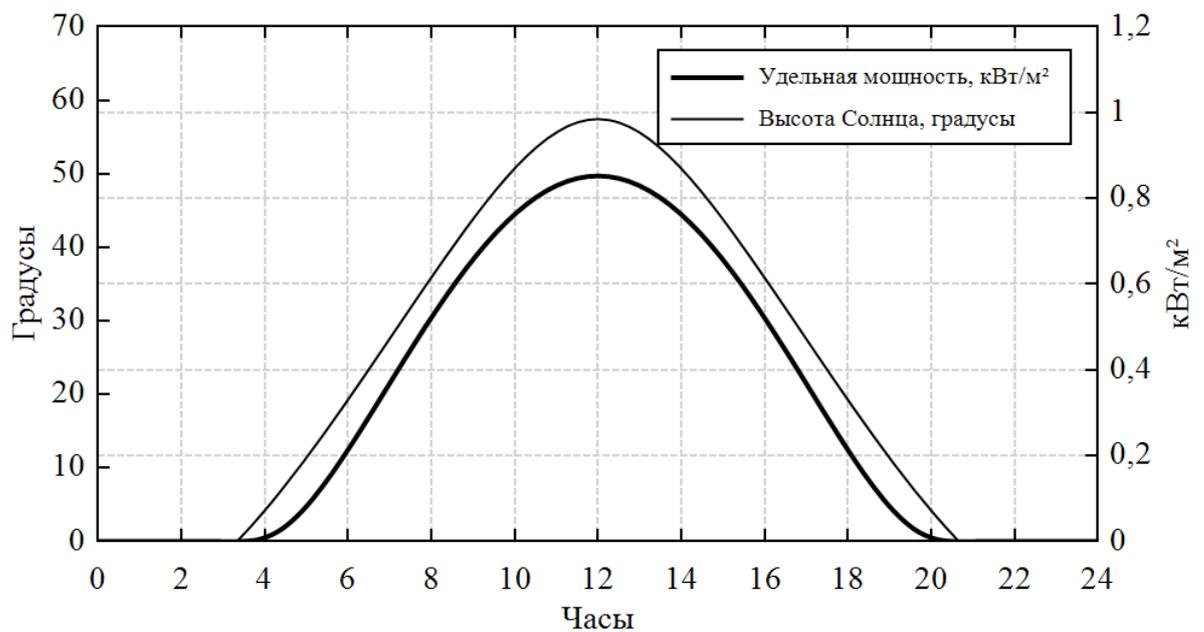


Рисунок 2.23 – Графики зависимости высоты подъема Солнца над горизонтом и мощности от времени для горизонтальной плоскости (21 июня)

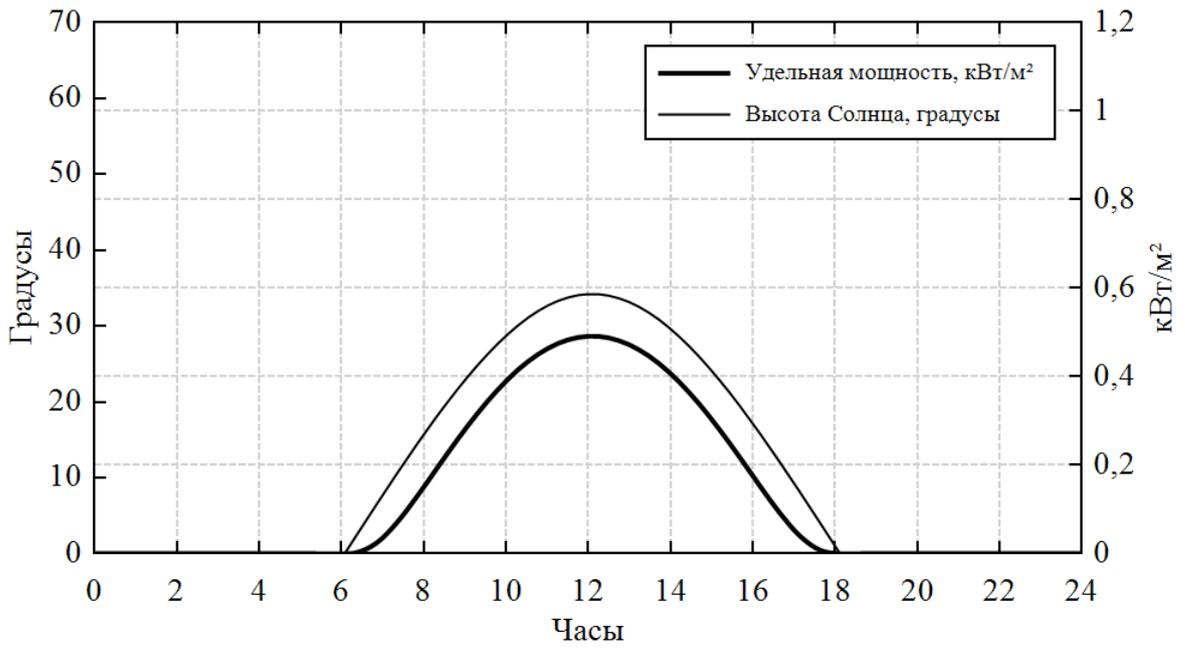


Рисунок 2.24 – Графики зависимости высоты подъема Солнца над горизонтом и мощности от времени для горизонтальной плоскости (21 марта)

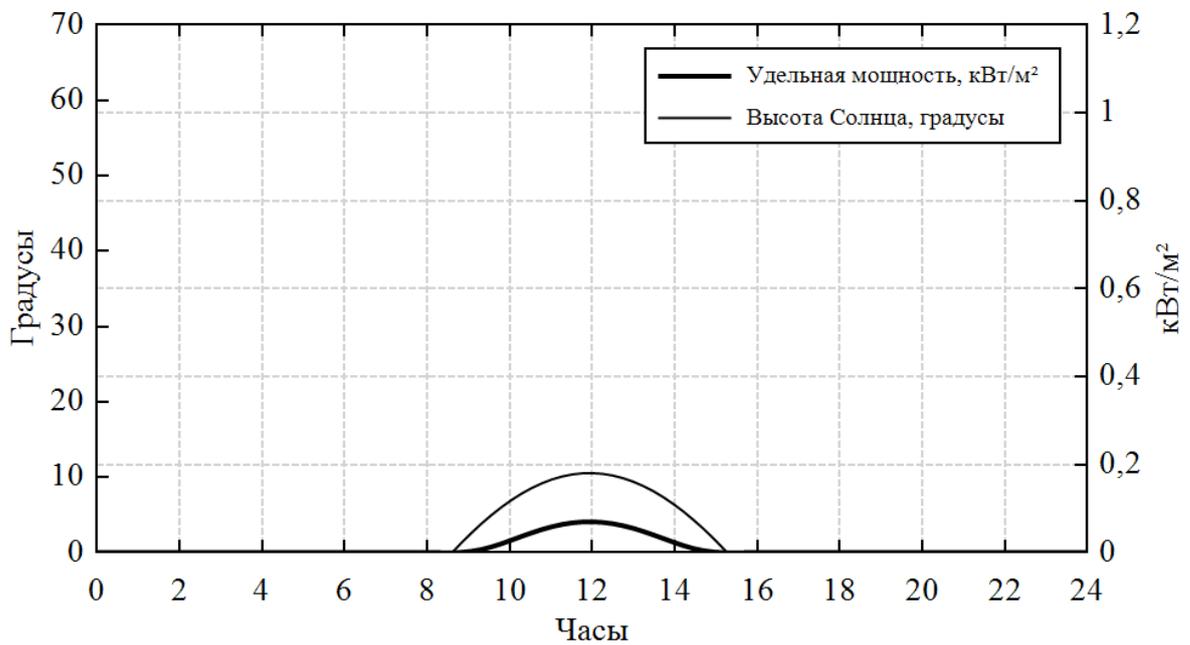


Рисунок 2.25 – Графики зависимости высоты подъема Солнца над горизонтом и мощности от времени для горизонтальной плоскости (21 декабря)

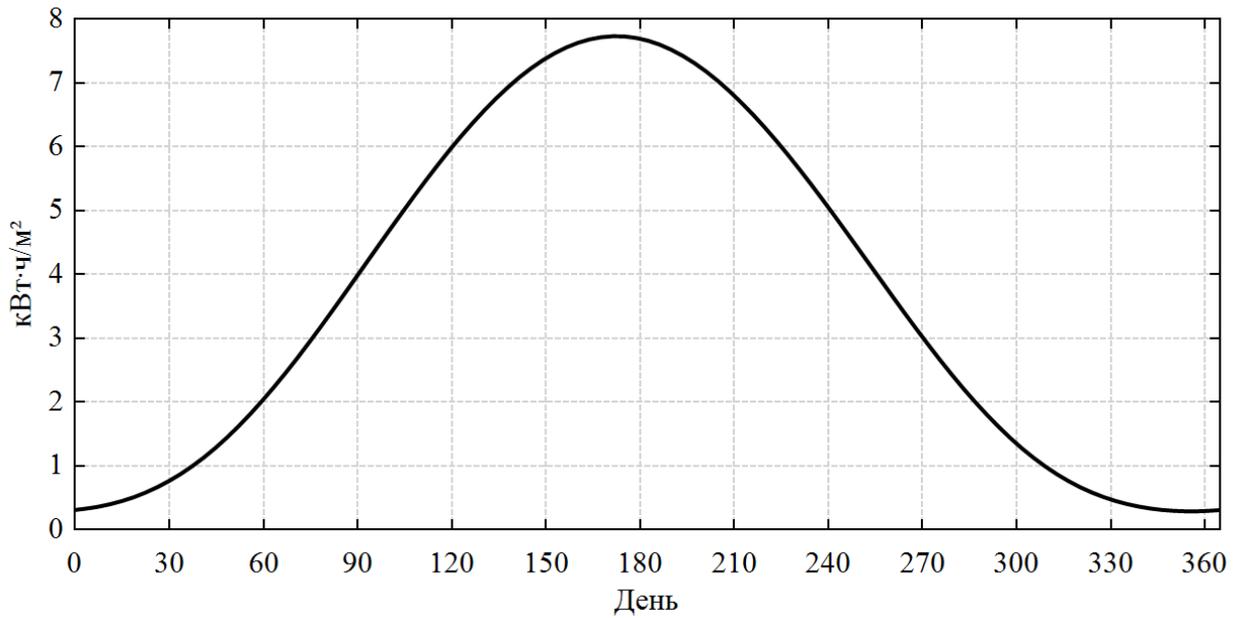


Рисунок 2.26 – Зависимость энергии солнечного излучения, приходящей на горизонтальную плоскость в зависимости от дня года

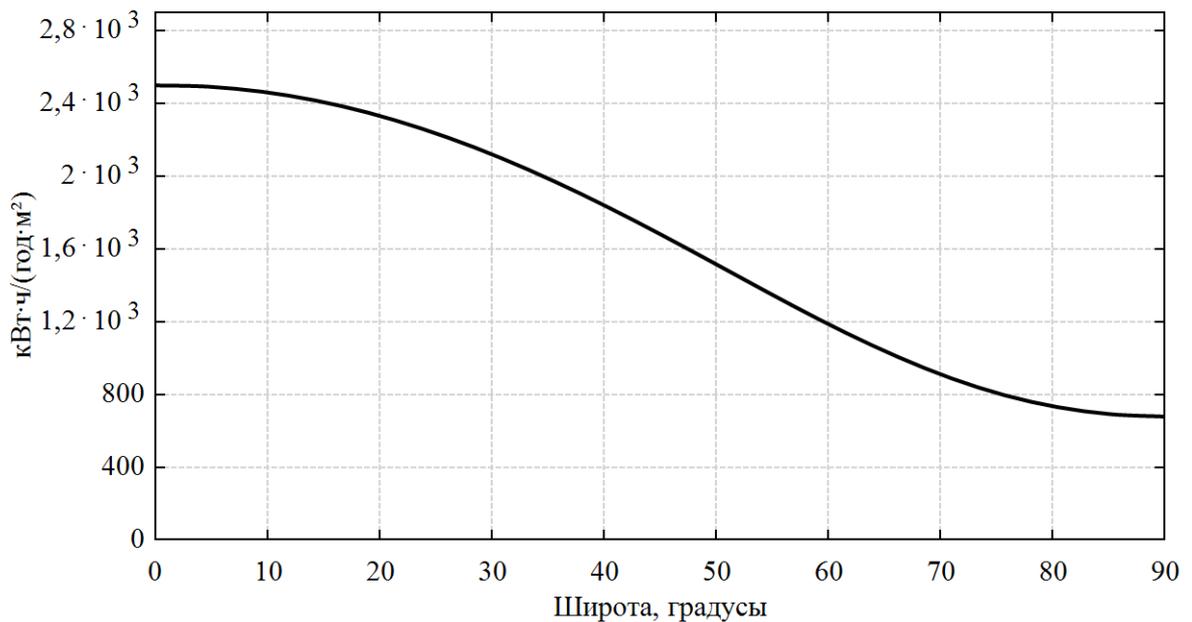


Рисунок 2.27 – Зависимость энергии солнечного излучения, приходящей на горизонтальную плоскость, от широты (высота над уровнем моря 150 м)

Для определения потенциала выработки солнечной энергии часто используют карты ресурсов солнечной энергии. Эти карты создаются на

основе спутниковых снимков и интерполяции данных наземных метеорологических станций, которые часто сильно удалены друг от друга, а их данные не всегда точны. Данные на картах не всегда имеют высокое качество и достаточный масштаб, чтобы быть надежной опорой для принятия решения по установке солнечного коллектора. Ошибка в выборе места расположения или угла наклона солнечного коллектора может привести к существенному уменьшению энергии солнечного излучения, падающей на коллектор.

Надежные данные о приходящей на коллектор энергии позволяют создать базу данных производительности солнечных станций в разных географических и природно-климатических условиях. Также эти данные необходимы для расчета двух основных способов преобразования солнечной радиации в электроэнергию в технических устройствах (прямое преобразование и при реализации термодинамических циклов), а также для оценки эксергетического потенциала получаемых полезных продуктов и установления эксергетического КПД технологий производства теплоты, холода и электроэнергии.

Годовая выработка солнечной энергии для Новосибирска, рассчитанная по формуле (2.27): $Q_{\text{год}}=1345$ кВт·ч/м² (для горизонтальной плоскости).

Ниже представлены для сравнения общеизвестные данные метеонаблюдений (Таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Сравнение полученных расчетов с результатами многолетних наблюдений

	Поверхность, перпендикулярная солнечным лучам, кВт·ч/м ²	Горизонтальная поверхность, кВт·ч/м ²
Расчетные данные	2685	1345
Данные наблюдений	2680	1285

Данные получены многолетними измерениями солнечной радиации при ясном небе (облачность не более 2 баллов при диске Солнца и околосолнечной зоне 5° свободной от облаков и следов облаков). Характеристики рассчитаны за годы внутри периода 1960-1980 г.г.

Можно видеть, что результаты расчетов по разработанной автором настоящего исследования модели соответствуют результатам многолетних метеонаблюдений (Таблица 2.4).

2.5 Экологическая эффективность солнечных водонагревательных коллекторов на юге Сибири

В [87, 88] приведена методика расчета объема сухих продуктов сгорания при сжигании твердого топлива и газа. На основании этой методики по расчетным характеристикам твердых и жидких топлив [54], используемых на юге Сибири, находим объем сухих продуктов сгорания. Расчетные характеристики угля приведены в таблице 2.5. Расчетные характеристики газа приведены в таблице 2.6.

Объем воздуха, который нужен для сжигания 1 м³ газа:

$$V_0 = 0,0478 \left[0,5(CO + H_2) + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right], \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.28)$$

Объем углекислого газа, который выделяется при сжигании при сжигании 1 м³ газа:

$$V_0 = 0,01 \left[CO_2 + CO + \sum m \cdot C_m H_n \right], \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.29)$$

Теоретический объем SO₂, выделяемого при сжигании 1 м³ газа:

$$V_{SO_2} = 0,01H_2S, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.30)$$

Теоретический объем NO₂, выделяемого при сжигании 1 м³ газа:

$$V_{NO_2} = 0,79V_0 + \frac{N_2}{100}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (2.31)$$

Теоретически необходимый объем воздуха, необходимый для сжигания 1 кг угля:

$$V^0 = 0,089C_p + 0,266H_p + 0,033(S_p - O_p), \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (2.32)$$

где C_p – содержание углерода в рабочей массе, %;

H_p – содержание водорода в рабочей массе, %;

S_p – содержание серы в рабочей массе, %;

O_p – содержание кислорода в рабочей массе, %.

Теоретический объем сухих продуктов сгорания, выделяемый при сжигании 1 кг угля:

$$V_{CG} = 0,0187(C_p + 0,375S_p) + 0,79V_0 + 0,8 \frac{N_p}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.33)$$

где N_p – содержание азота в рабочей массе, %;

Теоретический объем углекислого газа, выделяемого при сжигании 1 кг угля:

$$V_{CO_2} = 1,886 \frac{C_p}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.34)$$

Теоретический объем SO_2 , выделяемого при сжигании 1 кг угля:

$$V_{SO_2} = 0,7 \frac{S_p}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.35)$$

Теоретический объем NO_2 , выделяемого при сжигании 1 кг угля:

$$V_{NO_2} = 0,79V_0 + 0,79 \frac{N_p}{100}, \text{ м}^3/\text{кг}. \quad (2.36)$$

Перевод энергоресурса в условное топливо [54]:

$$B_{\text{усл}} = \frac{Q_p^H}{29,3}, \text{ кг у.т.}, \quad (2.37)$$

где Q_p^H - низшая теплота сгорания реального топлива.

Исходные данные для расчета эколого-экономической эффективности солнечного коллектора:

1. Коллектор установлен в Новосибирске (55° с.ш.).
2. Высота установки коллектора над уровнем моря составляет 150 метров.
3. КПД солнечного коллектора $\eta_{\text{кол}} = 0,8$.
4. Максимальная работоспособная энергия (эксергия), приходящая в год на 1 м^2 поверхности солнечного коллектора, установленного в указанных выше условиях: $Q_{\text{год}} = 2693,62 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ [89-93].

Таблица 2.5 – Расчетные характеристики угля, используемого на юге Сибири [54]

Тип топлива	Q _{HP} , МДж/кг	W _P , %	A _P , %	S _P , %	C _P , %	H _P , %	N _P , %	O _P , %
Кузнецкий уголь марки Д	22,836	12	13,2	0,3	58,7	4,2	1,9	9,7
Кузнецкий уголь марки Г	26,146	8,5	11	0,5	66	4,7	1,8	7,5
Кузнецкий уголь марки 1СС	23,833	9	13,2	0,3	58,7	4,2	1,9	9,7
Кузнецкий уголь марки 2СС	24,596	9	18,2	0,4	64,1	3,3	1,5	3,5
Кузнецкий уголь марки Ж	20,95	7	30,7	0,7	53,6	3	1,6	3,4
Экибастузский уголь марки СС	16,76	7	38,1	0,8	43,4	2,9	0,8	7,0
Беловский уголь, антрацит	27,1763	0,8	0,6	0,6	95	1,1	0,9	1,0
Листвянские шахты, антрацит	34,777	0,8	0,5	0,3	98	0,1	0,1	0,2

Таблица 2.6 – Расчетные характеристики газа, используемого на юге Сибири [54]

Тип топлива	Q _{HP} , МДж/кг	CO ₂ , %	CH ₄ , %	C ₂ H ₆ , %	C ₃ H ₈ , %	C ₄ H ₁₀ , %	N ₂ , %
Нерюнгринский газ	45	0,2	98,2	0,4	0,1	0,1	1
Тюменский газ	35,82	0,5	97,3	1,0	0,3	0,4	0,5
Уренгойский газ	35,29	0,3	98,4	0,1	-	-	1,2
Ямбургский газ	35,36	0,1	98,6	0,1	-	-	1,2

2.6 Результаты экологического расчета

Максимальное количество условного, реального топлива и финансовых показателей, которые экономит потребитель, например, владелец частного дома за год, если использует солнечные водонагревательные коллекторы, приведено в таблице 2.7 (принимая, что установлен следящий за солнцем солнечный водонагревательный коллектор). Данные приведены на 1 м² эффективной площади солнечного коллектора. Тарифы на газ и уголь взяты на декабрь 2023 г. в Новосибирске (газ: 7,43 руб/м³; уголь: 6000 руб/т).

Таблица 2.7 – Максимальная годовая экономия ресурсов и денег на юге Сибири на 1 м² солнечного водонагревающего коллектора

Энергетический ресурс	Максимальная экономия ресурса	Максимальная экономия, руб.
Условное топливо	265 кг	
Кузнецкий уголь марки Д	338 кг	2028
Кузнецкий уголь марки Г	297 кг	1782
Кузнецкий уголь марки 1СС	326 кг	1956
Кузнецкий уголь марки 2СС	316 кг	1896
Кузнецкий уголь марки Ж	370 кг	2220
Экибастузский уголь марки СС	463 кг	2778
Беловский уголь, антрацит	286 кг	1716
Листвянские шахты, антрацит	223 кг	1338
Нерюнгринский газ	175 м ³	1300,8
Тюменский газ	217 м ³	1612,9
Уренгойский газ	220 м ³	1635,3
Ямбургский газ	219 м ³	1627,8

Сокращение выбросов на 1 м² солнечного коллектора для ГВС приведено в таблице 2.8.

В таблице приведено, на сколько сокращаются выбросы сухих продуктов сгорания, CO₂, SO₂, NO₂ и золы на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора.

Углеродный след – совокупность всех выбросов парниковых газов, произведённых прямо и косвенно отдельным человеком, организацией, мероприятием или продуктом.

Значения уменьшения углеродного следа на 1 м² солнечного коллектора для ГВС приведены в таблице 2.9.

Значения уменьшения углеродного следа взяты из [94-96]. Таблица 2.9 показывает снижение экологических издержек, связанных с добычей, переработкой и транспортировкой ископаемого топлива.

Углеродный след от добычи угля и газа растет, так как легкодоступные месторождения в основном уже отработаны, а новые месторождения приходится разрабатывать в труднодоступных районах: Заполярье, Восточная Сибирь и т.д., это вызывает повышение себестоимости добычи и рост углеродного следа.

Таблица 2.8 – Сокращение выбросов на 1 м² солнечного коллектора для ГВС

Тип топлива	V_{CG} , м ³ /м ²	CO ₂ , м ³ /м ²	SO ₂ , м ³ /м ²	NO ₂ , м ³ /м ²	Зола, кг/м ²
Кузнецкий уголь марки Д	1997,3997	376,09	0,7134	1623,74	44,84
Кузнецкий уголь марки Г	1987,243	369,33	1,0385	1619,96	32,64
Кузнецкий уголь марки 1СС	1913,84	360,35	0,6835	1555,79	42,96
Кузнецкий уголь марки 2СС	1997,4352	381,29	0,8831	1618,44	57,403
Кузнецкий уголь марки Ж	1980,5717	374,33	1,8144	1607,54	113,68
Экибастузский уголь марки СС	2000,88	378,87	2,592	1622,59	176,35
Беловский уголь, антрацит	2480,055	511,45	1,1989	1971,72	1,71
Листвянские шахты, антрацит	1951,73	412,29	0,4684	1542,46	1,115
Нерюнгринский газ	1469,07	172,22	-	1296,85	-
Тюменский газ	1849,69	221,55	-	1628,14	-
Уренгойский газ	1871,54	217,41	-	1654,13	-
Ямбургский газ	1867,82	216,97	-	1650,85	-

Таблица 2.9 – Значения уменьшения углеродного следа на 1 м² солнечного коллектора для ГВС

Энергоресурс	Углеродный след, кг
Кузнецкий уголь марки Д	35,33
Кузнецкий уголь марки Г	30,85
Кузнецкий уголь марки 1СС	33,85
Кузнецкий уголь марки 2СС	32,81
Кузнецкий уголь марки Ж	38,51
Экибастузский уголь марки СС	48,14
Беловский уголь, антрацит	29,69
Листвянские шахты, антрацит	23,19
Нерюнгринский газ	17,93
Тюменский газ	22,52
Уренгойский газ	22,86
Ямбургский газ	22,82

Выводы по главе 2

1. Предлагаемая методика расчета солнечной радиации, приходящей на коллектор, может служить основой эксергетического анализа солнечных коллекторов, так как получаемое в результате расчетов значение солнечной радиации на перпендикулярную потоку поверхность является её эксергетическим потенциалом. Результаты исследования могут быть обобщены для оценки эффективности использования солнечной энергии на территории России и за ее пределами.

2. Предложенная математическая модель позволяет рассчитать количество солнечной радиации, приходящей на солнечный коллектор, установленный под любым углом к потоку солнечного излучения; оценить эффективность его установки в любом регионе; рассчитать мощность солнечного коллектора в любой день или за определенный период времени

на любой высоте над уровнем моря. В Приложении «Б» приведено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

3. Показано, что максимальная энергия солнечной радиации, приходящая на горизонтальную поверхность в Новосибирске, составляет 1345 кВт·ч/м²; на перпендикулярную потоку поверхность – 2685 кВт·ч/м².

4. Максимальная экономия условного топлива в Новосибирске составляет 265/463 кг у.т./кг н.т. на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора в год. Сокращение выбросов СО₂ составляет 381,29 м³ на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора в год; сокращение выбросов золы – 176,35 кг на 1 м².

ГЛАВА 3 РАЗРАБОТКА ГИБРИДНЫХ ГЕЛИОСИСТЕМ

Получение с помощью солнечной энергии электрической энергии, как основного полезного продукта систем тригенерации, возможно как с использованием, так и без применения прямых термодинамических циклов.

К устройствам получения электроэнергии без использования термодинамических циклов относятся такие элементы фотовольтаики, как фотоэлектрические элементы, собранные в солнечные панели и модули, – полупроводниковые устройства, непосредственно преобразующие солнечную энергию в постоянный электрический ток. Электрический КПД современных фотовольтаических солнечных фотоэлементов (Рисунок 1.5, Таблица 2.2) количественно соответствует их эксергетическому КПД. В процессе взаимодействия солнечного излучения с фотоэлектрическими панелями (ФЭП), происходит их нагрев, снижающий эффективность производства электрической энергии.

В гибридных солнечных системах за счет процессов тепловыделения в ФЭП осуществляется высокоэффективная выработка электроэнергии или холода.

3.1 Гибридная система производства электроэнергии на основе солнечной энергии

3.1.1 Определение термических условий работы гибридной системы

В главе 1 было показано, что значительная часть солнечной энергии при взаимодействии с ФЭП преобразуется в тепло, что приводит к ее значительному нагреву. Следствием этого процесса является снижение электрического КПД ФЭП. При нагреве свыше стандартной температуры [21] происходит уменьшение $\eta_{\text{ФЭП}}$ в среднем на 0,2-0,5% на 1 °С.

Влияние температуры на значение выдаваемой мощности солнечного элемента можно оценить из общего выражения:

$$P_{\text{СЭ}} = P_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t) \quad (3.1)$$

где $P_{\text{СЭ}}$ – мощность солнечного элемента, Вт;

P_0 – мощность солнечного элемента при 25 °С, Вт;

β – температурный коэффициент мощности, °С⁻¹;

Δt – изменение температуры, °С.

Согласно лабораторным исследованиям [21], зависимость КПД ФЭП от температуры определяется как:

$$\eta_{\text{ФЭП}} = 17 - \frac{17}{100}(t - 25) \cdot 0,5, \quad (3.2)$$

$$\eta_{\text{ФЭП}} = 17 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (t - 25)), \quad (3.3)$$

где t – температура ФЭП.

В (3.2) и (3.3) за максимальное значение $\eta_{\text{ФЭП}} = 17$ принято стандартизованное для ФЭП значение температуры $t = 25$ °С. В процессе охлаждения отводимое от ФЭП тепло полезно не используется.

Для выработки электроэнергии с использованием известных термодинамических циклов это тепло также малоприспособно по причине низкой температуры. Исключения представляют циклы на низкокипящих рабочих телах (ОЦР – органические циклы Ренкина), обеспечивающие выработку электроэнергии при относительно низких температурах, не доступных для традиционных энергетических циклов на водяном паре.

Выбор рабочих тел для осуществления ОЦР-циклов для целей охлаждения ФЭП до сих пор не производился. Причиной является низкий уровень температур (до 100°С), при которых производится эффективная выработка электроэнергии с помощью ФЭП без потери их работоспособности. Стандартные термические условия работы кремниевых фотоэлементов допускают их охлаждения до -40°С и нагрев в процессе работы до +70 °С, а в ряде случаев до еще более высоких температур. Совмещение двух принципиально различных технологий на основе ФЭП и

ОЦР-циклов в гибридную систему по совместной эффективной выработке электроэнергии является проблематичным. В первую очередь для оптимального решения этой противоречивой дилеммы: увеличения КПД выработки электроэнергии по ОЦР -циклам ($\eta_{\text{ОЦР}}$) с ростом температуры подведенной в цикл теплоты и одновременным при этом снижением КПД при нагреве ФЭП, - необходимо обосновать и осуществить выбор рабочего тела ОЦР-цикла.

3.1.2 Выбор рабочего тела для органического цикла Ренкина

Среди используемых в настоящее время хладагентов природного и искусственного происхождения, а также смесевых хладагентов предпочтение должно быть отдано телам природного происхождения, имеющим низкий уровень влияния на озоновый слой земной атмосферы и глобальное потепление климата. Фреоны, как искусственно созданные вещества, даже не разрушающие озоновый слой Земли, будут запрещены на основании международных соглашений, как оказывающие влияние на глобальное потепление климата. Вода (R718), как широко распространенное в теплоэнергетике рабочее тело, не позволяет эффективно производить работу в цикле Ренкина при температурах подвода тепла в цикл менее 100°C [97-106].

Низкокипящие рабочие тела R-717 (аммиак), R-600a (изобутан) являются широко распространенными веществами, практически не влияющими на озоновый слой и потепление климата, на основе которых могут быть реализованы ОЦР-циклы при температурах менее 100°C . Их основные характеристики представлены в таблице 3.1.

В таблице значения T_0 определяют температуру нормального кипения при давлении насыщенных паров 0,1 МПа.

Использование в рабочем контуре рабочих тел R-717 и особенно R-747 характеризуется большими давлениями, что создает технические трудности. По этой основной причине выбор сделан в пользу использования R600a.

Таблица 3.1 – Характеристики природных хладагентов

Хладагент	Обозначение	Хим. формула	M, кг/моль	T_0 , К	$T_{кр}$, К	$P_{кр}$, МПа
Воздух	R729		28,96	78,57	132,52	3,79
Аммиак	R717	NH ₃	17,03	239,57	405,4	11,39
Диоксид углерода	R744	CO ₂	44,01	194,75	304,13	7,377
Этан	R170	C ₂ H ₆	30,07	184,31	305,13	4,872
Пропан	R290	C ₃ H ₈	44,1	230,77	305,33	4,248
Изобутан	R600a	C ₄ H ₁₀	58,12	261,21	369,85	3,640
Н-бутан	R290	C ₄ H ₁₀	58,12	272,21	407,85	3,796
Циклопропан	RC270	C ₃ H ₆	42,08	197,15	397,80	5,495
Циклопентан		C ₅ H ₁₀	70,13	322,15	511,70	4,508
Пропилен	R1270	C ₃ H ₆	42,08	225,17	364,90	4,613

Цикл с использованием изобутана (R600a) в качестве рабочего тела ОЦР-цикла имеет ряд преимуществ по сравнению с пароводяным циклом: экономичность турбины, низкая цена, отсутствие влажности на последних ступенях турбины, отсутствие коррозии.

Термодинамические и теплофизические свойства природного хладагента R-600a позволяют осуществлять реализацию теплосилового органического цикла Ренкина на теплоте охлаждения большинства ФЭП в пределах температурного диапазона их устойчивой работы и низких давлениях в рабочем контуре энергоустановки.

3.1.3 Выбор теплообменников для гибридных солнечных энергоустановок

Инновационные мини - и микроканальные теплообменники (Рисунки 3.1. и 3.2) представляют собой малоразмерные высокоэффективные

аппараты, в которых теплообмен и конденсация реализуются в каналах размером менее 1 мм.

Микроканальные теплообменники могут использоваться для многих применений, включая высокопроизводительные авиационные газотурбинные двигатели; холодильные машины и тепловые насосы; системы охлаждения микропроцессоров.

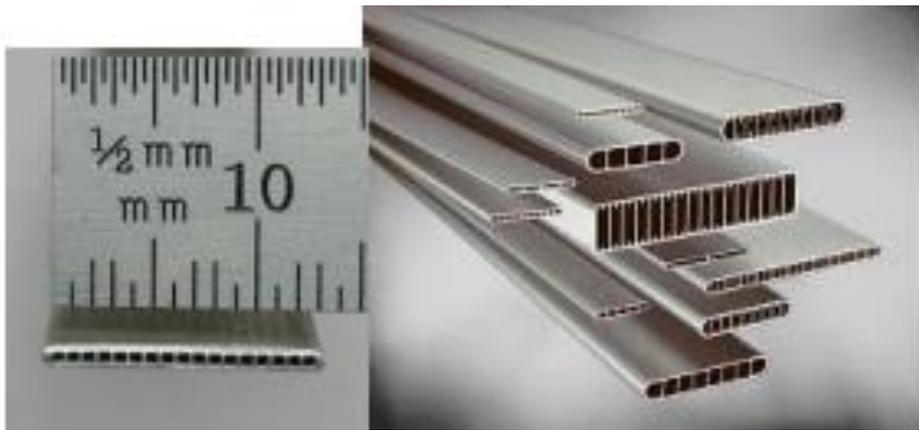


Рисунок. 3.1 – Плоский элемент микроканального теплообменника из литейвого алюминиевого сплава

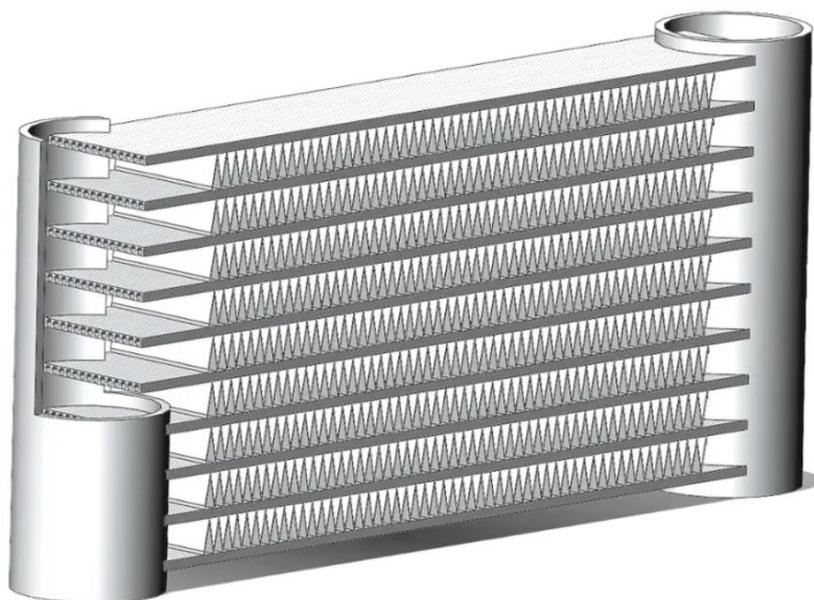


Рисунок 3.2 – Микроканальный воздушный теплообменник

В микроканальных аппаратах коэффициент теплоотдачи можно определить по формуле [107-109]:

$$\alpha = Nu \cdot \frac{\lambda}{d}, \quad (3.4)$$

где Nu – число Нуссельта;

λ – теплопроводность среды;

d – эквивалентный диаметр проходного канала.

На основании (3.4) можно утверждать, что коэффициент теплоотдачи α увеличивается с уменьшением диаметра канала. С учетом малого размера стенок канала (см. рисунок 3.1) и их высокой теплопроводности следует ожидать существенного увеличения значений коэффициента теплопередачи k при охлаждении ФЭП:

$$Q = k \cdot F \cdot \Delta t. \quad (3.5)$$

где, F – площадь теплообменной поверхности;

Δt – температурный напор.

При плотном термическом контакте фотоэлементов на плоской поверхности микроканального теплообменника разность температуры Δt в таких аппаратах будет незначительной, что позволяет в первом приближении в расчетах принять равными значения температур ФЭП и рабочего тела в изобарно-изотермическом процессе охлаждения с помощью низкокипящего рабочего тела.

Таким образом, микроканальный теплообменник выбран для применения в гибридных солнечных установках, как теплообменник, обладающий минимальными эксергетическими потерями.

3.2 Схема гибридного производства электроэнергии

Принципиальная схема гибридного производства электроэнергии фототермодинамической энергоустановкой и рабочий ОЦР -цикл по выработке электроэнергии представлены на рисунках 3.3 и 3.4 соответственно.

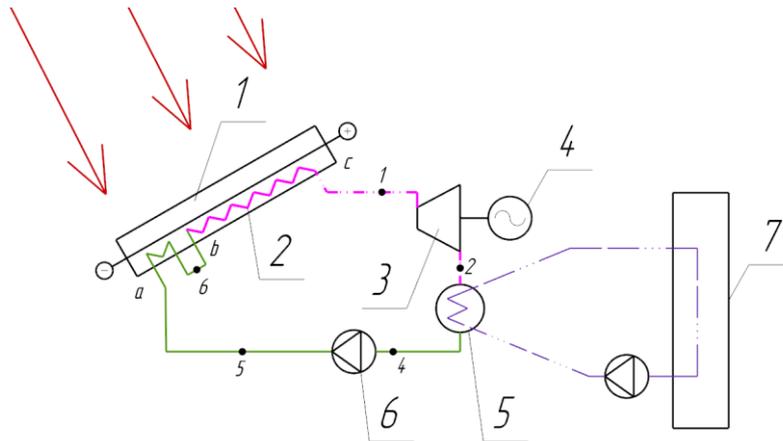


Рисунок 3.3 – Принципиальная схема гибридной солнечной энергоустановки:

- 1 – солнечная фотоэлектрическая панель; 2 – охлаждающее устройство солнечной панели (испаритель): микроканальный теплообменник;
- 3 – паросиловое расширительное устройство(турбина);
- 4 – электрогенератор; 5 – конденсатор; 6 – насос; 7 – охладитель воды;

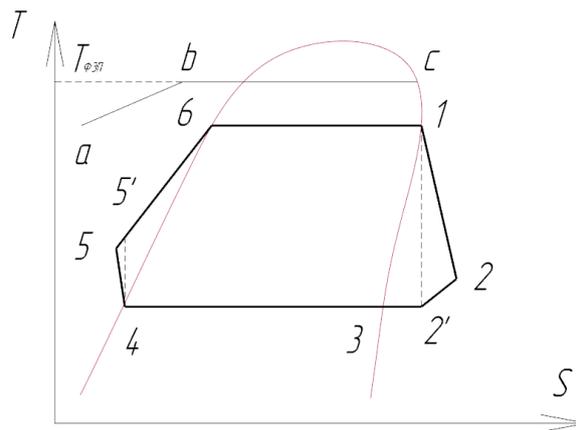


Рисунок 3.4 – Рабочий цикл утилизации теплоты охлаждения ФЭП (расположение узловых точек цикла на диаграмме соответствует их местоположению на рисунке 3.1); а-в-с – процессы, соответствующие температуре ФЭП

Предлагаемая гибридная солнечная энергоустановка позволяет повысить общую эффективность выработки электроэнергии за счет одновременного ее производства в ФЭП и теплосиловом ОЦР-цикле.

Принцип работы гибридной энергоустановки заключается в следующем (Рисунки 3.3 и 3.4): фотоэлектрическая панель 1 при воздействии на нее солнечного излучения осуществляет выработку постоянного электрического тока. При этом происходит ее нагрев. Это приводит к снижению КПД выработки электроэнергии. Для охлаждения солнечной фотоэлектрической панели на ее обратной стороне с хорошим термическим контактом закреплен по всей поверхности плоский миниканальный теплообменник 2, по каналам которого движется низкокипящее рабочее тело, к которому отводится тепло нагрева от ФЭП. Низкокипящее рабочее тело в жидком состоянии подается в охлаждающее устройство 2 насосом б (процесс 4-5 на рисунке 3.4).

Отвод тепла обеспечивает охлаждение ФЭП, создавая условия для максимально возможной выработки электроэнергии. При этом тепло, отводимое от ФЭП, сначала осуществляет нагрев рабочего тела до температуры кипения (процесс 5-6 на рисунке 3.4), а расходуется при постоянной температуре на получение его пара (процесс 6-1 на рисунке 3.4). Рабочее тело в состоянии насыщенного пара пара поступает на вход паросилового устройства 3 (турбину). Расширение в турбине с понижением температуры и давления (процесс 1-2) сопровождается выработкой работы, которая в конечном итоге позволяет выработать с помощью генератора 4 электрической энергии.

На завершающей стадии пар поступает в конденсатор 5, где происходит его конденсация (процесс 2-4). При этом теплота этих процессов передается окружающей среде. Цикл замыкается подачей конденсата насосом б в плоский миниканальный теплообменник.

3.3 Расчет органического цикла Ренкина в составе гибридной солнечной энергоустановки

Для расчета используется термодинамический цикл, представленный на рисунке 3.4, с узловыми точками, также схематично обозначенными на рисунке 3.3 [109-110].

Исходные данные:

$\eta_{oi} = 0,86$ – внутренний КПД парорасширительного устройства (турбины);

$\eta_H = 0,70$ – КПД питательного насоса хладагента R-600a;

$\eta_{ЭМ} = 0,97$ – электромеханический КПД электрогенератора переменного тока;

$T_{ФЭП}$ – температура фотоэлектрической панели;

$\Delta T_{И} = T_{ФЭП} - T_{И}$ – температурный перепад в охладителе-испарителе;

$\Delta T_{К} = T_{К} - T_{W2}$ – температурный перепад в конденсаторе.

T_{W2} – температура охлаждающей среды на выходе из конденсатора.

Теплообменник-охладитель ФЭП выполнен на основе миниканальных структур, что обеспечивает высокие коэффициенты теплоотдачи в каналах и высокие коэффициенты теплопередачи. Предполагается, что элементы ФЭП крепятся с хорошим термическим контактом непосредственно на плоскую поверхность миниканального теплообменного аппарата, по каналам которого движется хладагент R-600a. С учетом этого принимается $\Delta T_{И} = 1,0$ °С. Тогда $T_{И} = T_{ФЭП} - \Delta T_{И} = T_{ФЭП} - 1,0$ °С.

Для работы конденсатора используется вода с теплообменными аппаратами пластинчатого типа. Принимается в качестве расчетного значения $\Delta T_{К} = 3,0$ °С, а для температуры воды на входе в конденсатор $T_{W1} = 0,0$ °С, Тогда постоянное значение $\Delta T_{К} = 6,0$ °С для всех дальнейших расчетов.

Значения параметров в узловых точках рабочего цикла находим, используя инженерную программу CoolPack для хладагентов природного и искусственного происхождения.

В Приложении «А» представлены значения термодинамических параметров для различных температур ФЭП.

Алгоритм расчета:

$$\Delta h(S = const) = h_1 - h_2'. \quad (3.6)$$

$$\Delta h = \Delta h(S = const) \cdot \eta_{oi}. \quad (3.7)$$

$$h_2 = h_1 - \Delta h. \quad (3.8)$$

$$h_5 = h_4 + \frac{P_{II} - P_K}{\eta_H \cdot \rho}. \quad (3.9)$$

$$h_5' = h_4 - \frac{P_{II} - P_K}{\rho}. \quad (3.10)$$

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{(h_1 - h_6) + (h_6 - h_5)}. \quad (3.11)$$

$$h_t(\eta_H = 1,0; \eta_{oi} = 1,0) = \frac{h_1 - h_2'}{(h_1 - h_6) + (h_6 - h_5')}. \quad (3.12)$$

Расчет выполнен для определения степени технического совершенства основного оборудования паросиловой установки.

В таблице 3.2 приведены результаты определения зависимости термического КПД рабочего цикла от температуры при охлаждении конденсатора водой с предельно низкой температурой.

В таблице 3.3 приведен расчет зависимости КПД ОЦР от температуры при воздушном охлаждении конденсатора при температуре окружающего воздуха 30°C.

Таблица 3.2 – Зависимость термического КПД от температуры ФЭП (охлаждение водой)

Температура ФЭП, °С	η_t , %
21	4
31	6,5
41	8,3
51	10,48
71	14,37
91	17,54
100	18,86

Таблица 3.3 – Зависимость КПД ОЦР от температуры при воздушном охлаждении конденсатора.

Температура ФЭП, °С	η_t , %
41	2,73
51	5,16
71	9,15
91	12,69

Можно видеть, что выработка электроэнергии на основе теплоты охлаждения в пределах термического диапазона устойчивой работы ФЭП имеют в пределах рекомендованного производителями ФЭП термического диапазона работы солнечных фотоэлементов (до +70°С) позволяет увеличить общую эффективность гибридной энергоустановки.

3.4 Расчетные показатели эффективности гибридной энергоустановки

В таблице 3.4 приведена зависимость КПД солнечной панели от температуры по формуле (3.2). В таблице 3.4 приведена зависимость КПД солнечной фотоэлектрической панели от температуры по формуле (3.3). Значения, приведенные в этих таблицах также количественно соответствуют эксергетическим КПД (η_{ex}) производства электроэнергии на основе ФЭП.

Таблица 3.4 – Зависимость эксергетического КПД от температуры по формуле (3.2)

Температура, °С	η_{ex} , %
25	17
50	14,875

Таблица 3.5 – Зависимость эксергетического КПД от температуры по формуле (3.3)

Температура, °С	η_{ex} , %
25	17
50	15,0875

На рисунке 3.5 представлены отдельно графики зависимостей КПД ФЭП и термический КПД органического цикла Ренкина.

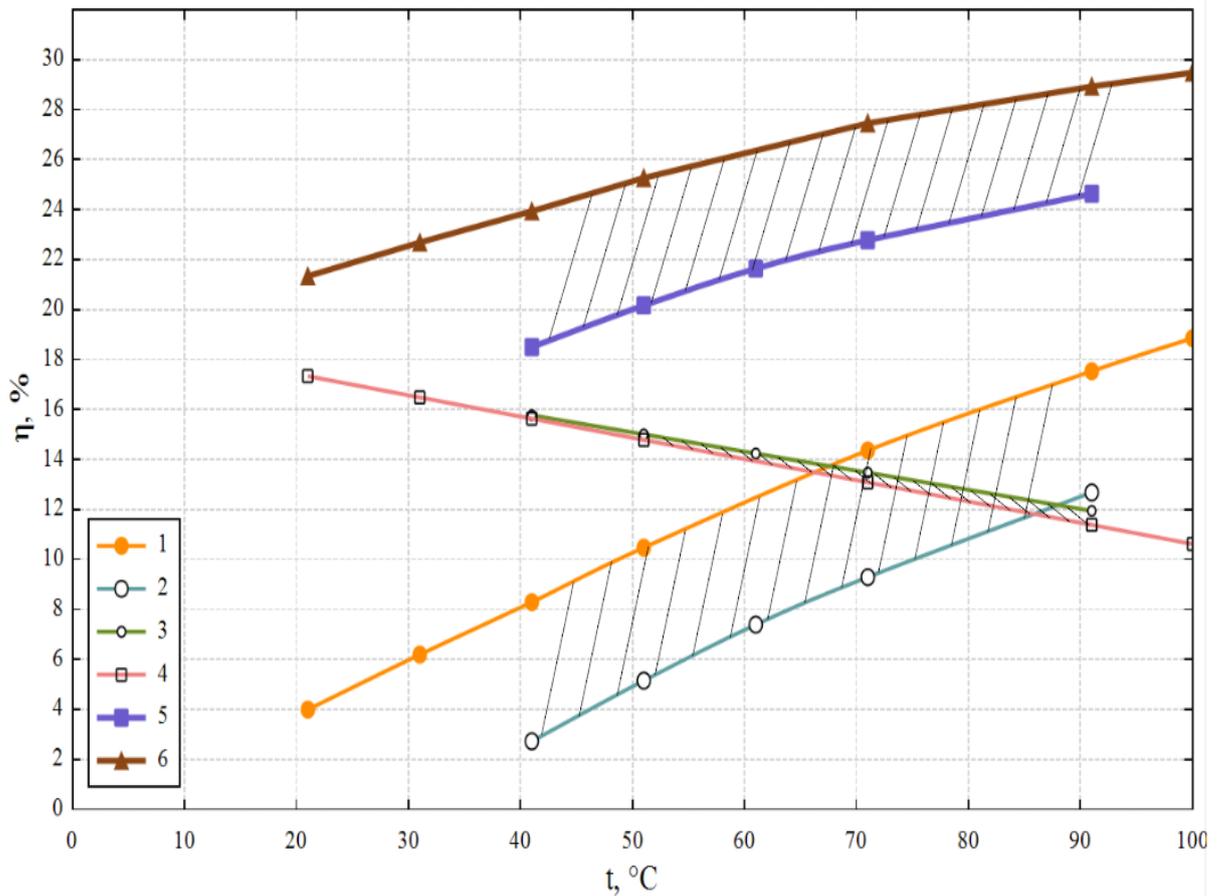


Рисунок 3.5 – Показатели эффективности комбинированной системы производства электроэнергии на основе фотовольтаики и органического цикла Ренкина:

- 1 – $\eta_{\text{ОЦР}}$ (охлаждение конденсатора водой);
- 2 – $\eta_{\text{ОЦР}}$ (воздушное охлаждение);
- 3 – $\eta_{\text{ФЭП}}$ согласно зависимости $\eta(t) = 17 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (t - 25))$;
- 4 – $\eta_{\text{ФЭП}}$ согласно зависимости $\eta(t) = 17 - 0,085 \cdot (t - 25)$;
- 5 – сумма графиков 2 и 4;
- 6 – сумма графиков 1 и 3.

Наглядное представление о работе гибридной солнечной энергоустановки дает сквозная диаграмма Грассмана, представленная на

рисунке 3.6. с учетом потерь разнородных по физической природе потоков энергии от входа в атмосферу, до получения в технической системе конечного полезного продукта – электроэнергии.

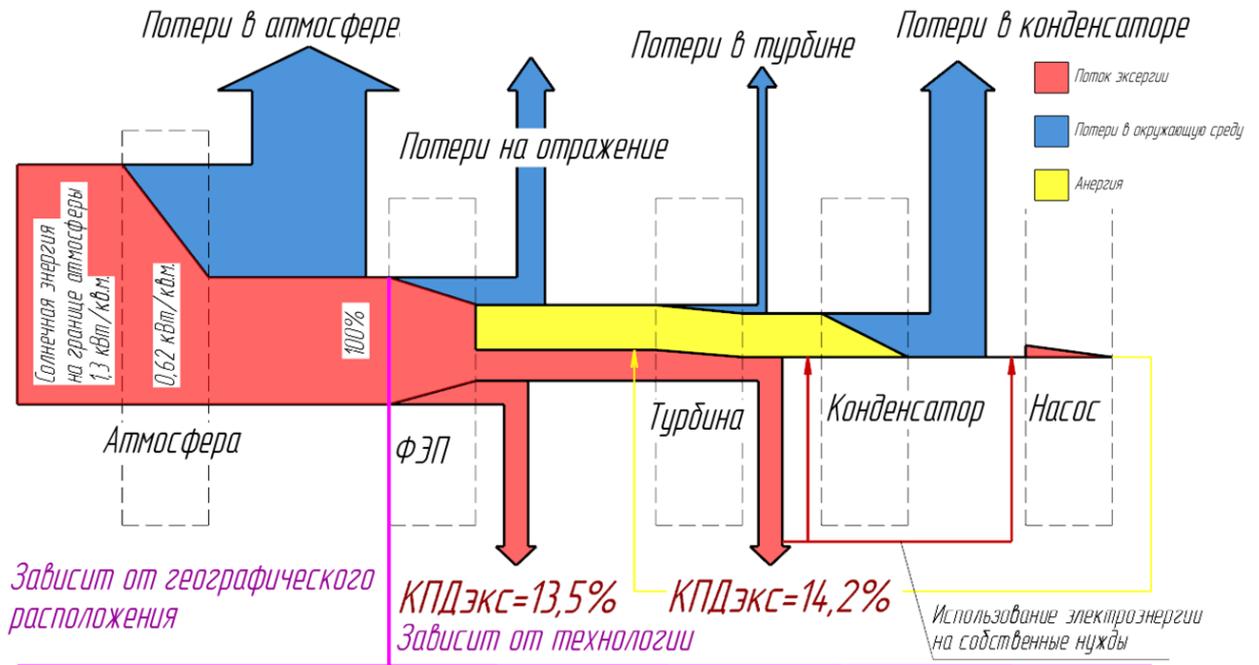


Рисунок 3.6 – Эксергетическая диаграмма Грассмана для гибридной системы получения электроэнергии на основе комбинирования ФЭП и ОЦР-цикла

Температура $t_{\text{ФЭП}} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ является предельной для рекомендованного диапазона устойчивой работы ФЭП. При этой температуре возможно увеличение эффективности работы ОЦР-цикла до $\eta_{\text{ОЦР}} = 14\%$, и снижение эффективности выработки электроэнергии с помощью ФЭП до $\eta_{\text{ФЭП}} = 13\%$. При суммировании этих показателей можно рассчитывать на максимальное значение КПД гибридной энергоустановки на уровне 27%.

Выводы по главе 3

Предложена комбинированная система производства электроэнергии на основе принципов фотовольтаики и органического цикла Ренкина с миниканальными теплообменниками, так как они обладают минимальными эксергетическими потерями. При температуре ФЭП $70 \text{ }^\circ\text{C}$ максимальный

суммарный КПД комбинированной системы производства электроэнергии составляет 27,7%. То есть, использование ТГСК может привести к увеличению КПД ФЭП в два раза.

ГЛАВА 4 ПОЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ И ХОЛОДА ОТ СОЛНЧЕНОЙ ЭНЕРГИИ

Эффективность работы входных элементов технических систем, взаимодействующих на начальном этапе с потоком солнечного излучения: тепловых солнечных коллекторов и фотоэлектрических панелей, - во многом определяет возможности дальнейшего преобразования потоков энергии, архитектуру построения систем тригенерации, а также качество и количество производимых полезных продуктов. Их основные схемы и технические особенности в теоретическом плане были рассмотрены в предыдущих главах. Вопросы практической эксплуатации и поиска направлений совершенствования солнечных коллекторов с учетом их географического месторасположения с использованием эксергетического метода являются логическим продолжением исследования [111-124].

4.1 Экспериментальные исследования вакуумного солнечного коллектора

4.1.1 Экспериментальная установка и методика исследования

Для апробации эффективности технологий солнечной энергетики в Новосибирском государственном техническом университете создан учебно-научный стенд (Рисунок 4.1 и 4.2) на основе передового теплотехнического оборудования фирмы Viessmann (Германия), позволяющий выполнять исследовательские работы по изучению эффективности оборудования солнечной энергетики в условиях солнечной инсоляции юга Сибири.

В вакуумном солнечном коллекторе марки Vitosol 300-ТМ с эффективной площадью $1,51 \text{ м}^2$ (Рисунок 4.2, а) под воздействием солнечного излучения осуществляется нагрев незамерзающего теплоносителя марки Tufosol. Теплоноситель за счет принудительной циркуляции обеспечивает нагрев воды в теплоизолированном баке Vitocell

360-SVSB многофункционального назначения объемом 950 литров (Рисунок 4.1 а), к которому наряду с тепловым солнечным коллектором подключены стандартные потребители тепла: система «теплый пол» и два конвектора для отопления помещения (Рисунок 4.1, б).

Вакуумный солнечный коллектор смонтирован (Рисунок 4.2, а, б) под углом 15° к наружной стене учебного корпуса и ориентирован на юго-восток. Система «Вакуумный солнечный коллектор + бак-накопитель горячей воды + «теплый пол» + отопительные батареи» является имитатором экологически чистых систем теплоснабжения на основе инсоляции, типичной для южных регионов Сибири.



а

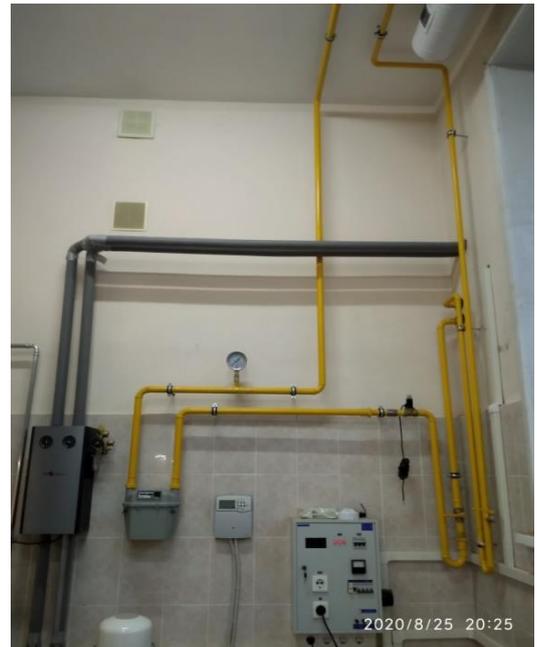


б

Рисунок 4.1 – Общие виды лаборатории: (а) экспериментальный стенд (справа газовые котлы, в центре бак-накопитель горячей воды);
(б) системы «теплый пол» и батареи отопления



а



б

Рисунок 4.2 – Вакуумный солнечный коллектор:

(*а*) вид с улицы; (*б*) размещение элементов в помещении лаборатории

Проектирование системы ТСК производилось с участием автора настоящей работы. На стенде были проведены эксперименты по определению реальных показателей солнечной инсоляции элементами системы тригенерации с использованием вышеперечисленного теплотехнического оборудования.

Эксперимент проводился с 1 июня 2021 г. по 31 мая 2022 г. Проектирование и монтаж установки соответствует действующим стандартам [123, 124].

4.1.2 Анализ полученных результатов на основе эксергетического метода

На рисунке 4.3 приведены результаты по нагреву воды в баке-накопителе. Приведены показатели средних температур днем и ночью, среднесуточная температура по месяцам, солнечная радиация по месяцам.

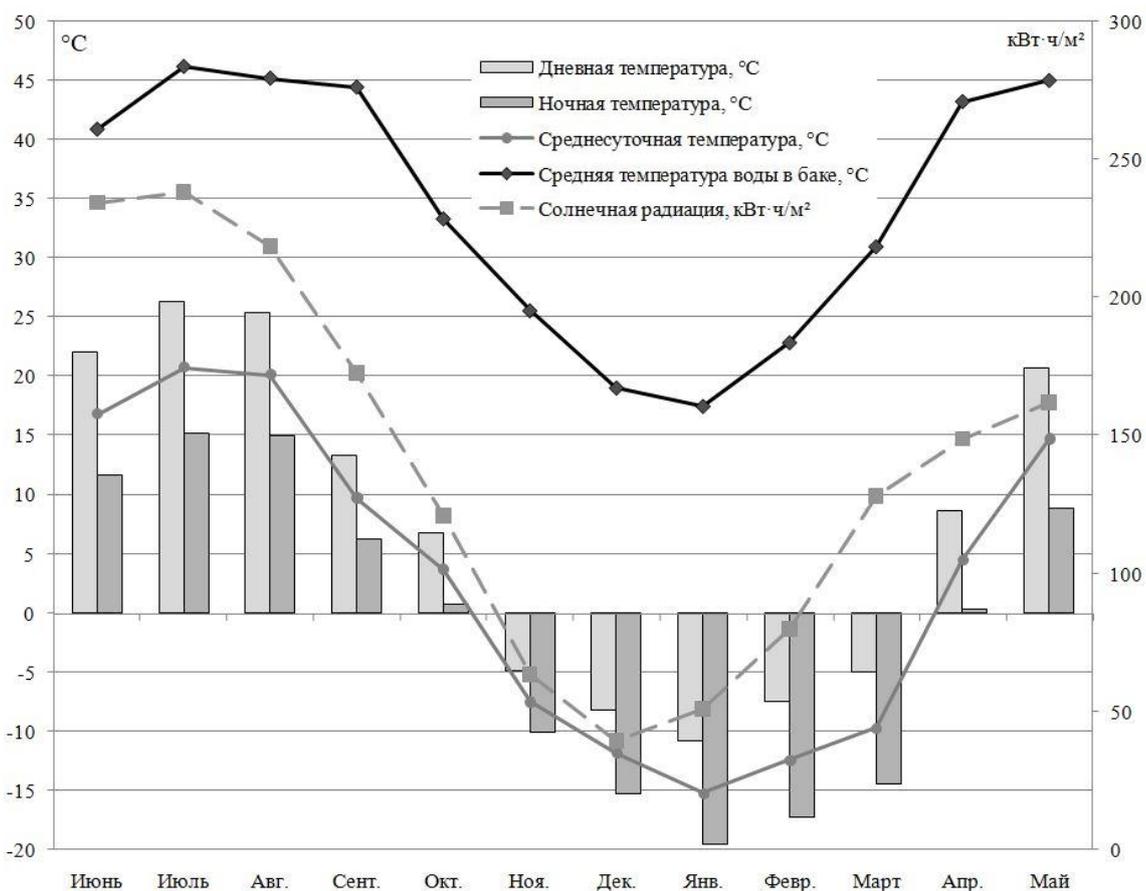


Рисунок 4.3 – Результаты нагрева воды в баке

Максимум солнечной радиации на 1 м^2 поверхности солнечного коллектора приходится на июнь, однако температура в баке-аккумуляторе в июле, августе и сентябре выше, чем в июне. Это объясняется наличием низко расположенного снегозащитного козырька над солнечным коллектором, затеняющего рабочую поверхность вакуумного солнечного коллектора. Он перекрывает до 30% проходящего на него потока солнечной радиации. В июле, августе и сентябре угол подъема Солнца над горизонтом становится ниже, чем в июне, и тень от козырька закрывает меньшую площадь солнечного коллектора, а количество солнечной радиации при этом достаточно для того, чтобы нагреть воду в баке до более высоких температур, чем в июне.

Проведена оценка эксергетической эффективности системы солнечного отопления.

В таблице 4.1 представлены результаты расчета. За среднюю температуру воды в баке $t_{\text{воды}}$ принята среднемесячная температура воды в баке-аккумуляторе по результатам годовых измерений. За температуру окружающей среды $t_{\text{помещ.}}$ принята среднемесячная температура в помещении, в котором установлен бак-аккумулятор.

Суммарная солнечная радиация в г. Новосибирске на горизонтальную поверхность за месяц при средних условиях облачности Q взята из [12]. Пересчет суммарной радиации в г. Новосибирске на горизонтальную поверхность за месяц при средних условиях облачности в суммарную месячную радиацию $Q_{\text{кол}}$ на реальный коллектор, установленный в НГТУ, с наклоном 15° и ориентацией на юго-восток, то есть, с азимутом 135° проведен по разработанной автором модели, представленной в главе 2.

Среднемесячная температура теплоносителя $t_{\text{тепл}}$ – средняя дневная температура теплоносителя в системе (насос начинает прокачивать теплоноситель через бак-аккумулятор, когда разница температуры воды и теплоносителя составляет 8°C и прекращает, если разница составляет 4°C). $t_{\text{ср.мес}}$ – среднемесячная дневная температура на улице.

В таблице 4.2 представлены расчетные данные по оценке эксергии системы солнечного теплоснабжения по месяцам и ее годовой показатель.

Эксергия на входе и на выходе из системы солнечного отопления рассчитана по формулам:

$$Ex_{\text{вход}} = Q_{\text{кол}} \cdot \left(1 - \frac{t_{\text{ср.мес.}} + 273}{t_{\text{тепл.}} + 273} \right). \quad (4.1)$$

$$Ex_{\text{выход}} = Q_{\text{бак}} \cdot \left(1 - \frac{t_{\text{воды}} + 273}{t_{\text{помещ.}} + 273} \right). \quad (4.2)$$

Аккумулированная в баке тепловая энергия, определена по формуле:

$$Q_{\text{бак}} = C \cdot m \cdot t_{\text{воды}}, \quad (4.3)$$

где $C = 4,2$ кДж/(кг·°С); $m = 950$ кг – масса воды в баке-аккумуляторе.

Таблица 4.1 – Результаты эксперимента

Месяц	$t_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	$t_{\text{помещ}}, ^\circ\text{C}$	Q , кВт·ч/м ²	$Q_{\text{кол}}$, кВт·ч/м ²	$t_{\text{тепл}}$	$t_{\text{ср.мес}}$	$Q_{\text{бак}}$, кВт·ч
Июнь	40,88	22	179,16	122,03	93,43	22	45,34
Июль	46,18	22	181,94	130,76	97,42	26,32	51,22
Август	45,18	21	138,88	122,65	85,43	25,32	50,11
Сентябрь	44,42	21	92,77	111,62	84,78	13,26	49,27
Октябрь	33,29	20	47,22	83,50	62,38	6,68	36,92
Ноябрь	25,52	19	25,27	71,34	35,72	-4,9	28,30
Декабрь	19,04	19	17,52	70,13	30,64	-8,29	21,12
Январь	17,43	17	24,72	81,04	27,37	-10,81	19,33
Февраль	22,81	19	48,61	101,81	31,84	-7,54	25,31
Март	30,93	20	100,27	138,15	42,45	-5	34,31
Апрель	43,22	20	132,22	129,41	62,22	8,63	47,94
Май	44,97	21	167,53	128,41	84,67	20,65	49,88
			Итого: 1156,11	Итого: 1290,9			Итого: 459,07

По результатам годового эксперимента построена эксергетическая диаграмма Грассмана для августа месяца (Таблица 4.2 и Рисунок 4.4).

Ее особенностью является определение потерь эксергии на всем протяжении преобразования потока солнечной радиации от внешней границы земной атмосферы до отпуска конечных целевых продуктов потребителям.

Полученные результаты отражают типичную картину работы для закрепленного неподвижно на стене вакуумного солнечного коллектора, который работает в неоптимальных условиях.

Таблица 4.2 – Расчет эксергетического КПД системы солнечного отопления в г. Новосибирске

Месяц	$E_{x\text{вход}}$, кВт·ч	$E_{x\text{выход}}$, кВт·ч	η_{ex}
Июнь	35,92	2,72	0,075
Июль	37,89	3,88	0,102
Август	31,06	3,81	0,122
Сентябрь	33,69	3,63	0,107
Октябрь	20,94	1,61	0,076
Ноябрь	14,17	0,61	0,043
Декабрь	13,57	0,003	0,000213
Январь	15,55	0,028	0,00184
Февраль	19,85	0,32	0,0164
Март	31,37	1,23	0,0393
Апрель	31,23	3,52	0,1126
Май	34,71	3,76	0,1083
Итого	320,01	25,14	

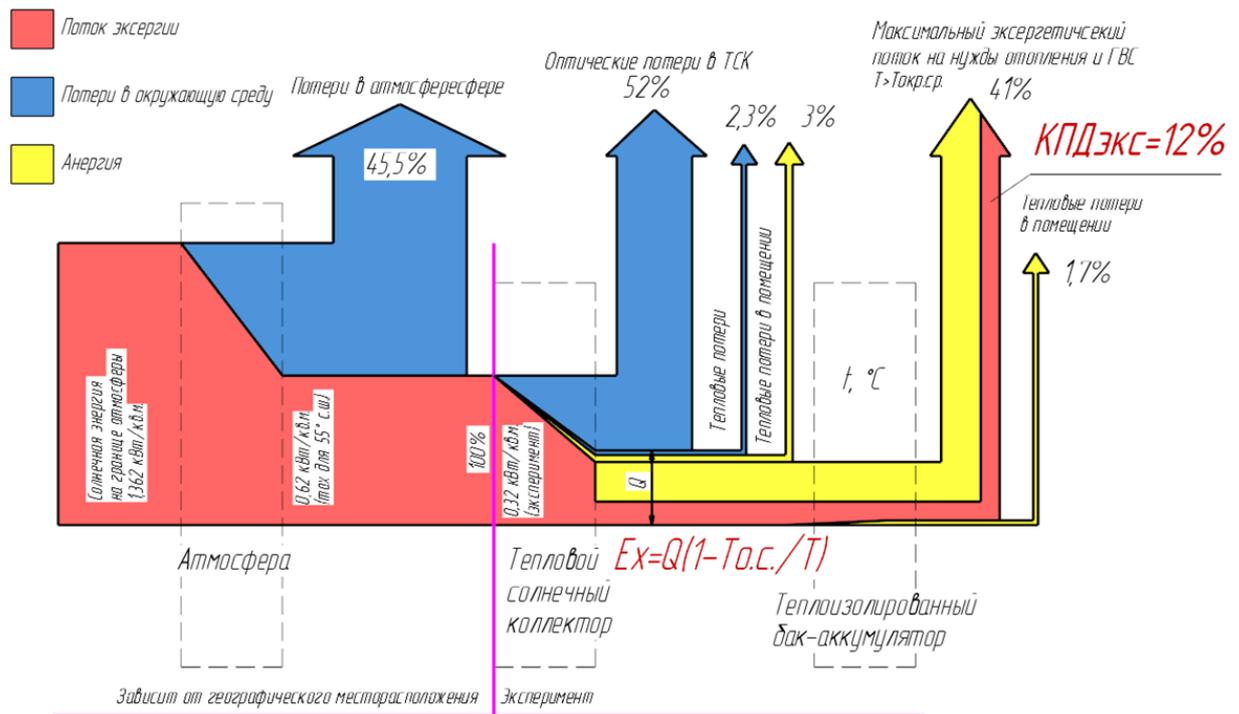


Рисунок 4.4 – Эксергетическая диаграмма Грассмана, построенная по результатам годового эксперимента на вакуумном солнечном коллекторе

Можно видеть (Рисунок 4.4), что только 41% от приходящей на солнечный коллектор солнечной инсоляции в условиях юга Сибири может

быть полезно использован на нужды теплоснабжения. Также отмечен большой уровень оптических потерь в ТСК (52%) вследствие пространственного расположения коллектора и его затенения.

Для повышения эффективности его работы предлагается:

1. Организовать слежение за Солнцем под углом 90 градусов по отношению к падающим лучам.
2. Устранить затенение поверхности коллектора.
3. Увеличить размеры поверхности солнечного коллектора, включив в его конструкцию элементы концентрирования солнечной энергии.

Проектные решения и результаты экспериментального исследования были использованы в лекционном курсе по дисциплине «Энергосбережение в теплоэнергетике и теплотехнологиях» и при проведении автором практических занятий по этой дисциплине (Акт о внедрении представлен в Приложении Е).

4.2 Плоский солнечный коллектор (авторская разработка)

4.2.1 Общая характеристика

В процессе исследования автором настоящей работы разработана тепловоспринимающая поверхность, на основе которой собран плоский солнечный коллектор.

Разработка поддержана Фондом содействия инновациям, договор № 429ГССС15-L/78786 от 08.09.2022; договор № 0090997 от 06.12.2023.

В Приложениях «Б» и «В» приведен патент на изобретение и свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

На рисунке 4.5 приведена 3D модель плоского солнечного коллектора с такой поверхностью. На рисунке 4.6 представлен скан сборочного чертежа.

Акты о внедрении результатов работ представлены в Приложениях Г (от Академпарка) и Д (от Платформы университетского технологического предпринимательства).

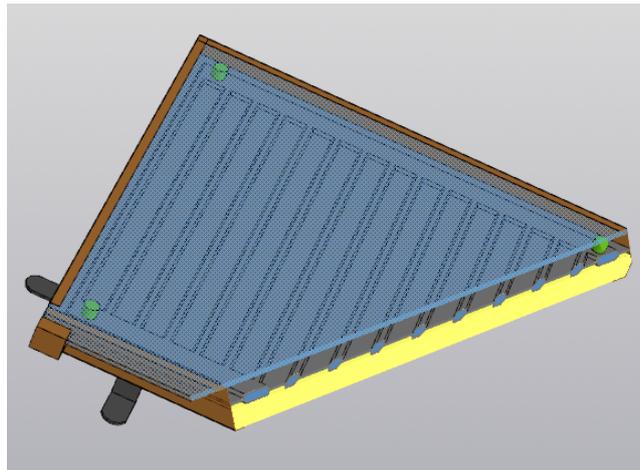


Рисунок 4.5 – 3D модель плоского солнечного коллектора с разработанной автором поверхностью теплообмена

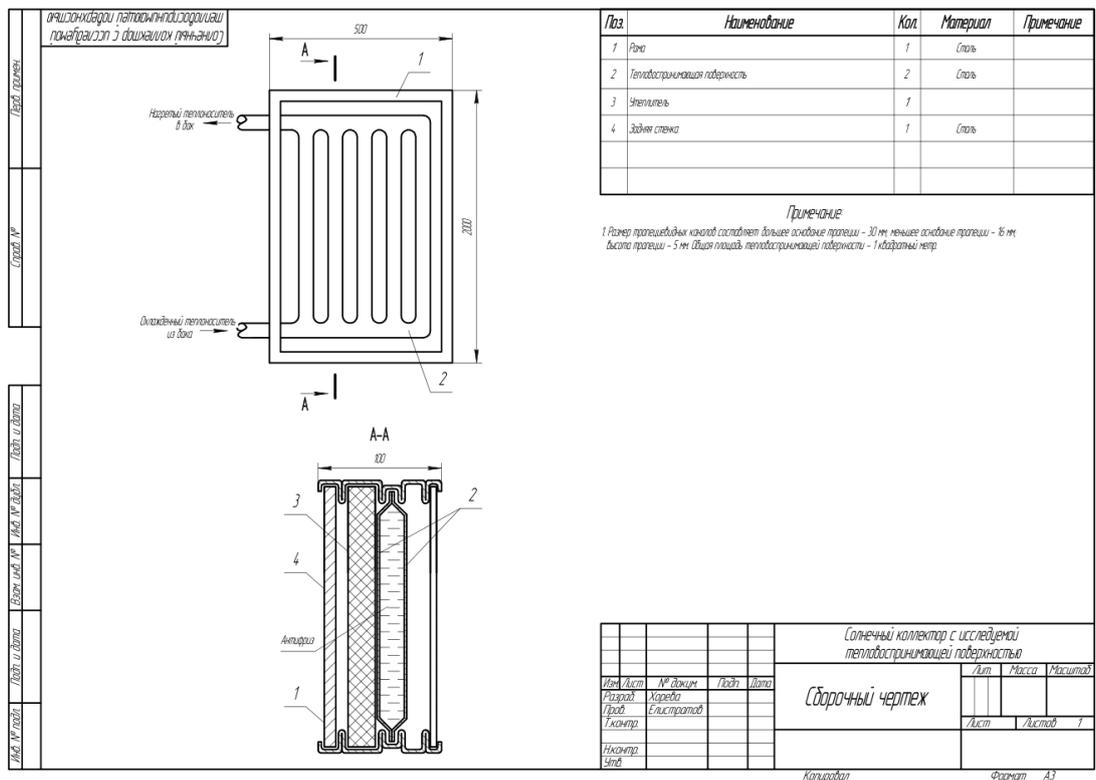


Рисунок 4.6 – Сборочный чертёж плоского солнечного коллектора с запатентованной поверхностью для поглощения солнечного излучения

Результаты разработки были представлены на выставке «Технопром», Новосибирск, 22-25 августа 2023 г. (Рисунок 4.7).



Рисунок 4.7 – Опытный образец плоского солнечного коллектора на выставке «Технопром», г. Новосибирск, 22-25 августа 2023 г

4.2.2 Характеристика новизны

1. В существующих технологиях изготовления солнечных коллекторов теплота передается от тепловоспринимающей поверхности к теплоносителю, текущему в трубках. Трубки с теплоносителем соединены с тепловоспринимающей поверхностью паяным соединением. Теплопроводность паяных соединений в значительной степени определяется теплопроводностью припоя. Конструкция предлагаемой высокоэффективной тепловоспринимающей поверхности состоит из двух штампованных пластин, соединенных контактной сваркой. В каждой пластине штамповкой изготовлены трапециевидные каналы для теплоносителя. Таким образом, конструкция обеспечивает отсутствие паяного соединения между тепловоспринимающей поверхностью и трубками с теплоносителем, что повышает теплообмен и, соответственно, эффективность всей конструкции.

2. Штампованные каналы для теплоносителя в форме трапеции с рассчитанным соотношением сторон (пропорции трапециевидных каналов: большее основание трапеции:меньшее основание трапеции:высота трапеции – 6:3,2:1) обеспечивают свободное тепловое расширение и сжатие металла

тепловоспринимающей поверхности, что значительно уменьшает усталостные напряжения в конструкции и повышает запас прочности.

3. Спектральная плотность излучения тела зависит только от температуры данного тела. Повышая (согласно пункту 1) эффективность теплопередачи от тепловоспринимающей поверхности к теплоносителю и ускоряя ее, можно снизить температуру тепловоспринимающей поверхности, что, в свою очередь, уменьшает излучение как тепловоспринимающей поверхности, так и всей системы греющей солнечной черепицы, что повышает эффективность всей системы.

Все научные результаты экспериментально получены дважды: на созданном лабораторном стенде, имитирующем реальное солнечное освещение и при испытании прототипа изделия в реальных полевых условиях. На лабораторном стенде проведены сравнительные испытания с ведением протокола существующей и предлагаемой технологии изготовления тепловоспринимающей поверхности солнечных коллекторов.

4.2.3 Методика эксперимента и результаты

На собранном солнечном коллекторе с июня 2023 г. проводятся эксперименты при следующих условиях:

1.1 Общая площадь исследуемой тепловоспринимающей поверхности: – 1,0 м².

1.2 Размер трапециевидных каналов тепловоспринимающей поверхности составляет: большее основание трапеции – 30 мм; меньшее основание трапеции – 16 мм; высота трапеции – 5 мм.

1.3 Испытания в полевых условиях проводятся с июля 2023 года (Новосибирская область, Барышевский сельсовет, СНТ «Нива»).

1.4 Объем нагреваемого теплоизолированного бака: 70 литров. Бак ежедневно заполняется водой с температурой +5 градусов Цельсия (аналог температуры воды из артезианской скважины).

1.5 Тепловоспринимающая поверхность ориентирована на юг и наклонена под углом 55 градусов.

1.6 Нагрев начинается ежедневно с восходом Солнца и завершается с его закатом.

1.7 Для повышения точности измерений и исключения теплотерь, итоговые данные температуры в баке записываются автоматически во время заката Солнца.

В таблице 4.6 приведена среднемесячная температура нагрева бака в течение июля, августа, сентября и октября 2023 года при ясном небе (облачность не более 2 баллов при диске Солнца и околосолнечной зоне 5 градусов свободной от облаков и следов облаков).

В таблице 4.3 и 4.4 приведены средние температуры нагрева бака в течение июля, августа, сентября и октября 2023 года.

Таблица 4.3 – Среднемесячная температура нагрева бака при ясном небе в течение июля, августа, сентября и октября 2023 года

	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Температура в баке, °С	94	92	76	53

Таблица 4.4 – Средняя температура нагрева бака солнечным коллектором с исследуемой тепловоспринимающей поверхностью в течение июля, августа, сентября и октября 2023 года

	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь
Температура в баке, °С	78	72	52	41

Себестоимость единицы тепловой энергии на авторском плоском коллекторе, руб/Гкал.

$$C_{\text{э}} = \frac{C_{\text{уcm}}}{Q \cdot t} = 6540 \text{ руб./Гкал}, \quad (4.4)$$

где $C_{уст}$ – стоимость сборки исследуемой установки, руб.; Q – суммарная годовая энергия, накопленная в баке, Гкал; t – срок службы солнечного коллектора.

Себестоимость кВт·ч эксергии на данной установке составляет 46,6 руб.

Полученная себестоимость тепловой энергии от авторского плоского солнечного коллектора сопоставима с ценой от центрального теплоснабжения для ряда территорий (Камчатский край, Еврейская автономная область, Республика Алтай), что говорит об эффективности и коммерческой перспективности технологии, кроме того, технология пригодна к использованию при отсутствии других источников теплоснабжения [125-133].

4.3 Оценка эксергии веществ и материалов

Составными элементами плоского солнечного коллектора являются:

- стекло (химическая формула реакции получения стекла выглядит следующим образом: $6\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} = \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6 \text{SiO}_2$);
- сталь Fe+C, где содержание углерода до 2,14%;
- пропиленгликоль ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$).

Основным составным элементом фотовольтаических солнечных панелей является кремний.

Составными элементами вакуумного солнечного коллектора являются:

- стекло (химическая формула реакции получения стекла выглядит следующим образом: $6\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} = \text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6 \text{SiO}_2$);
- сталь (Fe+C, где содержание углерода до 2,14%);
- пропиленгликоль ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$);

АБХМ :

- Абсорбент – LiBr;
- Хладагент – вода.

В таблице 4.5 приведена химическая эксергия веществ, используемых в технологиях получения тепла, холода и электроэнергии от Солнца. Отметим, что данные вещества не являются опасными для здоровья человека, что важно для определения солнечных технологий в качестве экологически приемлемых для будущего развития человечества [134-147].

Таблица 4.5 – Химическая эксергия веществ, входящих в состав вакуумных, фотовольтаических коллекторов и расходных материалов АБХМ

Наименование	Химическая эксергия, кДж/моль
Плоский и вакуумный солнечный коллектор	
SiO ₂	0,00
Na ₂ O	387,4
CaO	192,4
Fe	370
C	395
C ₃ H ₈ O ₂	1895,9
Фотовольтаический коллектор	
Si	902,2
АБХМ	
SiO ₂	0,00
Na ₂ O	387,4
CaO	192,4
Fe	370
C	395
C ₃ H ₈ O ₂	1895,9
LiBr	130,7

Таким образом, следуя изложенному выше алгоритму оценки показателей эколого-эксергетической оценки параметров энергетических технологий, можно произвести оценку эффективности технологий солнечной

энергетики в сравнении с традиционными технологиями производства теплоты, холода и электроэнергии.

4.4 Сравнение эффективности использования эксергии солнечного излучения на юге Сибири и на экваторе Земли

В таблице 4.6 приведены максимальные значения эксергии солнечного излучения, приходящего на 1 м^2 горизонтального приемника солнечной радиации, установленного на широте г. Новосибирска, высота над уровнем моря $h = 0 \text{ м}$.

В таблице 4.7 приведена максимальная эксергия солнечного излучения, приходящая на 1 м^2 приемника солнечной радиации, установленного горизонтально на экваторе, высота над уровнем моря $h=0 \text{ м}$.

Таблица 4.6 – Максимальная эксергия солнечного излучения, приходящая на 1 м^2 приемника, установленного горизонтально на широте г. Новосибирска, высота над уровнем моря $h=0 \text{ м}$

Месяц	Химическая эксергия, кДж/м ²
Январь	15,6153
Февраль	38,2504
Март	93,0372
Апрель	152,1132
Май	211,3981
Июнь	229,8872
Июль	225,2809
Август	179,2504
Сентябрь	113,4189
Октябрь	58,9582
Ноябрь	21,4454
Декабрь	9,8441

На рисунке 4.8 приведен график, показывающий во сколько раз эффективнее может быть использована эксергия солнечной радиации на экваторе по сравнению с широтой г. Новосибирска (для горизонтального коллектора, высота над уровнем моря $h = 0$ м).

В таблице 4.8 приведена максимальная эксергия солнечного излучения, приходящая на 1 м^2 следящего приемника солнечной радиации, установленного на широте г. Новосибирска, высота над уровнем моря $h=0$ м.

В таблице 4.9 приведена максимальная эксергия солнечного излучения, приходящая на 1 м^2 следящего приемника солнечной радиации, установленного на экваторе, высота над уровнем моря $h=0$ м [147-155].

Таблица 4.7 – Максимальная эксергия солнечного излучения, приходящая на 1 м^2 приемника солнечной радиации, установленного горизонтально на экваторе, высота над уровнем моря $h = 0$ м

Месяц	кВт·ч/м ²
Январь	197,3714
Февраль	209,4828
Март	216,4655
Апрель	211,7764
Май	200,198
Июнь	192,9072
Июль	197,0269
Август	208,4111
Сентябрь	216,1701
Октябрь	213,2401
Ноябрь	201,4949
Декабрь	193,1

Таблица 4.8 – Максимальная эксергия солнечного излучения, приходящая на 1 м^2 следящего приемника солнечной радиации, установленного на широте Новосибирска, высота над уровнем моря $h = 0 \text{ м}$

Месяц	Максимальная эксергия, кДж/м ²
Январь	70,0541
Февраль	134,4067
Март	208,3922
Апрель	284,6144
Май	341,2894
Июнь	369,3592
Июль	357,0507
Август	309,0967
Сентябрь	239,5957
Октябрь	161,7012
Ноябрь	88,2827
Декабрь	5313,39

Таблица 4.9 – Максимальная эксергия солнечного излучения, приходящая на 1 м^2 следящего приемника солнечной радиации, установленного на экваторе, высота над уровнем моря $h = 0 \text{ м}$

Месяц	Максимальная эксергия, кВт·ч/м ²
Январь	284,5137
Февраль	289,8187
Март	292,6204
Апрель	290,8865
Май	286,0073
Июнь	282,4791
Июль	284,0094
Август	289,0997
Сентябрь	292,4867
Октябрь	291,0578
Ноябрь	286,0721
Декабрь	282,5522

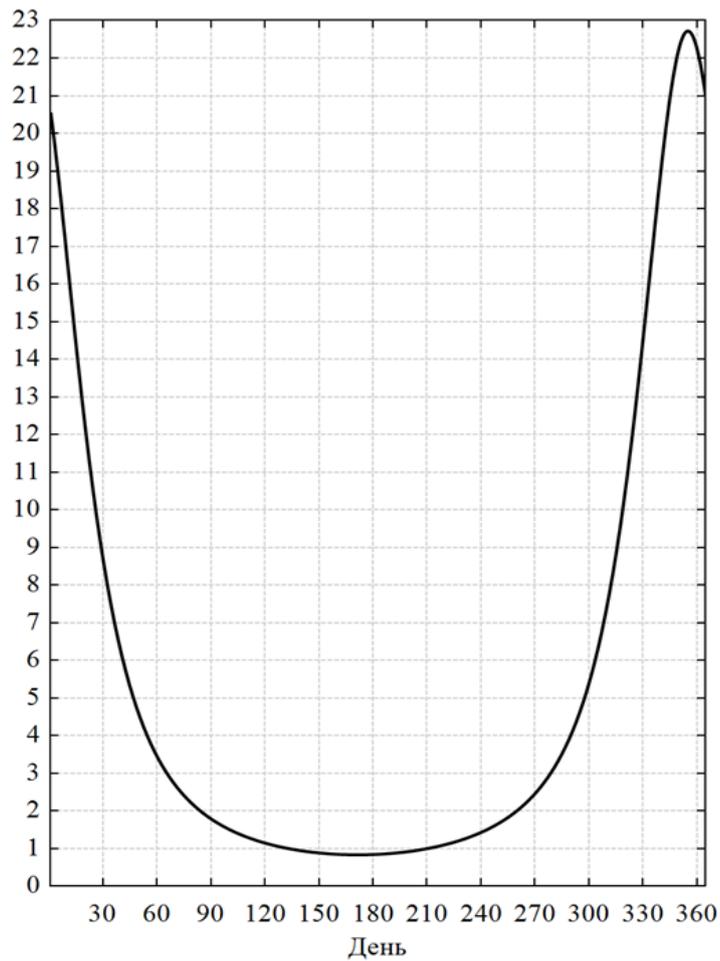


Рисунок 4.8 – Отношение эксергии солнечной радиации на экваторе к аналогичным показателям для широты г. Новосибирска

На рисунке 4.9 приведен график, показывающий во сколько раз эффективнее может быть использована эксергия солнечного излучения на экваторе по сравнению с широтой г. Новосибирска.

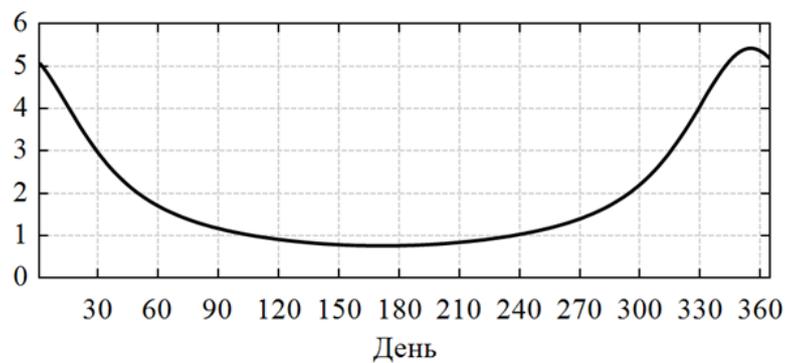


Рисунок 4.9 – Отношение эксергии солнечного излучения на экваторе к аналогичному показателю на широте г. Новосибирска

Из сравнения графиков на рисунках 4.8 и 4.9 видно, что со 130 по 200 день года в случае горизонтального коллектора и со 110 по 230 в случае следящего коллектора эксергия солнечного излучения в г. Новосибирске может быть использована более эффективно, чем на экваторе.

В точке максимума для горизонтального коллектора использование эксергии солнечного излучения в 22,8 раз эффективнее на экваторе, чем на широте г. Новосибирска.

В точке максимума для следящего коллектора использование эксергии солнечного излучения в 5 раз эффективнее на экваторе, чем на широте г. Новосибирска.

4.5 Анализ эффективности абсорбционной холодильной машины, использующей солнечную энергию

Получение холода положительных температур ($5...7^{\circ}\text{C}$) для систем кондиционирования и небольших отрицательных (до -5°C) для хранения продуктов в настоящее время возможно как с использованием для этого электрической энергии, так и теплоты. Использование для целей холодоснабжения только электрической энергии, выработанной на основе солнечной энергии, является высокочрезвычайно затратным. Более эффективным представляется второй способ производства холода, обеспечивающий выработку электроэнергии с помощью теплоты, полученной от тепловых солнечных коллекторов (ТСК) с использованием абсорбционных холодильных машин.

При утилизации солнечной радиации для холодоснабжения рациональнее использовать АБХМ, которые менее требовательны к исходной температуре теплоносителя на входе в блок генерации крепкого водно-солевого раствора. Это также важно по причине возможного объединения в единый комплекс тригенерации гибридной системы электрогенерации, разработке которой посвящена 3 глава настоящего исследования.

На рисунке 4.10 приведена схема АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией со связанным потоком массы [156-161].

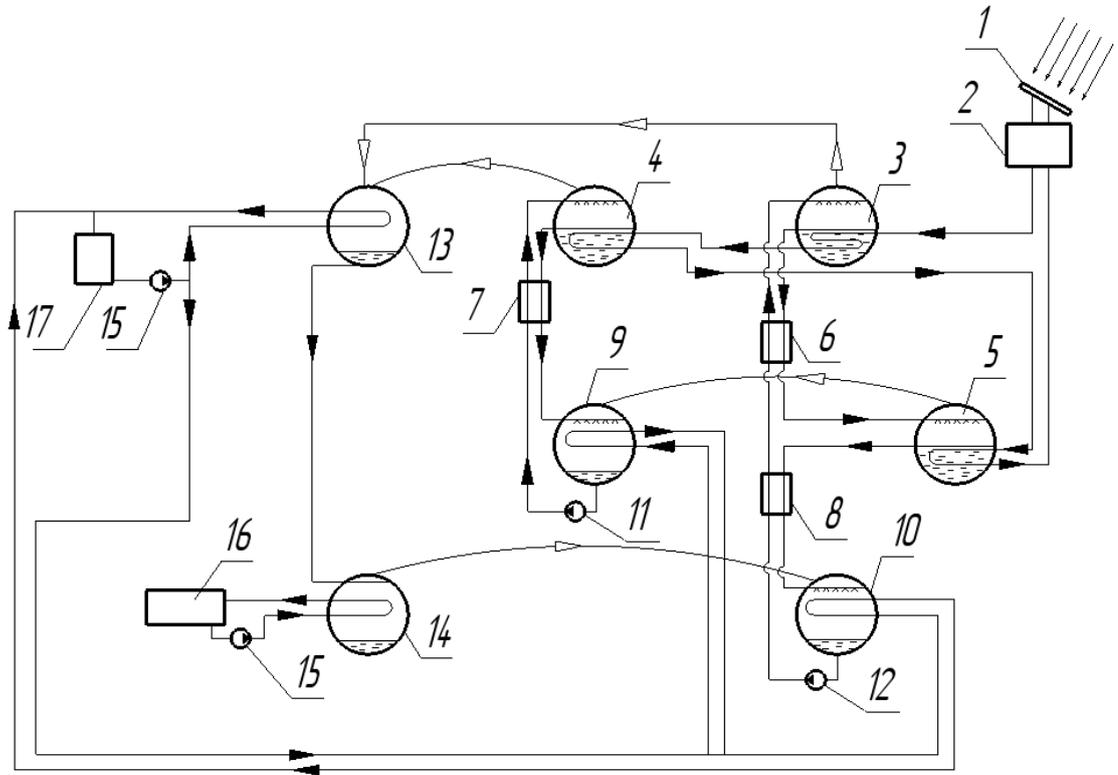


Рисунок 4.10 – Схема АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и тремя ступенями генератора теплоты [157]:

- 1 – тепловой солнечный коллектор (ТСК), 2 – бак-аккумулятор,
- 3 – генератор первой ступени, 4 – генератор второй ступени,
- 5 – генератор третьей ступени, 6 – теплообменник первой ступени,
- 7 – теплообменник второй ступени, 8 – теплообменник третьей ступени, 9 – абсорбер первой ступени, 10 – абсорбер второй ступени,
- 11 – насос абсорбера первой ступени,
- 12 – насос абсорбера второй ступени, 13 – конденсатор,
- 14 – испаритель, 15 – насос, 16 – потребитель холода, 17 – градирня

Несмотря на то, что величины холодильного коэффициента в такой схеме ниже по сравнению с базовым одноступенчатым, исследуемый многоступенчатый цикл АБХМ обеспечивает увеличение в два раза общей холодопроизводительности машины при одинаковом расходе греющего

источника, что является преимуществом при ограниченном расходе греющего источника, в качестве которого в работе рассматривается поток солнечной энергии.

Все данные для расчета АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией заимствованы из [157].

Для расчета температуры окружающей среды в эксергетической температурной функции $t_{o.c.}$ приравнена к средней логарифмической температуре теплоносителя низкопотенциального источника тепла в испарителе, как точке с самой низкой температурой в установке, так как эксергия окружающей среды по определению равна нулю.

Анализ эксергетической эффективности АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией, как технической системы, проводился с учетом эксергетического потенциала входящих и выходящих из нее потоков энергии (Рисунок 4.11).

Входящие в АБХМ энергетические потоки:

$$Q_{\text{ВХОД}} = Q_{\text{ГЕН}} + N_{\text{ЭЛ}}. \quad (4.5)$$

Исходящие из рассматриваемой АБХМ тепловые потоки:

$$Q_{\text{ВЫХОД}} = Q_{\text{КОНД}} + Q_{\text{ИСП}}, \quad (4.6)$$

где $Q_{\text{ГЕН}}$, $Q_{\text{КОНД}}$ и $Q_{\text{ИСП}}$ - соответственно тепловые потоки в генераторе, конденсаторе и испарителе; $N_{\text{ЭЛ}}$ - затраты электроэнергии на приводы насосов и автоматику. Выходящие потоки эксергии для тепловых потоков были рассчитаны по формуле:

$$Ex = Q \frac{1 - (t_{o.c.} + 273)}{t_{cp} + 273}, \quad (4.7)$$

где средняя логарифмическая температура охлаждаемого теплоносителя определялась как:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_{\text{ВХОД}} - t_{\text{ВЫХОД}}}{\ln\left(\frac{t_{\text{ВХОД}}}{t_{\text{ВЫХОД}}}\right)}. \quad (4.8)$$

По результатам расчетов по формулам (4.5-4.8), эксергетический КПД АБХМ составил 5,5%. На рисунке 4.12 приведена эксергетическая диаграмма Грассмана для рассмотренной схемы АБХМ.



Рисунок 4.11 – Схема тепловых потоков для эксергетического анализа АБХМ (внутренние потери в элементах не рассматриваются)

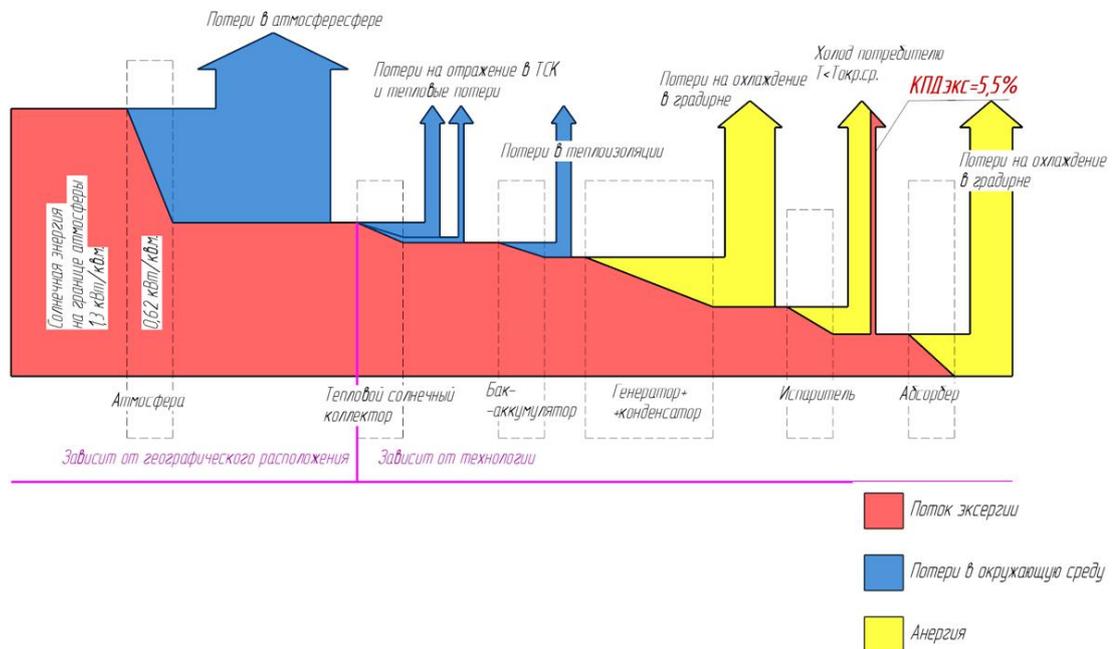


Рисунок 4.12 - Эксергетическая сквозная диаграмма Грассмана для АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией со связанным потоком массы, использующей теплоту солнечного излучения

Трехступенчатый генератор теплоты может обеспечить при относительно более низких температурах подвода тепла от теплового солнечного коллектора (81...96 °С вместо 90 °С) значительно больше холода, чем традиционно используемые АБХМ с одно- и двухступенчатой десорбцией бромистолитиевых растворов.

Выводы по главе 4

1. Результаты показывают, что технология получения теплоты от вакуумного солнечного коллектора может использоваться круглогодично для обеспечения горячего водоснабжения. Вне отопительного сезона технология может работать в режиме горячего водоснабжения без использования традиционных источников для нагрева воды.

2. Авторский плоский солнечный коллектор может использоваться круглогодично для обеспечения горячего водоснабжения без дополнительного использования традиционных источников энергии для нагрева воды. В отопительный период горячая вода, полученная от установки, может быть использована для отопления.

3. Себестоимость единицы тепловой энергии на авторском плоском коллекторе составляет 6540 руб/Гкал.

4. Эксергетический КПД АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией пара рабочего вещества составляет 5,5%.

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ТРИГЕНЕРАЦИИ НА ОСНОВЕ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Для совместного производства теплоты, холода и электроэнергии на основе только одного входящего в систему тригенерации энергоресурса: потока солнечной энергии, важно определиться также с технологиями эффективного производства теплоты и холода.

Тепловые солнечные коллекторы (ТСТ), обеспечивающие трансформацию потока солнечной радиации в тепловую энергию, являются в земных условиях основным элементом систем тригенерации.

Интеграция в единую техническую систему тригенерации отдельных высокоэффективных моно- и гибридных технологий генерации теплоты, холода и электроэнергии позволит получить синергетический эффект при использовании энергии солнечного излучения.

5.1 Схема тригенерации на основе солнечной энергии

Разработанная схема энергоснабжения потребителя суммарной мощностью 2-10 кВт (в зависимости от площади и места установки солнечных коллекторов) на основе тригенерации приведена на рисунке 5.1. Схема работает на основе солнечной энергии. Она состоит из гибридного солнечного коллектора; теплового солнечного коллектора с баком-накопителем горячей воды многофункционального назначения и высокоэффективный АБХМ с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией. Системы производства электроэнергии, теплоты и холода взаимно интегрированы, что обеспечивает реализацию процесса тригенерации, как совместной выработки полезных продуктов с использованием одного входного ресурса: потока солнечной радиации.

Разработанная схема позволяет на современном техническом уровне преобразовать большую часть энергетического спектра солнечного излучения для выработки электроэнергии с использованием связанных технологий

фотовольтаики и низкопотенциальной энергетики, а также теплоты и холода с использованием прямых и обратных термодинамических циклов с низкокипящими рабочими телами.

Интеграция систем солнечного нагрева и охлаждения обеспечивается за счет многофункционального бака горячей воды с теплообменниками перегрева рабочего тела паросилового контура для выработки электроэнергии, отпуска тепловой энергии на теплоснабжение и для работы генератора АБХМ.

Принципиально важно, что система обладает гибкостью регулирования параметров.

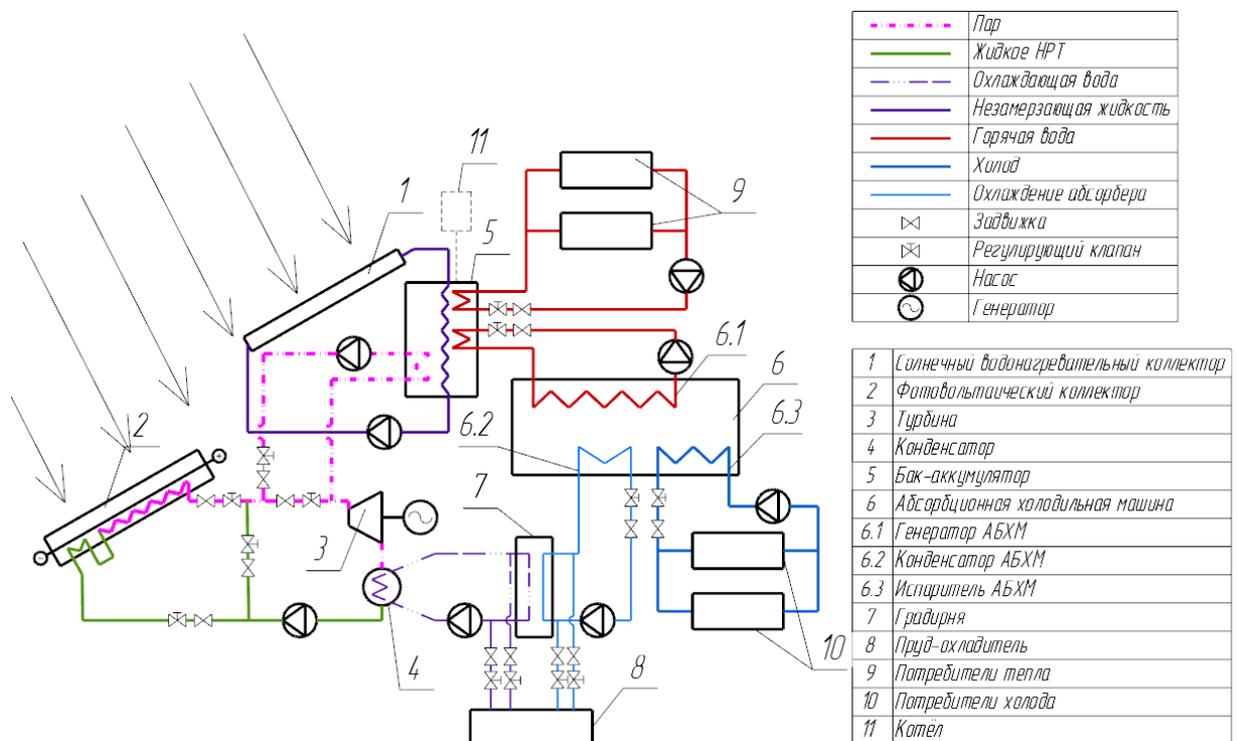


Рисунок 5.1 – Схема тригенерации на основе солнечной энергии

Разработанная схема тригенерации с использованием солнечной энергии, включающая технологии выработки тепла, холода и электроэнергии: фототермодинамический способ производства электроэнергии, солнечные коллекторы с аккумулятированием тепла в теплоизолированном баке, АБХМ с трехступенчатой генерацией тепла и двухступенчатой абсорбцией, позволяет осуществлять постоянную выработку полезных продуктов и осуществлять

работу маломощной системы тригенерации в круглогодичном режиме в условиях солнечной инсоляции юга Сибири.

Система может работать на низких параметрах теплоисточника (менее 100 °С), что позволяет использовать солнечную энергию, низкокалорийное топливо и горючие отходы в качестве дополнительных энергетических ресурсов, обеспечивающих круглосуточную работу тригенерационной установки.

5.2 Использование только солнечной энергии

Для реализации режима круглосуточной работы необходимо аккумулировать солнечную энергию в дневной период в баке-накопителе 6 (Рисунок 5.1). Это может быть выполнено с использованием ТСК, обозначенных на схеме под номером 1. В ночной период времени из бака-аккумулятора осуществляется при отключенной ФЭП гибридной энергоустановки подача тепловой энергии в контуры ОЦР-цикла, АБХМ и теплоснабжения.

Проблемами в этом случае являются большая поверхность ТСК и сезонная неравномерность поступления солнечной инсоляции.

Для устранения проблемы суточной и сезонной неравномерности солнечной инсоляции можно использовать дополнительные источники поступления тепловой энергии (Рисунок 5.1, поз. 11). С учетом относительно низких температур нагрева бака-аккумулятора (до 100°С) для этих целей могут быть использованы дешевые водогрейные котлы на низкосортных местных видах топлива или горючих отходах. В этом случае солнечная энергия позволит частично скомпенсировать затраты на использование дополнительного топлива.

В рамках предложенной схемы при отключении соответствующих контуров можно с высокой эффективностью производить отдельно выработку электроэнергии, теплоты или холода, а также осуществлять совместное генерирование двух полезных продуктов. Однако при этом

система отвода тепловой энергии для реализации прямых и обратных термодинамических циклов (Рисунок 5.1, поз. 8) должна непрерывно работать.

5.3 Эксергетическая диаграмма сквозного преобразования потока солнечной радиации в системе тригенерации

На рисунке 5.2 представлена эксергетическая диаграмма для предложенной схемы тригенерации. Максимальный эксергетический КПД для такой схемы составляет 45,4%. Он является суммой выполненных оценок эксергетического потенциала полезных продуктов: теплоты, холода и электроэнергии, рассмотренных в предыдущих разделах работы.

Можно видеть (Рисунок 5.2), что максимально работоспособный поток солнечной энергии наблюдается на входе в земную атмосферу. До зоны расположения технической системы тригенерации доходит через атмосферу только ее половина.

Эксергетический потенциал потока солнечной энергии на входе в систему тригенерации будет определяться пространственно-временными особенностями солнечной инсоляции, расчет которой был выполнен во второй главе настоящего исследования. Наиболее ценную часть полезных выходных потоков энергии системы тригенерации представляет электроэнергия, выработка которой производится гибридной фототермодинамической энергоустановкой. Максимальный эксергетический КПД такой системы составляет 45,4%.

Система накопления тепла и стабилизации всей работы системы тригенерации, включает ТСК (Рисунок 5.1, поз. 1), совместимый в процессе работы с емкостным баком-аккумулятором (Рисунок 5.1, поз. 5). Емкость бака-аккумулятора определяется на основании выбранного режима эксплуатации системы тригенерации.

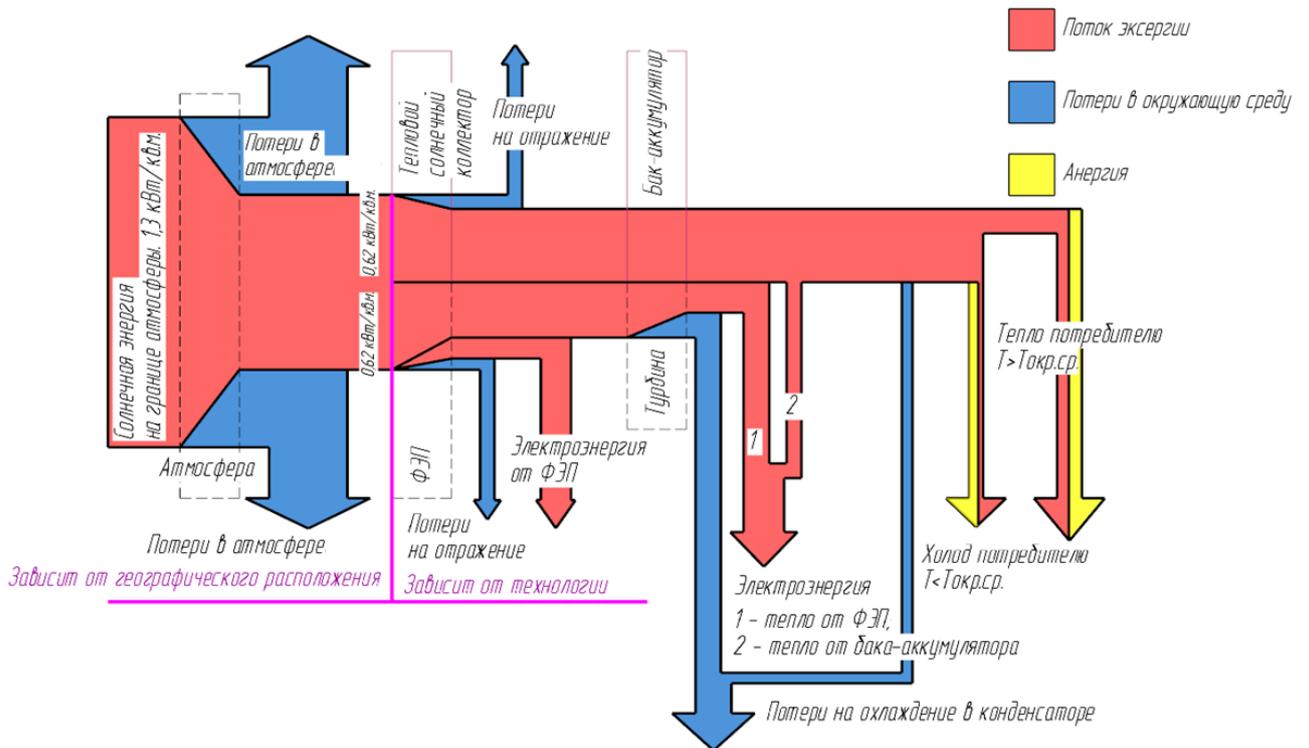


Рисунок 5.2 – Эксергетическая диаграмма разнородных потоков энергии в системе тригенерации

В течение года или даже суток режимы работы могут взаимно трансформироваться. Разработанная принципиальная схема тригенерации позволяет это сделать с высокой эффективностью выработки конечных полезных продуктов: теплоты, холода и электроэнергии.

Выводы по главе 5

1. Разработана схема тригенерации, позволяющая на современном техническом уровне преобразовать большую часть энергетического спектра солнечного излучения для выработки электроэнергии с использованием связанных технологий фотовольтаики и низкопотенциальной энергетики, а также теплоты и холода с использованием прямых и обратных термодинамических циклов с низкокипящими рабочими телами.

2. Максимальный эксергетический КПД предложенной схемы тригенерации составляет 45,4%. Он определен на основе выполненных оценок эксергетического потенциала входящих и выходящих полезных

продуктов: теплоты, холода и электроэнергии, рассмотренных работе. В течение года или даже суток режимы работы могут взаимно трансформироваться, что является дополнительным плюсом установки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана уточненная модель расчета солнечной радиации, учитывающая градиенты плотности атмосферы и изменение эксергии с учетом волнового спектра солнечного излучения. По данной модели расчет можно произвести применительно к любой точке земной поверхности. На основании модели рассчитана солнечная радиация, приходящая на 1 м^2 поверхности солнечного коллектора, установленного на юге Сибири (на горизонтальную поверхность: $Q = 1345 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$; на перпендикулярную потоку поверхность: $Q = 2685 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$). Результаты соответствуют многолетним практическим наблюдениям.

2. Разработаны установки по получению теплоты от солнца при помощи вакуумного и авторского плоского коллекторов. Разработана методика оценки их эффективности, заключающаяся в учете приходящей радиации, физических свойств и параметров теплоносителя и окружающей среды. Показано, что тепловую энергию можно получать круглогодично для режима ГВС в полном объеме при частичном покрытии отопительных нагрузок в холодное время года. Себестоимость теплоты составляет $6540 \text{ руб}/\text{Гкал}$. Экономия органического топлива – $265 \text{ кг у.т. на } 1 \text{ м}^2$ солнечного коллектора. Выбросы CO_2 снижаются на $381,29 \text{ м}^3$ на 1 м^2 .

3. Предложен вариант объединения разнородных энерготехнологий в единую гибридную систему, позволяющий использовать весь эксергетический потенциал потока солнечной радиации, на основе прямого и циклического методов производства электрической энергии, что позволило достичь расчетного КПД $27,7\%$ при температуре ФЭП $70 \text{ }^\circ\text{C}$ и энергоустановки на основе низкокипящего рабочего тела.

4. Разработана схема тригенерации, позволяющая использовать весь спектр поглощенного солнечного излучения. Максимальный $\text{КПД}_{\text{экс}}=45,4\%$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ahamed, J. U. A review on exergy analysis of vapor compression refrigeration system. / J. U. Ahamed, R Saidur, H. H. Masjuki // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – V15, № 3. – P. 600-627.
2. Ali, R. Development of a new vacuum-based photovoltaic/thermal collector, thermal and exergy analyses. / R. Ali, K. Takao // *Sustainable Energy & Fuels*. – October 2020. – V 4, № 12. – P. 253-270.. DOI: 10.1039/D0SE01102A.
3. Ali, R. Development of a new vacuum-based photovoltaic/thermal collector, thermal and exergy analyses / R. Ali, K. Takao // *Sustainable Energy & Fuels*. – October 2020. – V. 4, № 12. – C. 17-32.DOI: 10.1039/D0SE01102A.
4. Baehr, H.D. Defenition und Berechnung von Exergie und Anergie / H.D. Baehr. – BWD : Berlin, 1965. – 251 p.
5. Baehr, H. D. Defenition und Berechnung von Brennstoffexergein / H. D. Baehr, E. F. Schmidt // *BWK*. – 1963. – V. 15, № 8. – P. 375-381.
6. Аристов, Г. А. Солнце. — М. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1950. — 52 с.
7. Brasz L.J. Ranking of Working Fluids for Organic Rankine Cycle Applications / L.J. Brasz, W.M. Bilbow // *International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue*. – July. 12–15, 2004. – URL: <http://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1721&context=iracc>.
8. Brottier, L. Optimisation biénergie d'un panneau solaire multifonctionnel / L. Brottier // *Mécanique Université Paris-Saclay*. – 2019. – V. 2, № 11. – C. 15-23.
9. Celma, A. R. Energy and exergy analyses of OMW solar drying process / A. R. Celma, F Cuadros // *Renewable Energy*. – 2009. – V. 34, № 3. – P. 660-666.
10. Cengel, Y. A. Thermodynamics: an engineering approach / Y. A. Cengel, M. A. Boles. – 5th ed. – New York : McGraw-Hill, 2006. – 1094 p.

11. Книга о солнце. Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения. Viessmann. – 2010. 194.
12. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Выпуск 20. Томская, Новосибирская, Кемеровская области, Алтайский край / Перлович Н. И. ; Смирнова Н. С.. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1990. – 198 с.
13. Харченко, Н.В. Индивидуальные солнечные установки / Н.В. Харченко. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
14. Ахмедов, Р. Б. Технология использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / Р. Б. Ахмедов. – Москва : ВИНТИ, 1987. – 174 с.
15. Виссарионов В. И. Солнечная энергетика / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова, Н.К. Малинин // – Москва: Издательский дом МЭИ. – 2008. 317 с.
16. Справочник по климату СССР. В 34-х вып. Л.: Гидрометеиздат. 1966.
17. Collier, U. Renewable energy policies in a time of transition / U. Collier // Environmental Science. – 2018. – № 11. – P. 15-23.
18. Dikmen, E. Energetic and exergetic approach to vapor compression refrigeration cycle with two-stage and intercooler for new refrigerants / E. Dikmen, A. Sencan, R. Selbas // Energy Education Science and Technology. – 2011. – V. 26, № 2. – P. 205-224.
19. Elsner, N. Die Bedeutung der Exergie flussbilder fur die Untersuchung warmetechnischer Anlagen, gezeigt am Beispiel eines Abhitzkessels, eines Wärmekraftwerks und einer Dampflokomotive / N. Elsner, W. Fratzcher // Wiss. Z. Hochsch. Verkehrswesen, Dresden. – 1957. – V. 5, № 3. – P. 437-446.
20. Fratzscher, W Zur Bestimmung der maximalen Arbeit von Verbrennungsreaktionen / W Fratzscher, D Schmidt // Wiss Z. . – Dresden : TH, 1961. – P. 189-191.

21. Green, M Third generation photovoltaics. Advanced solar energy conversion / M Green. – Australia : Springer, 2003. – 160 p.
22. Сивков, С.И. Методы расчета характеристик солнечной радиации / С.И. Сивков. – Ленинград : Гидрометорологическое издательство, 1968. – 231 с.
23. Любимова, Е.В. Первые шаги солнечной энергетики в Сибири / Е.В. Любимова // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Международный научный конгресс. 23-27 апреля 2018 г., Новосибирск: Междунар. науч. конф. «Экономическое развитие Сибири и Дальнего Востока. Экономика природопользования, землеустройство, лесоустройство, управление недвижимостью»: сб. материалов в 2-х т. – Новосибирск : Сибирский гос. ун-т геосистем и технологий, 2018. – С. 198-205.
24. Невидимова, О. Г. Климатические условия развития гелиоэнергетики на территории Западной Сибири / О. Г. Невидимова, Е. П. Янкович // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – Т. 1, № 2.
25. Андрющенко, А. И. Термодинамические расчеты оптимальных параметров тепловых электростанций / А. И. Андрющенко. – Москва : Высшая школа, 1963. – 250 с.
26. Zondag, H.A.; Bakker, M.; van Helden, W.G.J. (2006). PVT Roadmap - Европейское руководство по разработке и внедрению на рынок фотоэлектрической тепловой технологии.
27. Ивлев, В.И. Оценка технических показателей перспективных спиральных пневмомоторов / В.И. Ивлев // Компрессорная техника и пневматика. – 2014. – № 1. – С. 26.
28. Massiot, I. Progress and prospects for ultrathin solar cells / Cattoni A., Collin S. // Nature energy. – 2020. № 5. P. 959-972. <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00714-4>.
29. Gomri, R . Energy and exergy analyses of seawater desalination system integrated in a solar heat transformer / R Gomri // Desalination. – 2009. – V. 249, № 1. – P. 188-196.

30. Gouy, G Sur l'energie utilisable / G Gouy // J. Phisique. – 1989. – № 1178. – P. 501-518.
31. Grassmann, P Freie Enthalpie, maximal technische Arbeit und Exergie / P Grassmann // BWK. – 1965. – Т. 17, № 2. – P. 78-79.
32. Karabarin, D. The Use of Low-Potential Energy Sources Based on Organic Rankine Cycle / D. Karabarin, S. Mihailenko // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – 2018. Vol. 11, № 7. – P. 867-876.
33. Quoilin, S. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems /M. Van Den Broek, S. Declaye, P. Dewallef, V. Lemort // Renewable a Sustainable Energy Rewiews. – 2013. V. 22. P. 168–186.
34. Rant, Z. Die Heiztechnik und der zweite Hauptsatz der Thermodynamik // Gas-Warme. – 1963. – V. 12, № 8. – P. 297-304.
35. Tchanche F.B. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles / F.B. Tchanche, Gr. Lambrinos, A. Frangoudakis, G.Papadakis // Renewable and sustainable energy reviews. – 2011. V. 15, №8. P. 3963-3979.
36. Леонов В.П. Цикл Ренкина с низкопотенциальным источником теплоты. / В.П. Леонов, В.А. Воронов, К.А. Апсит, А.В. Ципун // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2015. № 2. – URL: <http://engjournal.ru/articles/595/595.pdf>
37. МИСИС Университет науки и технологий : сайт. – URL: <https://misis.ru/> (дата обращения: 01.05.2023).
38. Würfel, P. The Physics of Solar Cells / P. Würfel. – Weinheim : Wiley-VCH, 2005. – 289 p.
39. Zondag, H.A.; Bakker, M.; van Helden, W.G.J. (2006). PVT Roadmap - Европейское руководство по разработке и внедрению на рынок фотоэлектрической тепловой технологии.
40. Бакластов, А.М. Промышленные теплообменные процессы и установки / А.М. Бакластов, Л.А. Горбенко, О.Л. Данилов. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 328 с.

41. Безруких, П.П. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П.П. Безруких, Ю.Д. Арбузов, Г.А. Борисов. – СПб : Наука, 2002. – 314 с.
42. Гринман М.И. Перспективы применения энергетических установок малой мощности с низкокипящими рабочими телами / М.И. Гринман, В.А. Фомин // Энергомашиностроение. – 2006. № 1. С. 63-69.
43. Zondag, H.A.; Bakker, M.; van Helden, W.G.J. (2006). PVT Roadmap - Европейское руководство по разработке и внедрению на рынок фотоэлектрической тепловой технологии.
44. Семенов, И.Е. Новые конструкции плоских солнечных коллекторов для мобильных модульных установок горячего водоснабжения / И.Е. Семенов, С.Н. Рыженко // Энергетическое и транспортное машиностроение. – 2010. – № 1. – С. 71-83.
45. Танака, С. Жилые автономные дома с солнечным теплохладоснабжением / С. Танака, Р. Суда. – Москва : Стройиздат, 1989. – 185 с.
46. Ланьшина, Т. Несубсидируемый рынок солнечной энергетики в России: в ожидании взрывного роста / Т. Ланьшина. – Москва : Несубсидируемый рынок солнечной энергетики в России: в ожидании взрывного роста, 2021. – 41 с.
47. Богачев, В.В. Перспективы применения солнечных соляных прудов для получения тепловой и электрической энергии в Ставропольском крае / В.В. Богачев, С.В. Буслов // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2013. – Т. 3, № 36. – С. 93-97.
48. Зубов, Д.И. Варианты использования солнечного соляного пруда для автономного теплоснабжения / Д.И. Зубов, А.С. Лоншаков, Д.М. Суворов // Энерго- и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых . – Киров : Южно-Уральский государственный университет, 2014. – С. 118-122.

49. Ильина, С.А. Моделирование процесса охлаждения солнечного пруда / С.А. Ильина, А.К. Ильин // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2008. – Т. 6, № 47. – С. 51-55.

50. Галимова, Л.В. Термодинамический анализ работы парогазовой установки в составе энергосберегающей системы на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины / Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов // Омский научный вестник. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 57-65.

51. Абсорбционные бромистолитиевые холодильные машины. Каталог ОКБ Теплосибмаш. Новосибирск. 2022.

52. Авезов, Р.Р. К определению эффективности солнечных энергетических установок / Р.Р. Авезов // Гелиотехника. – 1999. – № 3. – С. 14-16.

53. Галимова, Л.В. Термодинамический анализ работы парогазовой установки в составе энергосберегающей системы на базе абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины / Л.В. Галимова, Д.З. Байрамов // Омский научный вестник. – 2020. – Т. 4, № 4. – С. 57-65.

54. Гринман М.И. Перспективы применения энергетических установок малой мощности с низкокипящими рабочими телами / М.И. Гринман, В.А. Фомин // Энергомашиностроение. – 2006. № 1. С. 63-69.

55. Байрамов, Д.З. Системный анализ, оптимизация и прогнозирование параметров работы действующей энергосберегающей системы на базе АБХМ HAS-1157 И ПГУ-110 / Д.З. Байрамов, С.Л. Галимова // Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке. X Международная научно-техническая конференция. Сборник научных трудов. . – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2021. – С. 27-34.

56. Nwosu, N. P. Employing exergy-optimized pin fins in the design of an absorber in a solar air heater / N. P. Nwosu // Energy. – 2010. – Т. 35, № 2. – P. 571-576.

57. Sanjuan, C. Optimization of solar cooling system with interior energy storage // Solar Energy. — 2010. — №. 7. — P. 1244-1254.

58. Багдурев, Г.Б. Солнечное охлаждение / Г.Б. Багдурев, Д.М. Чалаев // Известия ДГПУ. – 2008. – № 2. – С. 20-27.
59. Chung, R. Study of a Solar Air Conditioner / R. Chung, J. A. Duffie, G. O. Loff // Mech. Engr. – 1963. – V. 85, № 31. – P. 100-127.
60. Duffie, J. A. Lithium Bromide-Water Refrigerators for Solar Operations, Mech. and Chem / J. A. Duffie, N. R. Sheridan // Engr. Trans Inst. – 1965. – № 1. – P. 79.
61. Chinnapp, J. C. The Solar Operation of a Vapour Absorption Cycle Air Conditioner at Colombo / J. C. Chinnapp. – Ceylon : Trans. Inst. Engrs, 1967. – 537 p.
62. Калогирю, С.А. Промышленное применение систем солнечной энергии PV / Т / С.А. Калогирю, Ю. Трипаногностопулос // Прикладная теплотехника. – 2007. – Т. 27, № 9. – С. 1259-1270.
63. Terrestrial photovoltaic (PV) modules - Design qualification and type approval - Part 1-1: Special requirements for testing of crystalline silicon photovoltaic (PV) modules: дата введения 2020-03-26. – Москва : Стандартиформ, 2020. – 20 с.
64. Kalogirou, S. A. Solar Energy Engineering, Second Edition: Processes and Systems / S. A. Kalogirou. – N.Y. : Academic Press, 2014. – 324 p.
65. Вукалович, М.П. Термодинамика / М.П. Вукалович, И.И. Новиков. – Москва : Машиностроение, 1972. – 327 с.
66. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, В.А. Шейндлин. – Москва : Наука, 1979. – 321 с.
67. Сталл, Д. Химическая термодинамика органических соединений / Д. Сталл, Э. Вестерем, Г. Зинке. – Москва : Мир, 1971. – 275 с.
68. Baehr, H. D. Die Berechnung der Exergie von Brennstoffexergein / H. D. Baehr, E. F. Schmidt // BWK. – 1964. – V. 16, № 2. – P. 62-66.
69. Куликов, К.К. Перспективы применения солнечных коллекторов / К.К. Куликов // Инновация и наука. – 2015. – № 12. – С. 86-88.

70. Loan Sarbu, L. Solar heating and cooling systems. Ch. 2. Solar Radiation / L. Loan Sarbu, C. Sebarchievici. – N.Y. : TNQ Books and Journals, 2017. – 441 p.
71. Julius, E Field Guide to Solar Optics / E Julius. – London : Spie Press Book, 2020. – 134 c. – ISBN 1510636978.
72. Kapur, A. S. A practical guide for total engineering of MW capacity solar PV power project / A. S. Kapur. – N.Y. : White Falcon Publishing, 2016. – 118 p.
73. Kasten, F. Revised optical air mass tables and approximation formula / F. Kasten, A. Young // Applied Optics. – 1989. – № 28. – P. 4735-4738.
74. Kraig, F. B. Atmospheric optics. - Pennsylvania: Pennsylvania State University, Department of Meteorology, 2018. - 266 p.
75. Laue, E. G The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations // Solar Energy. – 1970. – №13. – P. 43-50.
76. Meinel, A. B. Applied solar energy / A. B. Meinel, M. P. Meinel. – Michigan : Wesley Pub. Co, 1976. – 651 p.
77. Naranjo, J. D., Crissiane Ancines. Comparative analysis of a passive system with an active water heating system by means of vacuum solar collectors glass tubes. October 2018. DOI: 10.5380/reterm.v15i1.62154
78. Philip, R. The Solar Generation. — N.Y. : IEEE Press Wiley, 2018. — 369 p. ISBN 9781119425588.
79. Stephenson, D. G. Tables of solar altitude and azimuth. Intensity and solar heat gain tables. Technical Paper. — Ottawa : National Research Council of Canada, 1967. — 31 p.
80. Wald, L. Basics in solar radiation at Earth surface. — 1 ed. — Sophia Antipolis : PSL Research University, 2018. — 57 p.
81. Доскенов, А.Х. Моделирование процесса поступления солнечной энергии. / А.Х. Доскенов, А.С. Чигак // Материалы I Всероссийской научно-практической конференции «Приоритетные направления развития

энергетики в АПК» . – Челябинск : Курганская государственная сельскохозяйственная академия им. Т.С. Мальцева, 2017. – С. 124-129.

82. Расчеты теплопоступлений в здание от проникающей солнечной радиации за отопительный период. Методическое пособие. Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и соответствия в строительстве, Москва, 2017, 111 с.

83. Rant, Z. Termodinamika kurilnych processow // Strojnicki Vestnik. – 1962. – V 8, № 1/2 – P. 1-6.

84. Kopp, G., Lean, J. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*. 2011, January.

85. Laue, E. G The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations // *Solar Energy*. – 1970. – №13. – P. 43-50.

86. Wald, L. Basics in solar radiation at Earth surface. — 1 ed. — Sophia Antipolis : PSL Research University, 2018. — 57 p.

87. Померанцев, В. В. Основы практической теории горения / В. В. Померанцев. – Москва : Энергоатомиздат, 1986. – 309 с.

88. Котельные установки. Методические указания по расчетно-графической работе для студентов дневной и заочной форм обучения, программа для студентов-заочников специальности «Тепловые электрические станции» 140101. Новосибирск 2007.

89. Khoreva, V. A. Exergy analysis of the potential of solar irradiation / V. A. Khoreva, S. L. Elistratov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – № 1677. – P. 15-23. – ISSN 012108. doi:10.1088/1742-6596/1677/1/012108.

90. Khoreva, V. A. Mathematical simulation of the flux of the solar radiation coming to the collector / V. Khoreva, S. Elistratov, N. Vorogushina, I. Sadkin // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2022 – P. 207-215. doi.org/10.1007/978-981-16-9376-2.

91. Хорева, В.А. Уточненная модель расчета потока солнечного излучения / В.А. Хорева // *Международный технико-экономический журнал*. – 2022. – № 4. – С. 44-56.

92. Khoreva, V. A. Mathematical simulation of the flux of the solar radiation coming to the collector / V. Khoreva, S. Elistratov, N. Vorogushina, I. Sadkin // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2022 – P. 207-215. doi.org/10.1007/978-981-16-9376-2.
93. Khoreva, V. A. Exergy analysis of the potential of solar irradiation / V. A. Khoreva, S. L. Elistratov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – № 1677. – P. 15-23. – ISSN 012108. doi:10.1088/1742-6596/1677/1/012108.
94. Отчет Black Coal Corp. Comparative Carbon Footprint Met Coke vs. Anthracite 2020 год.
95. Отчет АО «Институт Энергосетьпроект» 2020 год.
96. Экологический отчет «СибАнтрацит» 2021 год.
97. Nacihafizoglu, O Energy–exergy analysis of gas turbine cycle in a combined cycle power plant / O Nacihafizoglu // *Energy Education Science and Technology-Part A*. – 2011. – V. 27, № 1. – P. 123-161.
98. Hou, S Exergy analysis of the solar multieffect humidification–dehumidification desalination process / S Hou, D Zeng, H Zeng // *Desalination*. – 2007. – № 203. – С. 403-412.
99. Koroneos, C. Solar air conditioning systems and their applicability – an exergy approach / Koroneos C. // *Resources Conservation and Recycling*. — 2010. — № 55. — P. 74-82.
100. Kraig, F. B. Atmospheric optics. - Pennsylvania: Pennsylvania State University, Department of Meteorology, 2018. - 266 p.
101. Laue, E. G The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations // *Solar Energy*. – 1970. – №13. – P. 43-50.
102. Rant, Z. Thermodynamische Bewertung chemischer Prozesse // *Chemie Ingenieur Technik*. – 1969. - № 16. – P. 891-942.
103. Янчошек, Л. Органический цикл Ренкина: использование в когенерации / Л. Янчошек // *Турбины и дизели*. – 2012. – № 3. – С. 50-53.
104. Рахнов, О. Е. Экологическая эффективность локальных источников энергии. : специальность 25.00.36 - Геоэкология : диссертация на

соискание Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. / Рахнов Олег Евгеньевич. – Москва, 2009. – 196 с.

105. Румянцев М. Ю. Высокоскоростные турбогенераторы для автономных энергетических установок малой мощности с использованием низкопотенциального тепла. / М.Ю. Румянцев, Н.Е. Захарова, А.В. Поликарпов, Л.Н. Понамарева, Т. М. Розеноер // Труды Всероссийской научно-практической конференции «Повышение надёжности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем», - 2010, 1–3 июня 2010 г., Москва. В двух томах. Том 1. Издательский дом МЭИ. 2010. С. 240–243.

106. Артеменко, С.В. Фторированный эфир – рабочие тела для низкотемпературного цикла Ренкина на органических веществах / С.В. Артеменко // Problemele energeticii regionale. – 2014. – № 3. – С. 22-30.

107. Боруш О.В. Общая энергетика. Энергетические установки: учеб. пособие / О.В. Боруш, О.К. Григорьева. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 96 с. – ISBN 978-5-7782-3430-7.

108. Вопросы термодинамического анализа / Под ред. В. М. Бродянского. – М.: Мир, 1965.

109. Компьютерная программа CoolPack версия 1.46.

110. Костенко Г. Н. Эксергетический баланс тепловых процессов и установок: Конспект лекций. – Одесса: Изд-во ОПИ, 1964.

111. Авезов Р.Р. Расчет эксергии теплоносителя в плоских солнечных коллекторах / Р.Р. Авезов // Гелиотехника. 1999. № 1. С.17-24.

112. Авезов Р.Р. Эксергетическая эффективность плоских солнечных тепловых коллекторов / Р.Р. Авезов // Гелиотехника. 1999. № 5. С.66-72.

113. Амерханов, Р.А. Вопросы теории и инновационных решений при использовании гелиоэнергетических систем: монография / Р.А. Амерханов, В.А. Бутузов, К.А. Гарькавый. – Москва : Энергоатомиздат, 2009. – 504 с.

114. Кирпичев, М.В. Энергетический баланс тепловых установок / М.В. Кирпичев // Изв. АН ССР. ОТП.. – 1949. – № 12. – С. 6-11.

115. Лебедев П. Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки. — М. : Энергия, 1972. — 320 с.
116. МакВейг, Д. Применение солнечной энергии / Д. 125. МакВейг. — Москва : Энергоатомиздат, 1981. — 216 с.
117. Орда, Е. П. Разработка и исследование солнечного гидропоршневого водоподъемника: специальность 05.14.08: Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии: автореферат диссертации на соискание Ученой степени кандидата технических наук / Орда Евгений Прокофьевич. — Ташкент, 1997. — 22 с.
118. Сарнацкий Э. В., Чистович С. А. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения.- М.: Стройиздат, 1990 — 324 с.
119. Сидельковский, Л.Н. Энергетические балансы огнетехнических процессов / Л.Н. Сидельковский, Э.Я. Фальков. — Москва : МЭИ, 1965. — 231 с.
120. Тихонов С.И. Автономные энергетические установки малой мощности с использованием низкопотенциального тепла / С.И. Тихонов, А.В. Ильин, Ю.Н. Лукьянов, А.Л. Перминов, А.И. Хитров // Environmental Science. — 2013. С. 199-204.
121. Танака, С. Жилые автономные дома с солнечным теплохладоснабжением / С. Танака, Р. Суда. — Москва : Стройиздат, 1989. — 185 с.
122. Хорева, В.А. Исследование работы вакуумного солнечного коллектора для получения тепловой энергии в Новосибирске / В.А. Хорева, С.Л. Елистратов // Энергосбережение и водоподготовка. — 2022. — Т. 5, № 139. — С. 23-28.
123. СНиП 23-01-99. Строительная климатология : дата введения 2015-11-17. — Москва : ГУП ЦПП, 2003. — 97 с.
124. СНиП 23-02–2003. Тепловая защита зданий : дата введения 2013-07-01. — Москва : Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. — 139 с.

125. Mohammadnejad, M. Estimating the exergy efficiency of engine using nanolubricants / M. Mohammadnejad, V. Ghazvini, F. Javadi // *Energy Science and Research*. – 2011. – V. 27, № 2. – P. 447-501.
126. Experimental evaluation of an unmodified diesel engine using biodiesel with fuel additive / H. H. Masjuki, L. A. Kalam, M. Syazly, T. Mahlia // *IFOST*. – 2006. – № 1. – P. 96-105.
127. Ner, i M. Computing the exergy of solar radiation from real radiation data. *Journal of Energy Resources Technology* 139 (6), May 2017. DOI: 10.1115/1.4036772.
128. Petela, R. Exergy of undiluted thermal radiation // *Solar Energy* . - 2003. - №74. - C. 469-488.
129. Rant, Z. Exergie, ein Bestimmung der spezifischen Exergie von Brennstoffen // *Allg. Warmetechn.* – 1961. – V 10, № 9. – P. 172-176.
130. Rant, Z. Zur Bestimmung der spezifischen Exergie von Brennstoffen // *Allg. Warmetechn.* – 1961. – V 10, № 9. – P. 172-176.
131. Romero, M. Terrestrial solar thermal power plants: on the verge of commercialization. / M. Romero, D. Martinez, E. Zarza // 4th international conference on solar power from space. – 2004.
132. Saidur, R. Energy, exergy and economic analysis of industrial boilers // *Energy Policy* . — 2010. — №. 38. — P. 2188-2197.
133. Saidur, R. Exergy analysis of solar energy application // *Renewable and sustainable energy reviews*. — 2012. — №. 16. — P. 350-356.
134. Saidur, R. Analysis of energy and exergy use for process heating in the industrial sector of Malaysia // *International Journal of Exergy*. — 2006. — №. 3. — P. 119-149.
135. Saidur, R. An application of energy and exergy analysis in residential sector of Malaysia // *Energy Policy*. — 2007. — №. 35. — P. 1050-1063.
136. Saidur, R. An estimation of the energy and exergy efficiencies for the energy resources consumption in the transportation sector in Malaysia // *Energy Policy*. — 2007. — №. 35. — P. 4018-4026.

137. Shukla, A. Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: a review // *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. — 2006. — №. 18. — P. 2119-2125.
138. Suresh, M. Energy, exergy, environment, and economic analysis of solar thermal aided coal-fired power plants // *Energy for Sustainable Development*. — 2010. — №. 14. — P. 267-279.
139. Szargut, J. Ogolne zasady bilansowania // *Enargetika*. — 1956. — №. 1. — P. 1.
140. Szargut, J. Zastosowanie nowej metody bilansowania opartej na cieple dewaluacji w hutnictwie metali niezelaznych // *Rudy I Metale Niezelazne*. — 1958. — №. 1. — P. 1.
141. Szargut, J. L'energie utilisable des substances chimiques inorganiques // *Entropie*. — 1971. — №. 40. — P. 14-23.
142. Szargut J. Calculation of the standard chemical exergy of some elements and their compounds, based upon sea water as the datum level substance // *Bul. Polish. Acad. Sci. Technical sciences*. — 1985. — V. 33, № 5-6. — P. 293-305.
143. Szargut J. Bilans egsergetyczny huty zelaza // *Hutnik*. — 1964. — V. 31, № 4. — P. 123-128.
144. Szargut J. Angenaherte Bestimmung der Exergie von Brenstoffen // *BWK*. — 1964. — V. 16, № 12. — P. 589-596.
145. Байрамов, Д.З. Анализ способов эксергоэкономической оптимизации сложных энергосберегающих систем / Д.З. Байрамов, Л.В. Галимова // *Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке: сб. тр. IX Междунар. науч.-техн. конф., 13–15 ноября 2019 г. . — СПб : Университет ИТМО, 2019. — С. 297.*
146. Ильин, А.К. Формулы для эксергии / А.К. Ильин // *Материалы докл. Рос. нац. симпоз. по энергетике . — Казань : КГЭУ, 2001. — С. 193-196.*
147. Бродянский, М.В. Эксергетический метод и его приложения / М.В. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. — Москва : Энергоатомиздат, 1988. — 281 с.

148. Бродянский, М.В. Эксергетические расчеты технических систем. / М.В. Бродянский, Г.П. Верхивкер, С.В. Дубовский. – Киев : Наук. думка, 1991. – 360 с.
149. Бродянский, М.В. Эксергетический метод термодинамического анализа / М.В. Бродянский. – Москва : Энергия, 1973. – 250 с.
150. Бродянский, М.В. Энергетика и экономика комплексного разделения воздуха / М.В. Бродянский. – Москва : Metallургия, 1966. – 326 с.
151. Бродянский, М.В. Эксергетический метод и его приложения / М.В. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 281 с.
152. Бродянский, М.В. Энергия и эксергия / М.В. Бродянский. – Москва : Мир, 1968. – 352 с.
153. Брызгалин, В.В. Тепловой баланс стены Тромба в климате центральной России / В.В. Брызгалин // Тепловой баланс стены Тромба в климате центральной России. – 2018. – № 6. – С. 15-18.
154. Будыко, М.И. Глобальная экология / М.И. Будыко. – Москва : Мысль, 1977. – 328 с.
155. Гервиц, Е.С. Эксерго-экономический подход к энергетической эффективности / Е.С. Гервиц, А.Г. Шишкин // Нефть и бизнес. – 2017. – № 9. – С. 63-69.
156. Щукина, Т.В. Использование солнечной энергии для холодоснабжения зданий в климатических условиях России / Т.В. Щукина, М.Н. Жерлыкина // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2014. – № 7. – С. 20-29.
157. Малинина, О. С. Анализ эффективности термодинамического цикла абсорбционной бромистолитиевой холодильной машины с двухступенчатой абсорбцией и трехступенчатой генерацией со связанным потоком массы / О. С. Малинина, А. В. Бараненко, Е. Е. Лядова // Вестник МАХ. – 2020. – № 4. – С. 12-19.

158. Мереуца, Е. В. Анализ энергетической эффективности включения теплонасосной установки и солнечных коллекторов в состав абсорбционных холодильных машин в системах централизованного кондиционирования / Е. В. Мереуца, А. А. Сухих // Вестник МАХ. – 2017. – № 2. – С. 43-49.

159. Мирмов, И. Н. Использование солнечной энергии и вторичных источников теплоты для получения холода / И. Н. Мирмов // Энергосберегающие технологии. – 2011. – № 9. – С. 44-48.

160. Щукина, Т.В. Влияние прогнозируемой почасовой солнечной радиации на эффективность альтернативного холодоснабжения / Т.В. Щукина // Известия ВУЗов: Строительство. – 2012. – № 6. – С. 36-49.

161. Щукина, Т.В. Утилизация солнечной энергии для производства холода / Т.В. Щукина, Е.С. Дурдыева // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Материалы межрегиональной Научно-практической конференции «Высокие технологии в экологии». – 2012. – № 11. – С. 210-215.

ПРИЛОЖЕНИЕ «А» РАСЧЕТ ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА

Для конденсатора с водяным охлаждением:

Таблица А.1 – Параметры паросилового цикла для $T_{фЭП}=11,0$ °С

Точка	T , °С	P , бар	h , кДж/кг	S , кДж/кг
1	10,027	20221	569,14	2304,64
2	6,501	1,945	564,84	2350,84
2'	6,272	1,945	564,16	2304,64
3	6,026	1,944	563,72	2303,131
4	6,026	1,944	213,77	1049,642
5	7,026	2,221	214,46	1048,52
5'	7,52	2,221	214,25	1049,642
6	10,027	2,221	223,05	1082,459

Таблица А.2 – Параметры паросилового цикла для $T_{фЭП}=31,0$ °С

Точка	T , °С	P , бар	h , кДж/кг	S , кДж/кг
1	30,034	4,082	596,33	2317,842
2			571,83	2350,17
2'	8,488	1,944	567,84	2317,842
3	6,026	1,944	563,72	2304,640
4	6,026	1,944	213,72	1049,642
5	7,026	4,082	219,13	1048,52
5'	7,52	4,082	217,52	1049,642
6	30,034	4,082	270,5	1243,154

Таблица А.3 – Параметры паросилового цикла для $T_{фЭП}=21,0$ °С

Точка	T , °С	P , бар	h , кДж/кг	S , кДж/кг
1	20,0	3,042	582,74	2310,298
2		1,943	568,09	2345,15
2'	7,196	1,943	565,70	2310,298
3	6,026	1,944	563,72	2304,640
4	6,026	1,944	213,77	1049,642
5	7,026	3,042	216,52	1048,52
5'	7,52	3,042	215,70	1049,642
6	21,0	3,042	246,35	1162,806

Таблица А.4 – Параметры паросилового цикла для $T_{фэлл}=41,0$ °С

Точка	T , °С	P , бар	h , кДж/кг	S , кДж/кг
1	40,007	5,360	609,72	2326,896
2		1,994	575,90	2360,25
2'	10,027	1,994	570,40	2326,896
3	6,026	1,994	563,72	2301,640
4	6,026	1,994	213,77	1049,642
5	7,026	5,360	205,21	1048,52
5'	7,52	5,360	208,41	1049,642
6	41	5,360	295,27	1322,746

Таблица А.5 – Параметры паросилового цикла для $T_{фэлл}=51,0$ °С

Точка	T , °С	P , бар	h , кДж/кг	S , кДж/кг
1	50,041	6,926	623,11	2337,459
2		1,944	580,34	2360,25
2'	11,813	1,943	573,38	2337,459
3	6,026	1,944	563,72	2304,64
4	6,026	1,944	213,77	1049,642
5	7,026	6,942	226,25	1048,52
5'	7,52	6,942	223,73	1049,642
6	50,041	6,926	321,02	1402,748

Таблица А.6 – Параметры паросилового цикла для $T_{фэлл}=71,0$ °С

Точка	T , °С	P , бар	h , кДж/кг	S , кДж/кг
1	69,986	11,012	648,89	2360,524
2	16,023	1,944	589,64	2370,25
2'	15,752	1,943	579,99	2360,524
3	6,026	1,944	563,72	2304,640
4	6,026	1,944	213,77	1049,642
5	7,026	11,012	263,5	1048,52
5'	7,52	11,012	229,68	1049,642
6	69,986	11,012	375,25	1563,070

Таблица А.7 – Параметры паросилового цикла для $T_{фэлл}=91,0$ °С

Точка	$T, \text{°C}$	$P, \text{бар}$	$h, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж/кг}$
1	89,993	16,660	672,37	2382,455
2		1,942	598,40	2381,02
2'	19,508	1,942	586,36	2382,455
3	6,026	1,942	563,72	2304,640
4	6,026	1,944	213,77	1049,642
5	7,026	1,944	250,65	1048,52
5'	7,52	1,944	239,59	1049,642
6	89,993	1,944	435,50	1730,199

Таблица А.8 – Параметры паросилового цикла для $T_{фэлл}=100,0$ °С

Точка	$T, \text{°C}$	$P, \text{бар}$	$h, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж/кг}$
1	98,981	19,782	681,55	2340,396
2	23,156	3,563	601,75	2430,25
2'	20,923	1,946	588,76	2390,390
3	6,026	1,944	563,72	2304,640
4	6,026	1,944	213,77	1049,642
5	7,026	2,033	258,48	1048,52
5'	7,52	2,034	245,06	1049,642
6	98,981	2,034	465,42	1809,604

Для конденсатора с воздушным охлаждением ($T_k=30$ °С):

Таблица А.8 – Параметры паросилового цикла для $T_{фэлл}=41,0$ °С

Точка	$T, \text{°C}$	$P, \text{бар}$	$h, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж/кг}$
1	40,007	5,360	609,83	2327,250
2	32,255	4,056	600,67	2350,23
2'	31,573	4,082	599,18	2327,250
3	30,034	4,082	596,31	2317,797
4	30,034	4,082	270,51	1243,181
5	31,026	5,36	273,85	1235,469
5'	32,45	5,36	272,85	1243,181
6	40,007	5,36	295,22	1322,586

Таблица А.9 – Параметры паросилового цикла для $T_{фэлл}=51,0$ °С

Точка	$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$P, \text{ бар}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$S, \text{ кДж/кг}$
1	50,041	6,926	623,11	2337,459
2	35,16	4,084	605,31	2250,26
2'	33,297	4,084	602,32	2237,459
3	30,034	4,082	596,31	2317,794
4	30,034	4,082	270,51	1243,181
5	31,026	6,926	277,96	1235,469
5'	32,45	6,926	275,72	1243,181
6	50,041	6,926	321,02	1402,748

Таблица А.10 – Параметры паросилового цикла для $T_{фэлл}=61,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Точка	$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$P, \text{ бар}$	$h, \text{ кДж/кг}$	$S, \text{ кДж/кг}$
1	60,014	8,775	636,18	2348,809
2	36,246	4,085	608,34	2360,25
2'	35,205	4,085	605,81	2348,803
3	30,034	4,082	596,31	2317,797
4	30,034	4,082	270,51	1243,181
5	31,026	8,795	282,86	1235,469
5'	32,45	8,795	279,16	1243,181
6	60,014	8,795	347,57	1482,531

**ПРИЛОЖЕНИЕ «Б» РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023688562

"Энергия солнца"

Правообладатель: **Общество с ограниченной
ответственностью "Наше солнце" (RU)**

Автор(ы): **Хорева Валентина Александровна (RU)**

Заявка № **2023667945**

Дата поступления **29 августа 2023 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **22 декабря 2023 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2819329

Кровельное покрытие и способ изготовления кровельного покрытия

Патентообладатель: *Общество с ограниченной
ответственностью "НАШЕ СОЛНЦЕ" (RU)*

Автор(ы): *Хорева Валентина Александровна (RU)*

Заявка № 2023121971

Приоритет изобретения 23 августа 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений
Российской Федерации 17 мая 2024 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 23 августа 2043 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*



Документ подписан электронной подписью
Сертификат: 4296640638532641a196f83c73b4aa7
Подпись: Зубов Юрий Сергеевич
Действителен с 17.05.2024 по 02.08.2024

Ю. С. Зубов

ПРИЛОЖЕНИЕ «В» АКТЫ ВНЕДРЕНИЯ

**академпарк**

Фонд «Научно-технологический парк Новосибирского Академгородка»

+7(383) 344-93-13

info@academpark.comwww.academpark.com

Акт о внедрении результатов диссертационной работы
Хоревой Валентина Александровны
«Эксергетическая эффективность технологий тригенерации на базе
инсоляции юга Сибири»

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт подтверждает внедрение результатов работы ассистента кафедры ТЭС Хоревой В.А.

Основные результаты работы: разработан плоский солнечный коллектор и греющая солнечная черепица с высокоэффективной тепловоспринимающей поверхностью.

Разработка является резидентом Научно-технологического парка Новосибирского Академгородка.

Внедрение разработки позволило сэкономить в Новосибирске на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора 265 кг условного топлива за год и сократить выбросы CO₂ на 250 м³ на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора за год.

Дата: 15.05.2024 г.

Исполнительный директор

А.Л. Логвинский

Акт о внедрении результатов диссертационной работы
Хоревой Валентина Александровны
«Эксергетическая эффективность технологий тригенерации на базе
инсоляции юга Сибири»

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт подтверждает внедрение результатов работы ассистента кафедры ТЭС Хоревой В.А.

Основные результаты работы: разработан плоский солнечный коллектор и греющая солнечная черепица с высокоэффективной тепловоспринимающей поверхностью.

Разработка выиграла грант «Студенческий стартап» в рамках федерального проекта «Платформа университетского технологического предпринимательства» (договор № 429ГССС15-L/78786 от 08.09.2022), вошла в ТОП-10 лучших университетских стартапов 2022 года и была многократно представлена на профильных мероприятиях, где получила высокие экспертные оценки.

Внедрение разработки позволило сэкономить в Новосибирске на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора 265 кг условного топлива за год и сократить выбросы CO₂ на 250 м³ на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора за год.

Дата: 15.05.2024

Руководитель проектного офиса популяризации
Платформы университетского
технологического предпринимательства



Шитикова О.А.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор по учебной работе НГТУ
к.э.н., доцент



С. С. Чернов

2024 г.

АКТ

внедрения результатов научной работы в учебный процесс

Настоящий акт подтверждает, что результаты, полученные в диссертационной работе «Эксергетическая эффективность технологий тригенерации на базе инсоляции юга Сибири» ассистента кафедры «Тепловые электрические станции» Хоревой Валентины Александровны внедрены в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ).

Научные разработки и результаты исследований (методики и алгоритмы расчетов, результаты аналитических исследований) используются при подготовке практических работ по дисциплине «Горение органического топлива» для бакалавров по направлению 13.03.01 – «Теплоэнергетика и теплотехника».

Заведующий кафедрой ТЭС, д.т.н., профессор

П. А. Щинников

Ученый секретарь кафедры ТЭС, к.т.н., доцент

Ю. И. Шаров