

На правах рукописи

ХВ-

ХОРЕВА ВАЛЕНТИНА АЛЕКСАНДРОВНА

**ЭКСЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЙ
ТРИГЕНЕРАЦИИ НА БАЗЕ ИНСОЛЯЦИИ ЮГА СИБИРИ**

Специальность 2.4.5 – Энергетические системы и комплексы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Научный руководитель: Елистратов Сергей Львович, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет», кафедра Тепловых электрических станций, профессор, г. Новосибирск.

Официальные оппоненты:

Алхасов Алибек Басирович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем геотермии» Дагестанского научного центра Российской академии наук, лаборатория энергетики, заведующий, г. Махачкала.

Бубенчиков Антон Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», кафедра Электроснабжение промышленных предприятий, доцент, г. Омск.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Иркутск.

Защита диссертации состоится «29» ноября 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте www.nstu.ru.

Автореферат разослан __ октября 2024 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета:

Боруш Олеся Владимировна
д.т.н., доцент



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Доля солнечной энергии в мировых запасах энергетических ресурсов составляет 72%, или 6140 миллиардов тонн условного топлива. До земли доходит 96,8% солнечного излучения. Его использование позволяет вытеснить из энергобаланса органическое топливо и снизить антропогенное воздействие на окружающую среду. Солнечная энергия может быть преобразована в тепло, холод и электроэнергию. Эти продукты можно получать как отдельно, так и совместно. При этом получаемые полезные продукты неравноценны, то есть, имеют разные качественные характеристики. Преобразование солнечной радиации в тепло, холод и электроэнергию можно осуществить в сложной технической системе, объединяющей разнородные потоки, то есть, осуществлять тригенерацию. Универсальным методом анализа таких сложных систем является эксергетический метод. В данной работе впервые с помощью эксергетического анализа рассмотрен весь путь преобразования солнечной энергии от источника до конечного продукта. В работе применяется подход от простого к сложному, то есть, рассматривается эффективность монотехнологий по выработке отдельно тепла, холода и электроэнергии с последующим их объединением в систему тригенерации. На рисунке 1 показан общий путь преобразования потока солнечной радиации от Солнца до конкретных потребителей электроэнергии, теплоты и холода на поверхности земли.

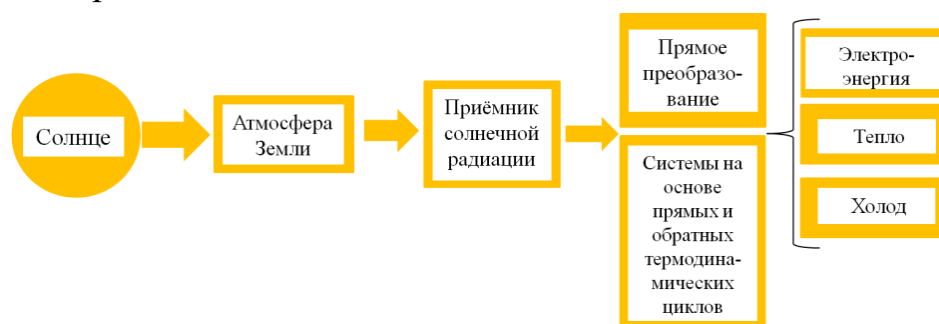


Рисунок 1 – Общий путь преобразования потока солнечной радиации от Солнца до конкретных потребителей электроэнергии, теплоты и холода на поверхности земли

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.

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.

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.

Положения, выносимые на защиту

1. Уточненная модель расчета потока солнечной радиации, учитывающая пространственно-временное расположение его приемника, а так же энергетическую составляющую его волнового спектра 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.

Практическая значимость работы:

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.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы 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 работы. 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, определена цель и поставлены задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** 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 % (Рисунок 2). Разница более чем в два раза между КПД лабораторных и коммерческих фотовольтаических панелей говорит о перспективности данной технологии получения электричества.

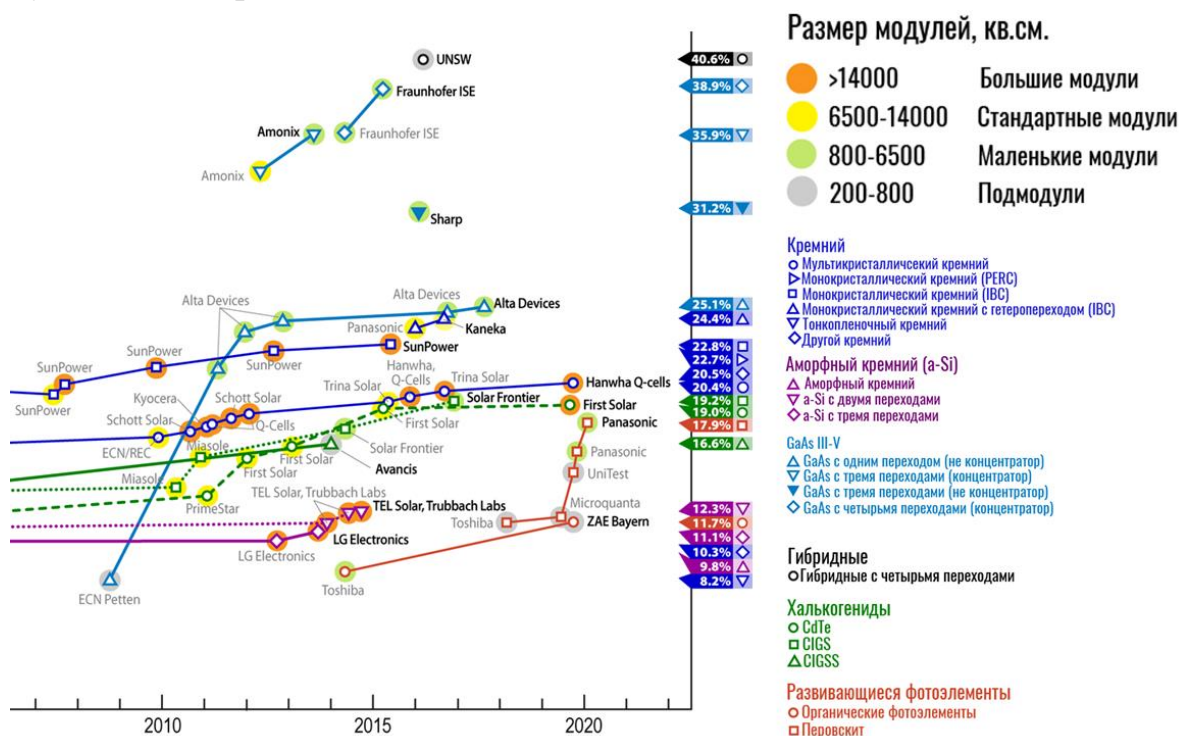


Рисунок 2 – Максимальные значения эффективности фотоэлементов, достигнутые в лабораторных условиях

Во **второй главе** предложена математическая модель, учитывающая градиенты плотности атмосферы и изменение энергии с учетом волнового

спектра солнечного излучения. Модель позволяет оценить количество солнечной радиации, приходящей на солнечный коллектор, установленный под любым углом к потоку солнечного излучения; определить мощность солнечного коллектора в любой день или за заданный период времени на любой высоте над уровнем моря, для любого угла наклона коллектора и азимута; выбрать угол наклона солнечного коллектора.

Для расчета мощности солнечной радиации, приходящей на коллектор, необходимо рассчитать плотность атмосферы, в зависимости от высоты над уровнем моря и путь солнечных лучей в атмосфере.

Плотность рассчитывается по формуле:

$$\rho = \frac{P_0 \cdot M \cdot \left(1 + \frac{L \cdot h}{T_0}\right)^{\frac{g \cdot M}{R \cdot L}}}{R \cdot (T_0 + L \cdot h)}. \quad (1)$$

Путь солнечных лучей в атмосфере:

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

Удельная мощность (кВт/м²) солнечного излучения для площадки, перпендикулярной солнечным лучам:

$$I(a; h) = I_0 \cdot e^{-k_e \frac{\rho_{h_{\text{надуровнеморя}}(h)} \cdot L_{\text{лучей}}(a; h)}{\rho_{h_{\text{надуровнеморя}}(0)} \cdot h_{\text{max}}}}. \quad (3)$$

То же для горизонтальной площадки:

$$I_{-}(a; h) = \sin \alpha \cdot I(a; h). \quad (4)$$

Расчет энергии, приходящей на площадку под любым другим углом, сводится к решению сферических треугольников.

Обозначения в формулах (1-4): P_0 , Па – стандартное атмосферное давление на уровне моря; T_0 , К – стандартная температура на уровне моря; g , м/с² – ускорение свободного падения; L , К/м – среднее значение вертикальной компоненты градиента температуры в тропосфере; R , Дж/мольК – универсальная газовая постоянная; M , кг/моль – молярная масса сухого воздуха; $R_{\text{Земли}}$, м – радиус Земли; h_{max} , м – максимальная расчетная высота атмосферы; I_0 , Вт/м² – мощность солнечного излучения в космосе; $k_e = 0,26016$ – поправочный коэффициент для экспоненты.

Годовая энергия солнечного излучения, приходящая на перпендикулярную потоку плоскость, составляет 2685 кВт·ч/м², рисунок 3.

Можно видеть, что данные, полученные по предложенной модели, отличаются от данных, полученных с помощью многолетних наблюдений не более чем на 4,5 % (Таблица 1), что говорит о высокой точности моделирования.

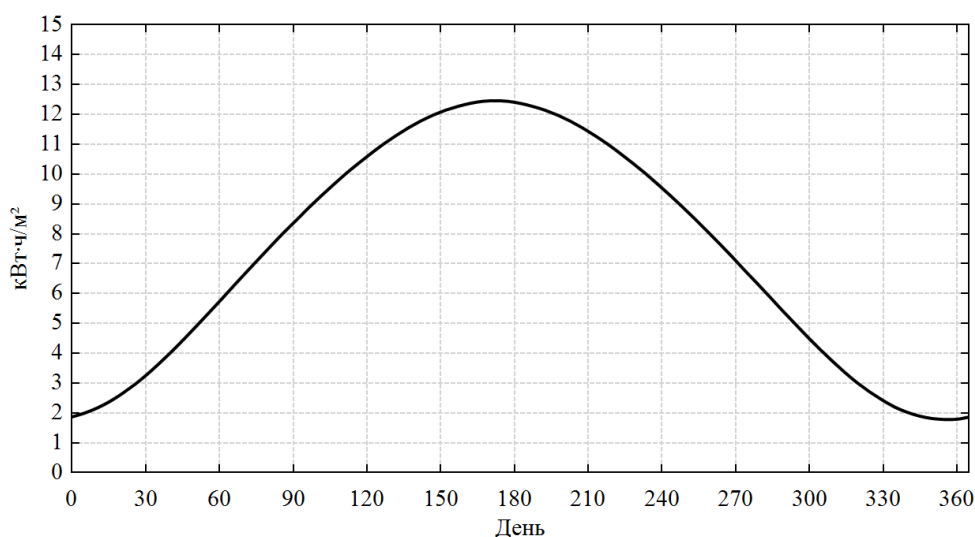


Рисунок 3 – Зависимость энергии солнечного излучения, приходящей на перпендикулярную потоку плоскость в зависимости от дня года для г. Новосибирска

Таблица 1 – Сравнение полученных годовых расчетов с результатами наблюдений

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

Далее проведена оценка экономии органического ресурса и оценка экологического воздействия, которая заключается в сравнении технологий получения горячего водоснабжения от солнечных водонагревательных коллекторов и от технологий сжигания углей разных марок. Максимальная экономия условного топлива в Новосибирске составляет 265/463 кг у.т./кг н.т. на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора в

год (Таблица 2). Сокращение выбросов CO₂ составляет 381,29 м³ на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора в год; сокращение выбросов золы – 176,35 кг на 1 м² (Таблица 3).

Таблица 2 – Максимальная годовая экономия ресурсов на юге Сибири на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора

Энергетический ресурс	Максимальная экономия ресурса
Условное топливо	265 кг
Кузнецкий уголь марки Д	338 кг
Кузнецкий уголь марки Г	297 кг
Кузнецкий уголь марки 1СС	326 кг
Кузнецкий уголь марки 2СС	316 кг
Кузнецкий уголь марки Ж	370 кг
Экибастузский уголь марки СС	463 кг

Таблица 3 – Максимально возможное сокращение выбросов на 1 м² солнечного водонагревательного коллектора

Тип топлива	V _{ср} , 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

В третьей главе диссертации определена эксергетическая эффективность тепловых гибридных солнечных коллекторов (ТГСК) при установке их на юге Сибири. Технология ТГСК заключается в использовании фотовольтаического и теплового факторов, что позволяет повысить эффективность установок на основе солнечной радиации.

Схема работы ТГСК изображена на рисунке 4: ФЭП 1 вырабатывает электрическую энергию при попадании на нее солнечного излучения, при этом происходит ее нагрев. Это приводит к снижению КПД выработки электроэнергии.

Для охлаждения ФЭП на ее обратной стороне закреплен плоский миниканальный теплообменник 2, по каналам которого движется низкокипящее рабочее тело (НРТ), к которому отводится тепло от ФЭП. НРТ в жидком состоянии подается в охлаждающее устройство 2 насосом 6 (процесс 4-5). 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.

Отвод тепла охлаждающим устройством обеспечивает охлаждение ФЭП, обеспечивая максимально возможное значение коэффициента полезного действия. Тепло, отводимое от ФЭП, сначала нагревает НРТ до температуры кипения (процесс 5'-6), а затем НРТ превращается в пар (процесс 6-1). НРТ в состоянии пара поступает на турбину 3, и, вращая ее, расширяется с понижением температуры (процесс 1-2).

На генераторе 4 вырабатывается электрическая энергия. Затем пар поступает в конденсатор 5, где происходит его конденсация (процесс 2'-4) за счет теплообмена с окружающей средой. Цикл замыкается подачей конденсата НРТ насосом 6 в плоский миниканальный теплообменник.

На рисунке 5 приведены графики зависимости КПД ФЭП и КПД ОЦР, а так же КПД комбинированной системы производства электроэнергии, являющегося суммой КПД ОЦР с рабочим телом R600a (изобутан) и КПД ФЭП.

1 – $\eta_{\text{ОЦР}}$ при охлаждении конденсатора водой. График получен расчетом термодинамического цикла в зависимости от температуры ФЭП, температура охлаждающей воды – 5 °С.

2 – $\eta_{\text{ОЦР}}$ (воздушное охлаждение). График получен расчетом термодинамического цикла в зависимости от температуры ФЭП, температура воздуха – 30 °С.

3 – уменьшении $\eta_{\text{ФЭП}}$ с повышением температуры согласно зависимости $\eta(t) = 17 \cdot (1 - 0,0045 \cdot (t - 25))$.

4 – уменьшение $\eta_{\text{ФЭП}}$ с повышением температуры согласно зависимости $\eta(t) = 17 - 0,085 \cdot (t - 25)$.

5 – сумма графиков 2 и 4.

6 – сумма графиков 1 и 3.

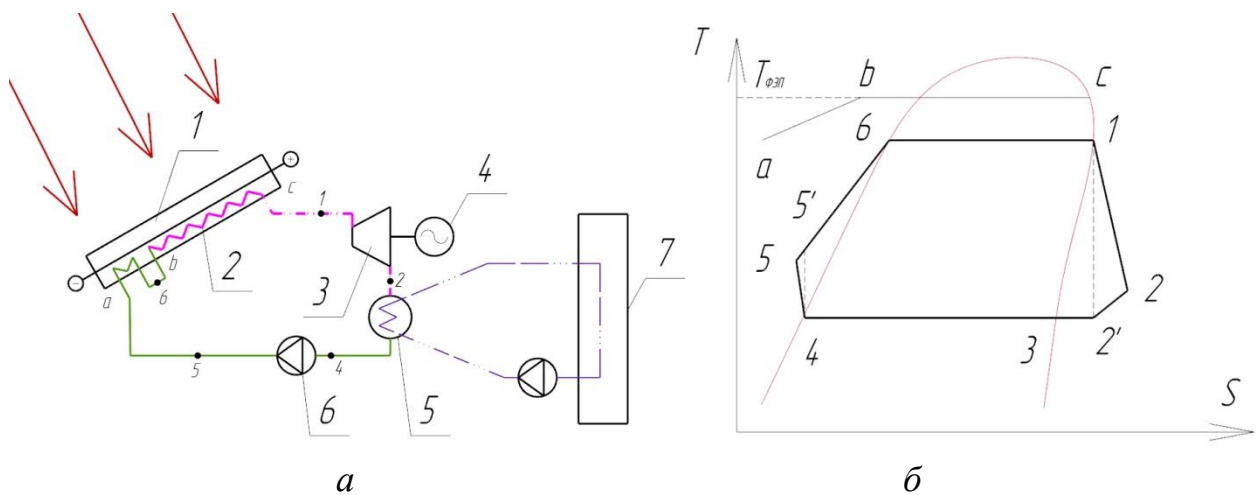


Рисунок 4 – Тепловой гибридный солнечный коллектор: (а) принципиальная схема теплового гибридного солнечного коллектора;

(б) рабочий цикл термодинамической установки в составе ТГСК.

1 – солнечная фотоэлектрическая панель; 2 – охлаждающее устройство солнечной панели (испаритель) микроканальный теплообменник;

3 – паросиловое расширительное устройство; 4 – электрогенератор;

5 – конденсатор; 6 – насос; 7 – охладитель охлаждающей воды

1,2,3,4,5,6 – узловые точки термодинамического цикла

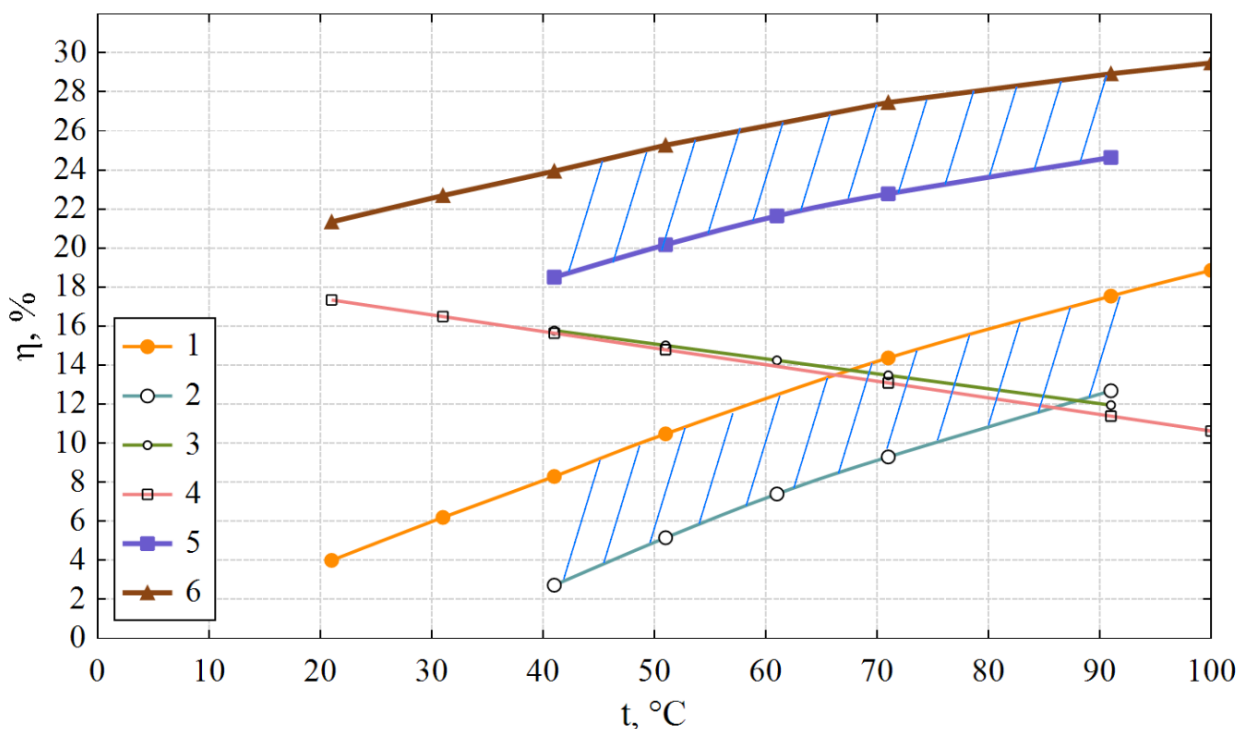


Рисунок 5 – Комбинированная система производства электроэнергии на основе принципов фотовольтаики и органического цикла Ренкина.

Можно видеть, что при температуре ФЭП 70 °С максимальный суммарный КПД комбинированной системы производства электроэнергии

составляет 27,7%. То есть, использование ТГСК может привести к увеличению КПД ФЭП в два раза.

В четвертой главе рассмотрено получение горячего водоснабжения от солнца с помощью вакуумного солнечного коллектора и авторского плоского солнечного коллектора. В вакуумном солнечном коллекторе Vitosol 300-ТМ эффективной площадью 1,51 м², нагревается незамерзающий теплоноситель Tufosol. Теплоноситель обеспечивает нагрев воды в теплоизолированном баке Vitocell 360-SVSB объемом 950 литров, к которому подключены потребители тепла (Рисунок 6). Вакуумный солнечный коллектор наклонен под углом 15° к наружной стене учебного корпуса и ориентирован на юго-восток. Эксперимент по нагреванию воды в баке с помощью вакуумного солнечного коллектора проводился в течение года.

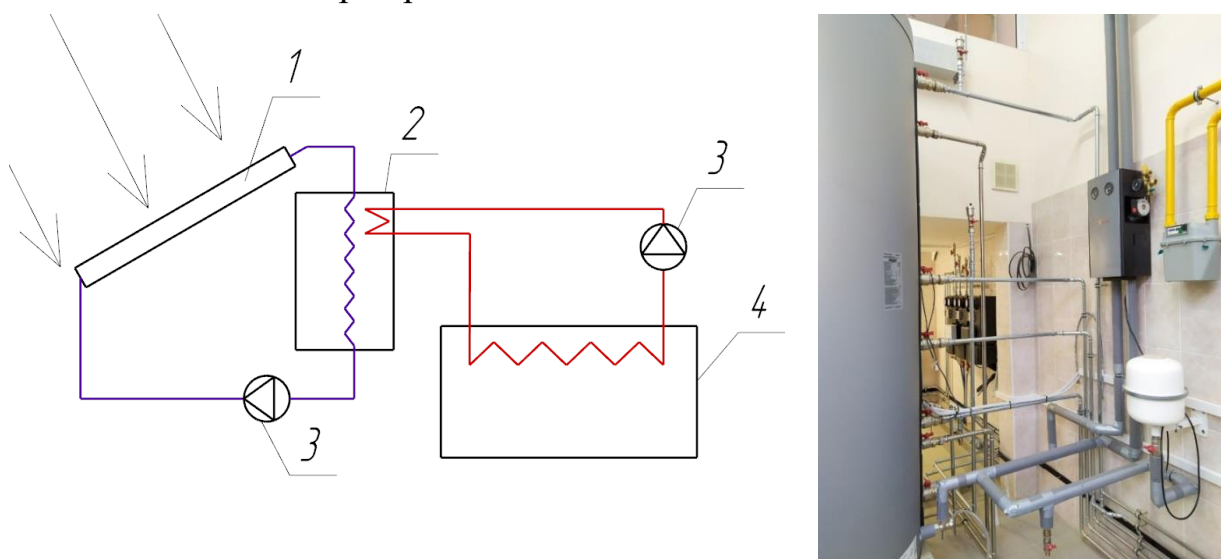


Рисунок 6 – Схема работы и фото установки получения горячего водоснабжения от вакуумного солнечного коллектора: 1 – солнечный водонагревательный коллектор; 2 – бак-аккумулятор; 3 – насос; 4 – потребители тепла

Средняя температура воды в баке-аккумуляторе коррелирует с солнечной радиацией. Максимальная температура воды в баке достигнута в июле и составила 46,18 °С. Минимальная температура воды в баке составила 17,43 °С в январе (Рисунок 7).

Результаты показывают, что технология может использоваться круглогодично для обеспечения горячего водоснабжения. Вне отопительного сезона технология может применяться без дополнительного использования традиционных источников энергии для нагрева воды.

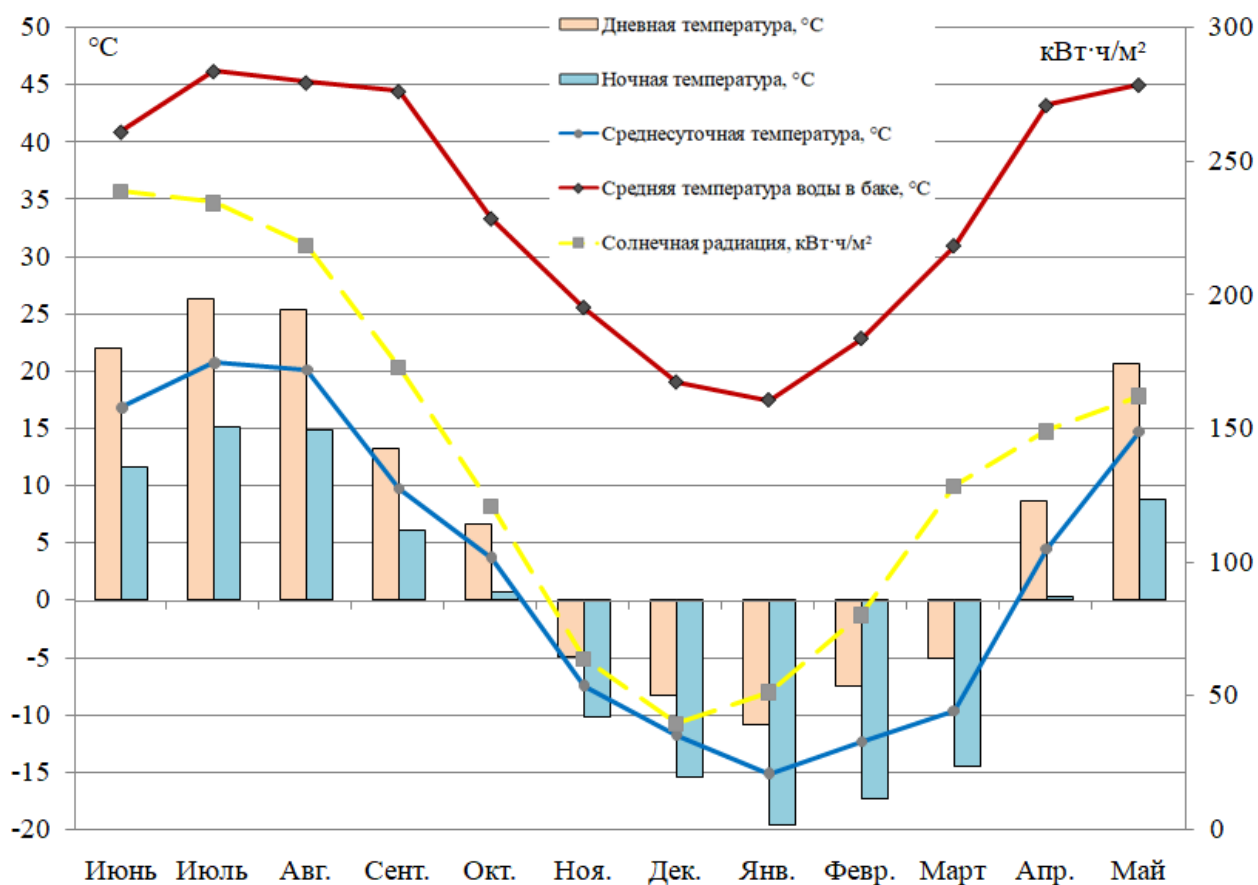


Рисунок 7 – Результаты использования вакуумного солнечного коллектора для получения горячего водоснабжения

Автором создана и исследована тепловоспринимающая поверхность, на основе которой собран плоский солнечный коллектор (Рисунок 8). Разработка поддержана Фондом содействия инновациям. На её основе создана экспериментальная установка по нагреву воды, рисунок 9.

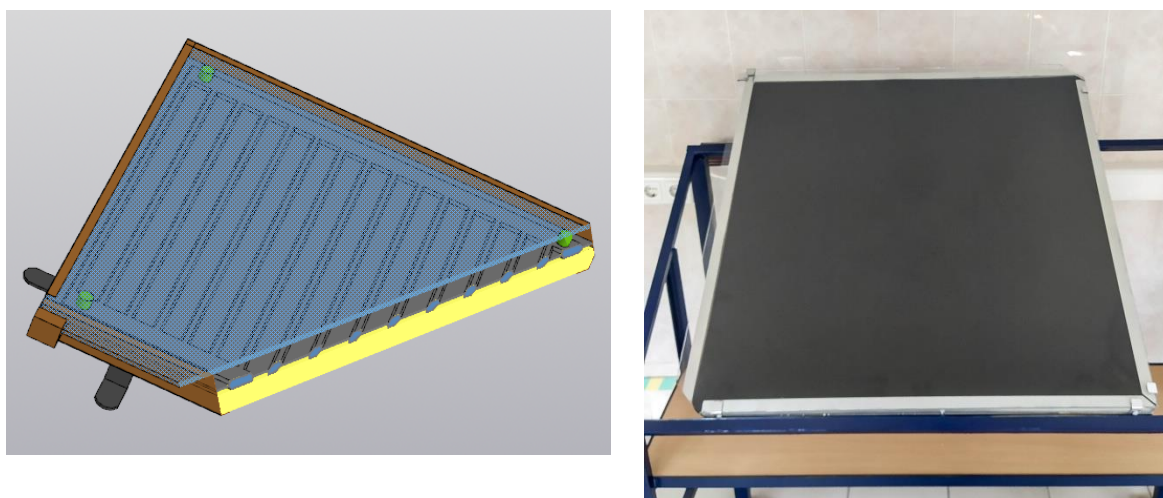


Рисунок 8 – 3D модель и опытный образец плоского солнечного коллектора с разработанной автором тепловоспринимающей поверхностью

Условия эксперимента: общая площадь исследуемой тепловоспринимающей поверхности – 1 квадратный метр; объем нагреваемого теплоизолированного бака: 70 литров; тепловоспринимающая поверхность ориентирована на юг и наклонена под углом 55 градусов; испытания в полевых условиях проводились в течение года в Новосибирской области; бак ежедневно заполняется водой с температурой +5 градусов Цельсия; нагрев стартует ежедневно с восходом солнца и завершается с закатом солнца (Рисунок 9).

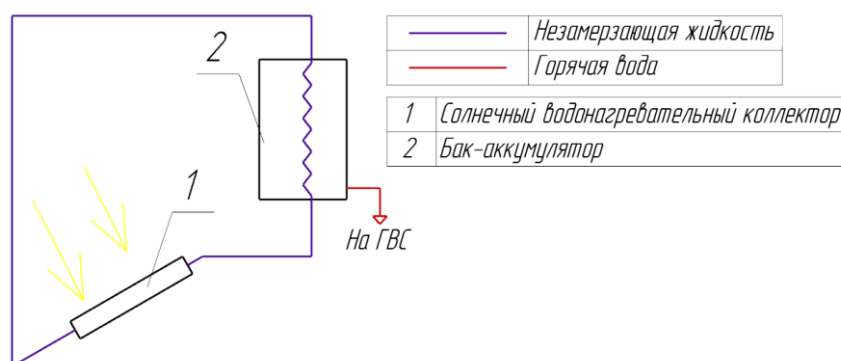


Рисунок 9 – Схема работы установки получения горячего водоснабжения от авторского плоского солнечного коллектора

Максимальная среднемесячная температура нагрева воды в баке при ясном небе (облачность не более 2 баллов при диске Солнца и околосолнечной зоне 5 градусов свободной от облаков и следов облаков) достигнута в июле и составила 94 °С. Максимальная среднемесячная температура нагрева воды в баке достигнута в июле и составила 78 °С (Таблица 4).

Таблица 4 – Результаты экспериментов

Месяц	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
Среднемесячная t воды в баке при ясном небе, °С	94	92	76	53	33	17	16	18	22	45	52	90
Среднемесячная t воды в баке, °С	78	72	52	41	28	12	12	15	19	31	47	75

Результаты эксперимента показывают, что 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 описанной установки, может быть использована для отопления.

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

$$C_{\text{э}} = \frac{C_{\text{ycm}}}{Q \cdot t} = 6540, \text{ руб./Гкал}, \quad (5)$$

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

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.

В пятой главе представлена схема энергоснабжения потребителя суммарной мощностью 2-10 кВт (в зависимости от площади и места установки солнечных коллекторов) на основе тригенерации, рисунок 10. Установка работает на основе солнечной энергии. Она состоит из гибридного солнечного коллектора; теплового солнечного коллектора с баком-накопителем горячей воды многофункционального назначения и абсорбционной холодильной машины (АБХМ). 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 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.

Работа 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.

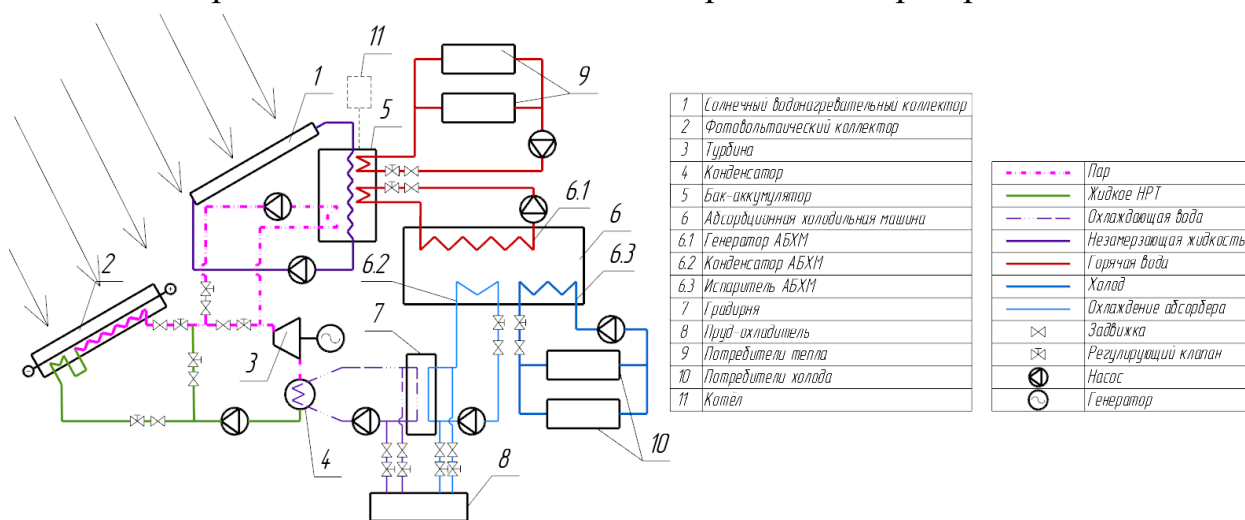


Рисунок 10 – Схема тригенерации

Диаграмма потоков характеризует эксергетическую эффективность установки, рисунок 11.

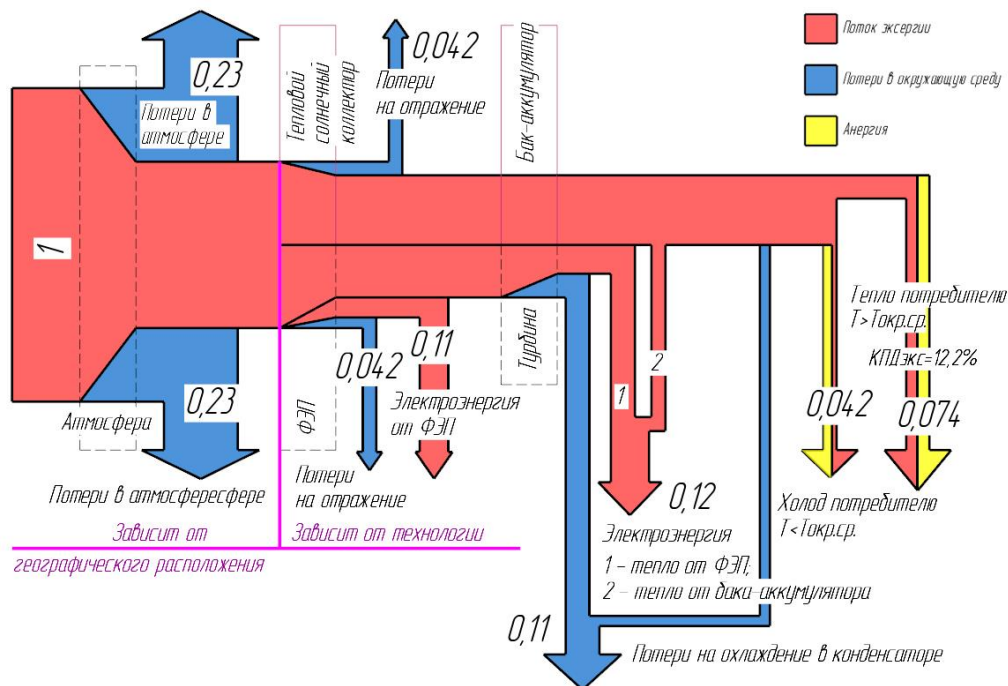


Рисунок 11 – Эксергетическая диаграмма потоков

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 $\text{КПД}_{\text{экс}} = 45,4\%$.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных журналов (перечень ВАК):

1. Хорева В.А. Исследование работы вакуумного солнечного коллектора для получения тепловой энергии в Новосибирске / В.А.

Хорева, С.Л. Елистратов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 5 (139). – С. 23–28 (К2).

2. **Хорева В.А.** Уточненная модель расчета потока солнечного излучения / В.А. Хорева // Международный технико-экономический журнал. – 2022. – № 4. – С. 44–56 (К3).

Публикации в изданиях, входящих в международную базу Scopus:

3. **Khoreva V.A.** Saving equivalent fuel and reducing emissions when using thermal solar collectors in Southern Siberia./ V. Khoreva // Fundamental and Applied Scientific Research in the Development of Agriculture in the Far East – 2022. – Vol. 73. – P. 351–358.

4. **Khoreva V.** 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. International symposium on sustainable energy and power engineering. – 2022. – P. 207-215.

5. **Khoreva V.A.** Exergy analysis of the potential of solar irradiation / V. A. Khoreva, S.L. Elistratov // Journal of Physics: Conference Series: 36 Siberian Thermophysical Seminar (STS 36) 5–7 Oct. 2020. –2020. – № 1677. – 6 p.

Результаты интеллектуальной деятельности:

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023688562. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 22 декабря 2023 г. / **В.А. Хорева**; заявитель ООО «Наше солнце».

7. Патент на изобретение №2819329. Дата государственной регистрации в Реестре изобретений 17 мая 2024 г. / **В.А. Хорева**; заявитель ООО «Наше солнце».

Другие публикации по теме диссертации:

8. **Хорева В. А.** Эксергетический анализ АБХМ с низкими параметрами греющего источника / В.А. Хорева, С.Л. Елистратов // I Всероссийская научная конференция с международным участием – Красноярск 28-31 марта 2023. – С. 441–442.

9. **Хорева В.А.** Система тригенерации на базе цикла стирлинга и абсорбционного термотрансформатора / Хорева В.А., Елистратов С.Л., Чирцов Д.Ю // VIII Всероссийская научная конференция с элементами

школы молодых учёных Теплофизика и физическая гидродинамика – Махачкала, 4–10 сентября 2023 г. – С. 169.

10. **Хорева В. А.** Эксергетический анализ абсорбционных холодильных машин с низкими параметрами греющего источника / В.А. Хорева, С.Л. Елистратов // Наука. Технологии. Инновации. Сб. науч. тр. 15 Всерос. науч. конф. молодых ученых, посвящ. году науки и технологий в России – Новосибирск, 6–10 дек. 2021 г. – Ч. 4. – С. 298-301.

11. **Хорева В.А.** Эксергетический анализ потенциала солнечной радиации / В.А. Хорева, С.Л. Елистратов // 36 Сибирский теплофизический семинар, посвящ. 70-летию академика С. В. Алексеенко. Всерос. конф. с элементами науч. шк. для молодых ученых : тез. докл. – Новосибирск, 5–7 окт. 2020 г. – С. 196.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 x 84/16. Объем 1,25 п.л., тираж 100 экз.
Заказ Р-03656. Подписано в печать 23.09.2024 г.