

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – Энергетический
Направление подготовки – 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
Кафедра – Теоретической и промышленной теплотехники

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
Комплексная оценка эффективности и надежности использования гелиоустановок для теплоснабжения зданий

УДК 697.245.58 – 192

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ5Г	Житникова Кристина Владимировна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ТПТ	Голдаев С. В.	д. ф.-м. н. ст.н.с.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Попова С. Н.	к.э.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Василевский М. В.	к.т.н., доцент		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПТ	Кузнецов Г. В.	профессор, д.ф.-м.н.		

Томск – 2017 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы
магистра по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и
теплотехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	Универсальные компетенции	
P1	Использовать представления о методологических основах научного познания и творчества, анализировать, синтезировать и критически оценивать знания	Требования ФГОС (ОК-8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (п. 2.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P2	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности	Требования ФГОС (ОК-3; ПК-8, 24), Критерий 5 АИОР (п. 2.2), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P3	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена и руководителя группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации, осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ПК-3, 16, 17, 25, 27, 28, 32), Критерий 5 АИОР (пп. 1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P4	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах устойчивого развития	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп. 2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P5	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 6), Критерий 5 АИОР (п. 2.6), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

	Профессиональные компетенции	
P6	Использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания для создания и применения инновационных технологий в теплоэнергетике	Требования ФГОС (ПК-1, 5), Критерий 5 АИОР (п. 1.1), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P7	Применять глубокие знания в области современных технологий теплоэнергетического производства для постановки и решения задач инженерного анализа, связанных с созданием и эксплуатацией теплотехнического и теплотехнологического оборудования и установок, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов теплоэнергетики	Требования ФГОС (ПК-2, 7, 11, 18 – 20, 29, 31), Критерий 5 АИОР (пп. 1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P8	Разрабатывать и планировать к разработке технологические процессы, проектировать и использовать новое теплотехнологическое оборудование и теплотехнические установки, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 12 – 15, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P9	Использовать современные достижения науки и передовой технологии в теоретических и экспериментальных научных исследованиях, интерпретировать и представлять их результаты, давать практические рекомендации по внедрению в производство	Требования ФГОС (ПК-6, 22 – 24), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P10	Применять методы и средства автоматизированных систем управления производства, обеспечить его высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на теплоэнергетическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды	Требования ФГОС (ПК-21, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI
P11	Готовность к педагогической деятельности в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт – ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ

Направление подготовки – 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Кафедра – Теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ТПТ

(Подпись) _____ (Дата) Кузнецов Г.В.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группы	ФИО
5БМ5Г	Житниковой Кристине Владимировне

Тема работы:

Комплексная оценка эффективности и надежности использования гелиоустановок для теплоснабжения зданий	
Утверждена приказом ректора (номер, дата)	№ 235/с от 27.01.2017 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

25.05.2017 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Объект исследования – плоский солнечный коллектор. Плоский солнечный коллектор состоит из нескольких слоев, поэтому рассмотрению подлежит шестислойная модель. Предмет исследования – нагрев теплоносителя (воды) при воздействии прямой солнечной радиации и температуры окружающей среды.
---	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	Аналитический обзор литературы по тематике исследования. Формулировка физической и математической моделей воздействия плотности теплового потока на плоский солнечный коллектор. Анализ результатов математического моделирования. Формулировка выводов по результатам численного исследования.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	(количество слайдов презентации)

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы

(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна
Социальная ответственность	Василевский Михаил Викторович
раздел ВКР на иностранном языке	Тарасова Екатерина Сергеевна

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:

Введение
Основная часть – обзор и реферирование англоязычных источников
Заключение
Список литературы

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры ТПТ	Голдаев Сергей Васильевич	д. ф. – м. н., ст.н.с..		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ5Г	Житникова Кристина Владимировна		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ5Г	Житникова Кристина Владимировна

Институт	Энергетический	Кафедра	Теоретической и промышленной теплоэнергетики
Уровень образования	Магистратура	Направление	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость основного оборудования, используемого в установке для нагрева воды с помощью солнечного коллектора.	Солнечный коллектор Сокол – Эффект – М – 25200 рублей, бак-водонагреватель ЯSOLAR 230 ST DUO TURBO – 59800 рублей, насосная станция в сборе – 11500 рублей.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Возможности использования солнечных коллекторов на территории Томской области.	Для каких целей могут применяться солнечные коллекторы, в какой период года, до какой температуры возможен нагрев воды, в каких областях может использоваться, от чего зависит его эффективность.
2. Сравнение затрат при использовании солнечного коллектора и электрического нагревателя.	Расчет стоимости затраченной энергии на нагрев воды при помощи солнечного коллектора и электрического нагревателя. Определение возможной экономии средств за год. Расчет срока окупаемости установки для нагрева воды с помощью солнечного коллектора.

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

--

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	Попова С.Н.	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ5Г	Житникова Кристина Владимировна		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА

«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Магистру:

Группа	ФИО
5БМ5Г	Житникова Кристина Владимировна

Институт	ЭНИН	Кафедра	Теоретической и промышленной теплотехники
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Теплотехника и теплоэнергетика/Теплофизика в теплоэнергетике

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования и области его применения	Тема работы: «Комплексная оценка эффективности и надежности использования гелиоустановок для теплоснабжения зданий». Объект данного исследования – плоский солнечный коллектор (СК). Плоские солнечные коллекторы могут применяться практически для любых хозяйственных нужд, где требуется теплота: для горячего водоснабжения; в качестве основного/дополнительного отопления жилых помещений; для подогрева бассейнов; для обогрева теплиц, производственных помещений. Реализована численная математическая модель. Благодаря программному продукту можно установить диапазон конструктивных параметров плоского солнечного коллектора, обеспечивающие их высокую эффективность и надежность для региона западной Сибири.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Производственная безопасность	1.1. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть при эксплуатации солнечного коллектора. Опасные производственные факторы присутствуют при изготовлении и монтаже. При эксплуатации СК вредных и опасных факторов не выявлено. 1.2. Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований Вредные факторы: шум; состояние воздуха рабочей зоны; освещенность рабочей зоны; электромагнитные и ионизирующие излучения; психофизиологические. Опасные факторы: электробезопасность; пожаровзрывобезопасность.
2. Экологическая безопасность:	При эксплуатации оборудования непосредственного воздействия на окружающую среду не оказывалось.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС - возгорание оборудования, пожар.
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:	ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент	Василевский Михаил Викторович	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ5Г	Житникова Кристина Владимировна		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 116 с., 21 рис., 11 табл.,
30 источников, 2 прил.

Ключевые слова: ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ПЛОСКИЙ СОЛНЕЧНЫЙ КОЛЛЕКТОР, ГЕЛИОУСТАНОВКА, КПД, ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

Объектом исследования является плоский солнечный коллектор.

Цель работы – проведение комплексной оценки эффективности и надежности использования гелиоустановок для теплоснабжения малоэтажных зданий в Юго – Западной Сибири.

В процессе исследования проводилось численное моделирование плоского солнечного коллектора, варьирование некоторых показателей солнечного коллектора, выявление эффективных параметров работы плоского СК.

В результате исследования, на основании полученных расчетных значений, выявлен диапазон конструктивных параметров работы солнечного коллектора, сделан вывод о целесообразности применения данных установок, работающих в условиях Юго-Западной Сибири.

Основные технические характеристики: плоский солнечный коллектор с габаритными размерами 2008x1093x100 мм, площадь абсорбера 2,06 м², объем абсорбера 1,4 л, КПД – 78%.

Область применения: частные дома, больницы, рестораны, гостиницы, сельское хозяйство и промышленность.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

Определения

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

КПД солнечного коллектора: Отношение теплопроизводительности коллектора к поступившей за тот же период времени на его габаритную площадь суммарной солнечной энергии

солнечный коллектор: Устройство для поглощения энергии солнечного излучения и преобразования ее в тепловую энергию

солнечное теплоснабжение: Использование энергии солнечного излучения для отопления, горячего водоснабжения и обеспечения технологических нужд различных потребителей.

теплоноситель: Жидкое или газообразное вещество, применяемое для передачи тепловой энергии.

Сокращения

ВИЭ – возобновляемые источники энергии;

ГС – гелиосистема;

ГУ – гелиоустановка;

МКР – метод конечных разностей;

НПО – научно – производственное объединение;

СК – солнечный коллектор;

ВСК – вакуумный солнечный коллектор;

ПСК – плоский солнечный коллектор;

КПД – коэффициент полезного действия;

СЛАУ – система линейных алгебраических уравнений;

ТН – теплоноситель.

Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. ГОСТ Р 51594-2000 Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 51595-2000 Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Общие технические условия.
3. ГОСТ Р 51596-2000 Нетрадиционная энергетика. Солнечная энергетика. Коллекторы солнечные. Методы испытаний.
4. ГОСТ Р 55617.1-2013 (ЕН 12975-1:2006) Возобновляемая энергетика. Установки солнечные термические и их компоненты. Солнечные коллекторы. Часть 1. Общие требования.
5. ISO 26000:2010 «Руководство по социальной ответственности».
6. ГОСТ 12.2.032 – 78 ССБТ. «Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования».
7. ГОСТ 12.0.003 – 74 ССБТ. «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация».
8. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03. «Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий».
9. СанПиН 2.2.4.548 – 96. «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений».
10. ГОСТ 30494 – 2011. «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях».
11. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».
12. СНиП 23 – 05 – 95. «Естественное и искусственное освещение».
13. ГОСТ 12.0.002 – 2003. «Система стандартов безопасности труда. Термины и определения».

14. ГОСТ 12.1.019 – 79 ССБТ. «Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты».

15. ГОСТ 12.1.004 – 91 ССБТ. «Пожарная безопасность».

16. СНиП 21 – 01 – 97. «Пожарная безопасность зданий и сооружений».

17. СНиП 2.01.02 – 85. «Строительные нормы и правила. Противопожарные нормы».

Оглавление

Введение.....	14
1 Обзор литературы по разработке и использованию гелиоэнергетических систем для горячего водоснабжения и отопления помещений.....	16
1.1 Состояние современной гелиоэнергетики в России.....	16
1.2 Классификация гелиосистем.....	21
1.3 Солнечные коллекторы.....	24
1.3.1 Воздушные солнечные коллекторы.....	24
1.3.2 Вакуумные солнечные коллекторы.....	26
1.3.3 Плоские солнечные коллекторы.....	28
1.4 Приближенная методика расчета характеристик солнечных водонагревательных установок.....	30
2 Объект и методы исследования.....	35
2.1 Объект исследования.....	35
2.2 Алгоритм решения задачи теплопроводности.....	35
3 Математическое моделирование.....	40
3.1 Физическая постановка задачи.....	40
3.2 Геометрическая постановка задачи.....	41
3.3 Математическая постановка задачи.....	42
4 Результаты исследования.....	49
5 Надежность гелиоустановок.....	55
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	60
6.1 Экономическая эффективность.....	61
6.2 Срок окупаемости солнечного коллектора.....	64
6.3 Выводы по разделу.....	65
7 Социальная ответственность.....	66

7.1 Производственная безопасность.....	67
7.1.1 Анализ вредных и опасных факторов при эксплуатации солнечного коллектора.....	67
7.1.2 Анализ вредных и опасных факторов на рабочем месте при проведении исследования.....	69
7.2 Экологическая безопасность.....	76
7.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	76
7.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности.....	79
7.5 Вывод по разделу.....	80
Заключение.....	82
Список использованных источников.....	84
Приложение А. Обзор литературы.....	86
Приложение Б. Листинг программы.....	106

ВВЕДЕНИЕ

Использование солнечной энергии для теплоснабжения является одним из ведущих трендов развития мировой энергетики на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). На основании обзора мирового рынка солнечного теплоснабжения, среди наиболее применяемых технологий использования ВИЭ, солнечное теплоснабжение находится на втором месте.

Солнечных тепловых установок в мире 535 млн. м² общей тепловой мощностью 374 ГВт, в России – 307 гелиоустановок общей площадью 16440 м², мощностью 13,15 МВт. Так как в России отсутствует федеральный закон об использовании ВИЭ, государственная политика, нет доступного по цене оборудования, тем самым отсутствует рынок гелиоустановок [1].

Благодаря солнечной энергии можно уменьшить расходы на отопление и на получение горячей воды в несколько раз, а также сэкономить до 90% традиционного топлива каждый год.

На сегодняшний день самые эффективные устройства по использованию энергии солнца – солнечные коллекторы (СК). Эффективность солнечных коллекторов в некоторых случаях достигает 70 – 85%, тогда как фотоэлектрические панели используют всего лишь 14 – 18% поступающей солнечной радиации [2].

Солнечных ресурсов России достаточно для круглогодичной работы, такой вывод можно сделать из анализа среднегодового поступления солнечной энергии в разных частях России. На практике возможен ряд трудностей, так как в реальных условиях солнечный коллектор может не выдавать те характеристики, заявленные предприятием – изготовителем. Это зависит от многих факторов, таких как широта местности, где расположена установка, угол наклона по отношению к Солнцу, спектральный состав излучения, погода, время суток и температура. Поэтому решение данного вопроса является актуальным.

Цель исследования – проведение комплексной оценки эффективности и надежности использования гелиоустановок для теплоснабжения малоэтажных зданий в Юго-Западной Сибири.

Для решения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Изучить существующие установки, конструкции и примеры использования гелиоустановок в России.
2. Изучить методику расчета характеристик гелиоустановок.
3. Выбор метода и его численная реализация
4. Провести параметрический анализ функционирования гелиоустановок.
5. Выявить диапазон конструктивных параметров гелиоустановок, обеспечивающих высокую эффективность и надежность.

Объект данного исследования – плоский солнечный коллектор.

Научная новизна – математическая модель, реализованная с учетом полной солнечной радиации и угла нахождения солнца в течение всего дня.

Теоретическая и практическая значимость – в результате исследования разработана математическая модель нагрева теплоносителя (воды) для системы горячего водоснабжения. Разработка данных моделей открывает перспективы создания более совершенных математических моделей для расчета солнечных коллекторов с учетом всех факторов, влияющих на эффективную работу. Полученные результаты могут быть применены при создании информационно – вычислительных систем для солнечного теплоснабжения.

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО РАЗРАБОТКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ГЕЛИОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ОТОПЛЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЙ

1.1 Современная гелиоэнергетика в России

Солнечное теплоснабжение в мире является вторым по объемам использования видом возобновляемых источников энергии [3].

Солнечная энергия в виде направленного потока солнечного излучения достигает границы верхних слоев атмосферы Земли. В среднем тепловой поток составляет 1395 Вт/м^2 – солнечная постоянная. Часть излучения поглощается. На поверхности земли измеряют прямую и рассеянную составляющие теплового потока [4].

Как отмечено в работе [2], в зависимости от климатических условий и широты местности, поток солнечного излучения на земную поверхность в среднем за год составляет $100 - 250 \text{ Вт/м}^2$, достигая пиковых значений в полдень при ясном небе, практически в любом месте, около 1000 Вт/м^2 .

На рисунке 1.1 представлена продолжительность солнечного сияния на территории Российской Федерации [4]. Суммарная интенсивность солнечной радиации изменяется в пределах: в северо-восточной части Сибири $550 - 830 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$, в европейской части $810 - 1380 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ [4].

Несмотря на благоприятные климатические условия и на исследования, которые проводились и проводятся, солнечное теплоснабжение в России крайне ограничено. В стране имеются два производителя солнечных коллекторов (СК): НПО «Машиностроения», находящееся в городе Реутово (Московская область), выпускает СК с алюминиевым листотрубным абсорбером европейского качества. В Улан-Удэ

налажено производство СК с листотрубным абсорбером (медь, алюминий) на основе комплектующих, изготовленных китайскими производителями [5].

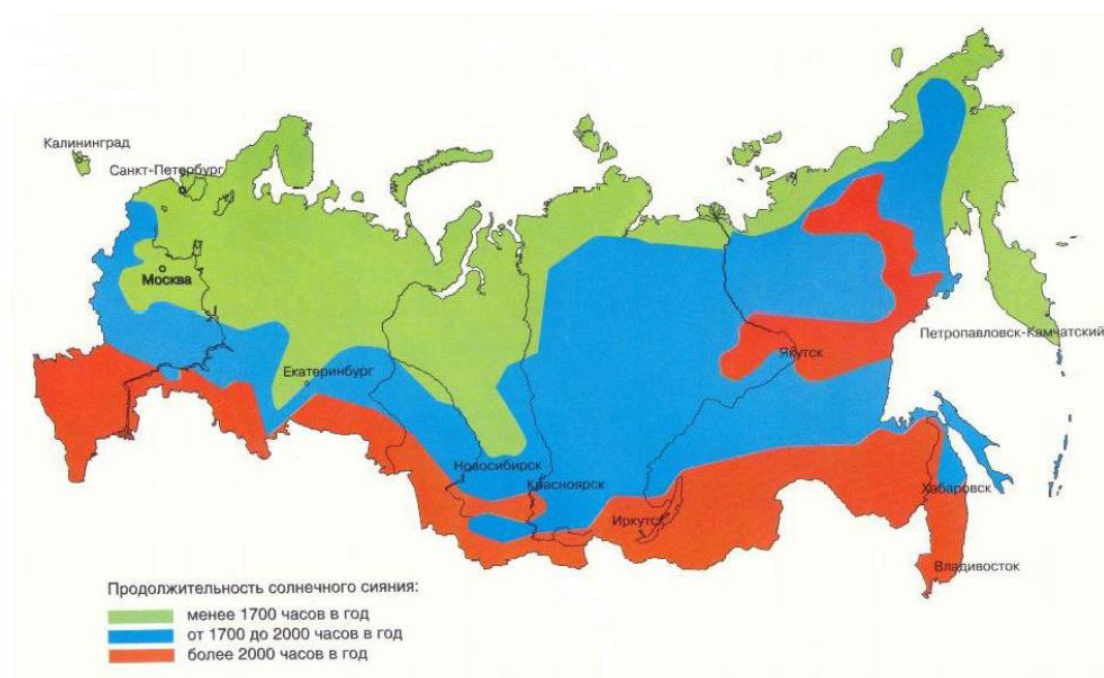


Рисунок 1.1 – Продолжительность солнечного сияния
на территории России

Сооружение гелиоустановок (ГУ) осуществляется, в основном в Краснодарском крае, Астраханской области, Бурятии, на Дальнем Востоке [6, 7].

На начало 2014 года в России эксплуатируется 307 ГУ площадью (S_{GU}) 16 440 м² мощностью 13,15 МВт [4, 5]. Согласно приведенной на рисунке 1.2 структуре ГУ, работающих по назначению, на первом месте солнечно – топливные котельные, $S_{GU}=4756$ м² (28,9%), затем ГУ для гостиниц и санаториев $S_{GU}= 3826$ м² (23,4%), практически одинаковая площадь ГУ для теплоснабжения социальных объектов и производственных предприятий – $S_{GU}=3014$ м² (18,3%) и 3000 м² (18,3%), соответственно. В горячем водоснабжении (ГВС) односемейных домов $S_{GU} = 1345$ м² (8,2%). Малое распространение получили ГУ для отопления односемейных домов – $S_{GU} = 210$ м² (1,3%), воздушные – $S_{GU}=40$ м² (0,2%) и ГУ плавательных бассейнов – $S_{GU}= 21$ м² (0,1%) [5, 8, 9].

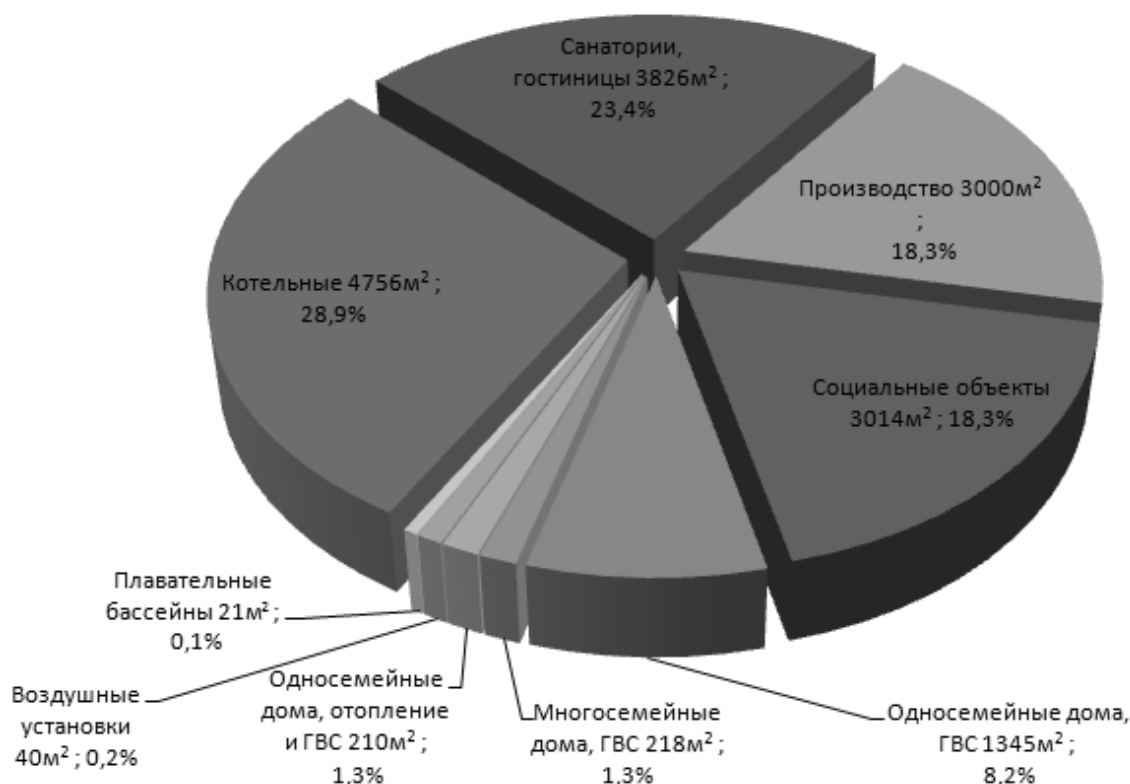


Рисунок 1.2 – Структура гелиоустановок России по назначению

Согласно классификации всемирной программы солнечного отопления и охлаждения (SHS) большинство российских ГУ с $S_{GU} = 14\,596\text{ м}^2$, относится к централизованному солнечному теплоснабжению (рисунок 1.3) [10].

В работах [3, 4] отмечается, что в Краснодарском крае в 2013 году эксплуатировалась 151 ГУ с $S_{GU} = 6573\text{ м}^2$ (5,3 МВт). В основном ГУ построены (рисунок 1.4) для гостиниц и санаториев, $S_{GU} \approx 3392\text{ м}^2$; для производственных объектов – $S_{GU} \approx 1390\text{ м}^2$; на социальных объектах (больницах, детских садах) и на котельных – $S_{GU} \approx 697\text{ м}^2$ и $S_{GU} \approx 532\text{ м}^2$.

Самая большая в России ГУ находится в городе Нариманов Астраханская область, которая насчитывает 2200 штук СК, имеющих $S_{GU} \approx 4224\text{ м}^2$ [6].

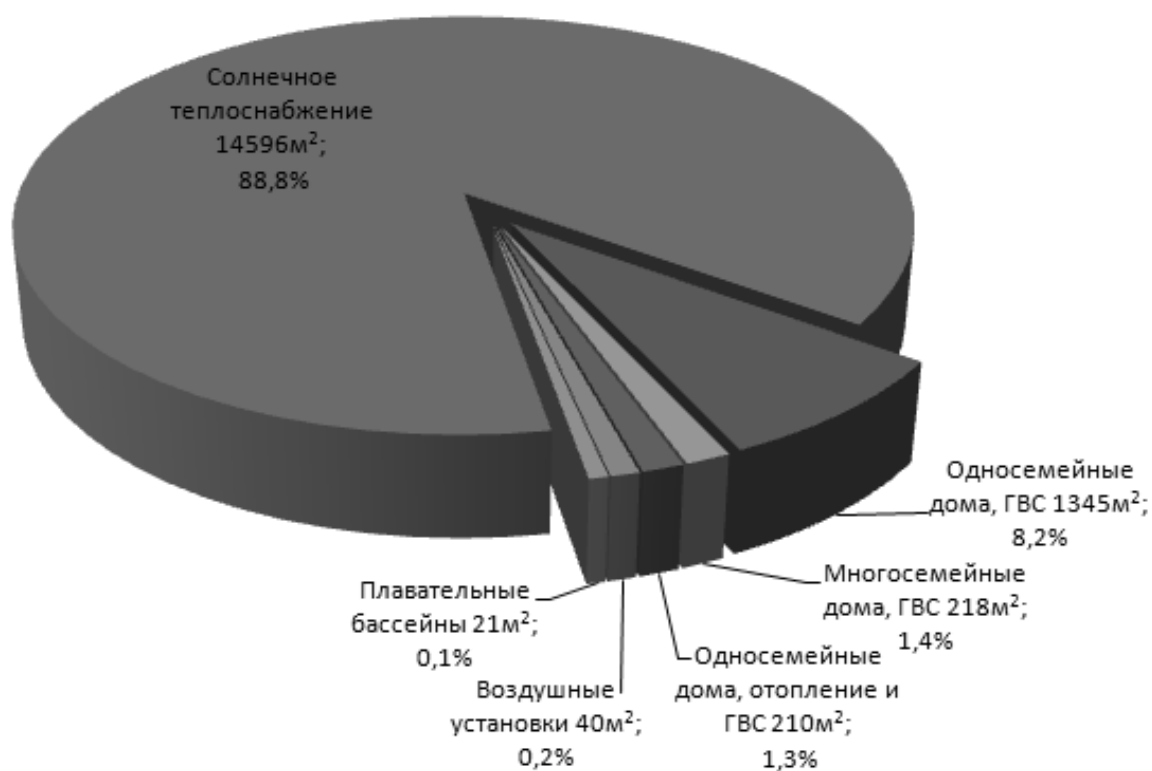


Рисунок 1.3 – Структура гелиоустановок России по классификации SHS



Рисунок 1.4 – Структура гелиоустановок Краснодарского края по назначению

В Бурятии – 97 ГУ с $S_{GU} \approx 4200 \text{ м}^2$. В основном установленные ГУ для производственных и социальных объектов, $S_{GU} \approx 3240 \text{ м}^2$ (77,1%). На втором месте ГУ только для горячего водоснабжения (ГВС) односемейных домов – $S_{GU} \approx 710 \text{ м}^2$ (16,9%). В односемейных домах устанавливаются ГУ, обеспечивающие отопление и ГВС – $S_{GU} \approx 210 \text{ м}^2$ (5%). Объектов с воздушными отопительными системами мало – $S_{GU} \approx 40 \text{ м}^2$ (1%) Структура ГУ для Бурятии представлена на рисунке 1.5 [4, 11].

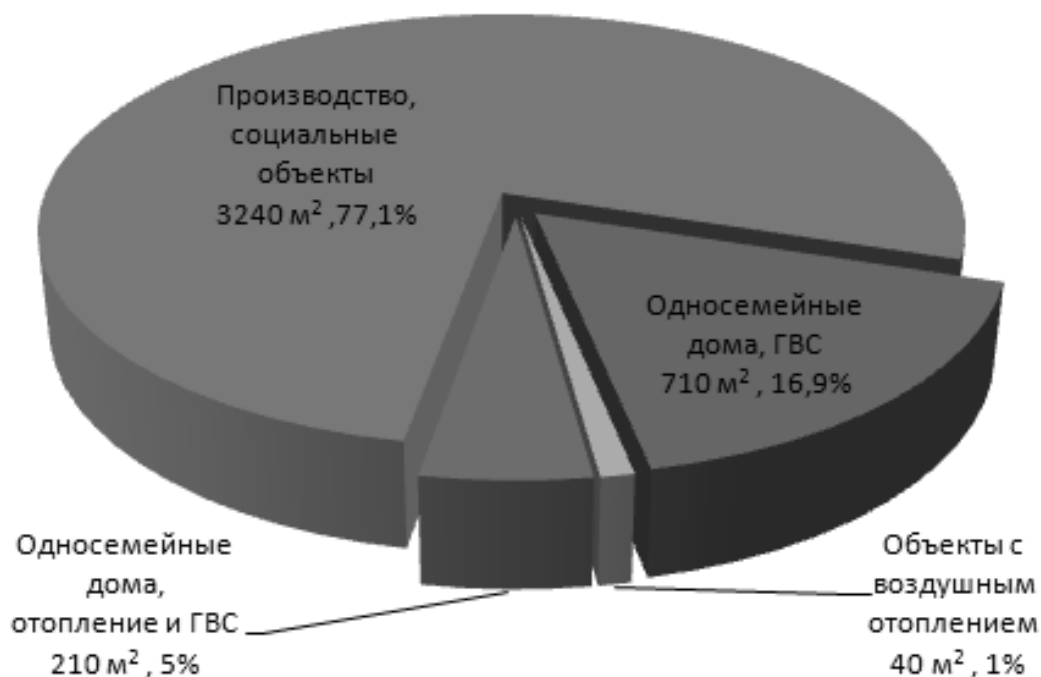


Рисунок 1.5 – Структура гелиоустановок Бурятии

В Волгоградской области построено 30 ГУ с $S_{GU} \approx 973 \text{ м}^2$. Большинство эксплуатируются в больницах – $S_{GU} \approx 520 \text{ м}^2$ (53,4%) и различных базах отдыха – $S_{GU} \approx 434 \text{ м}^2$ (44,6%). Гелиоустановки ГВС односемейных домов не получили в регионе распространения и составляют всего 20 м^2 (2%) [3, 4].

В Ставропольском крае эксплуатируется 28 ГУ с $S_{GU} \approx 470 \text{ м}^2$, из них: для ГВС больниц – $S_{GU} \approx 177 \text{ м}^2$ (37,6%), многосемейных домов – $S_{GU} \approx 164 \text{ м}^2$ (34,9%) и односемейных домов – $S_{GU} \approx 129 \text{ м}^2$ (27,5%) [3, 4].

1.2 Классификация гелиосистем

Гелиосистема (ГС) или ГУ – это устройство для преобразования энергии солнечной радиации в другие виды энергии, тепловую или электрическую, предназначена для отопления дома, ГВС и подогрева воды в бассейне.

В работе [2] отмечается, что использование ГУ, состоящих из СК, позволяет экономить традиционные источники энергии и снижает вредное воздействие на атмосферу при выработке энергии. Благодаря, использованию практически неисчерпаемой энергии солнца, можно достичь положительного экономического эффекта.

Устройство ГУ представляет собой замкнутый трубчатый контур, по которому циркулирует теплоноситель (ТН). Солнечные лучи, попадая на поверхность коллектора, поглощаются абсорбером, нагревая ТН, который из коллектора по трубопроводам поступает в бак, нагревая в нём воду [12].

Конструктивно любая ГУ состоит из солнечной панели – основной элемент в конструкции ГС, и резервуара для нагретой воды (баки бывают с теплообменником при использовании в качестве ТН (антифриза).

По способу использования солнечной радиации системы солнечного теплоснабжения бывают пассивные; активные [12].

Для пассивных систем характерно использовать в качестве элемента, воспринимающего солнечную радиацию и преобразующего ее в теплоту, само здание или его отдельные ограждения (здание-коллектор, стена-коллектор, кровля-коллектор и тому подобное). Пример пассивной системы теплоснабжения представлен на рисунке 1.6 [12].

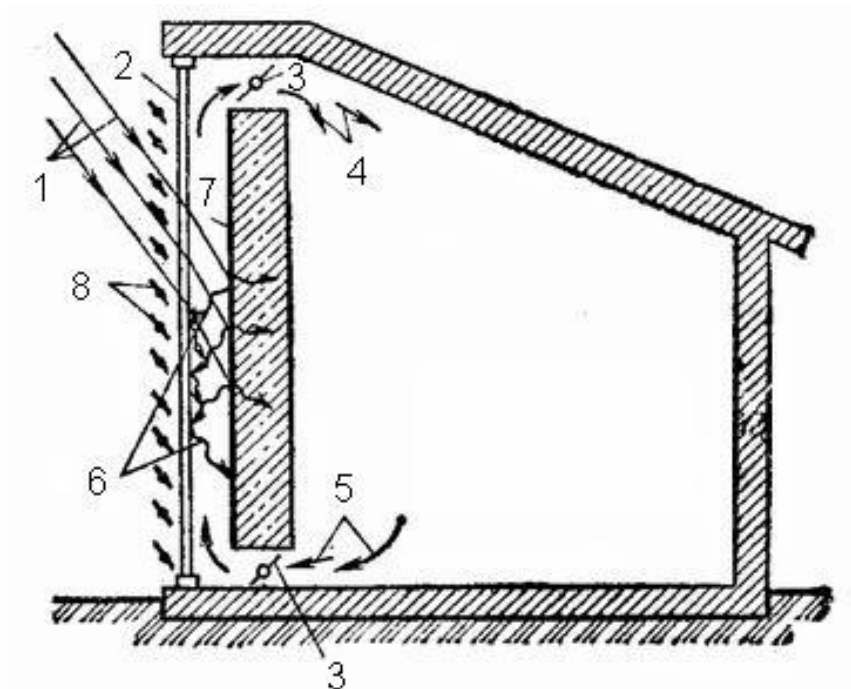


Рисунок 1.6 Пассивная система солнечного отопления
«стена-коллектор»:

1 – солнечные лучи; 2 – лучепрозрачный экран; 3 – воздушная заслонка; 4 – нагретый воздух; 5 – охлажденный воздух из помещения; 6 – собственное длинноволновое тепловое излучение массива стены; 7 – черная лучевоспринимающая поверхность стены; 8 – жалюзи.

В активных системах гелиоприемник является самостоятельным отдельным устройством, не относящимся к зданию.

Согласно [12] активные ГС можно разделить:

1. по назначению: ГВС, отопления; для тепло- и холодоснабжения.
2. по виду используемого ТН: жидкостные (вода, антифриз); воздушные.
3. по способу циркуляции ТН: естественная или принудительная.
4. по продолжительности работы: круглогодичные или сезонные.
5. по техническому решению схем: одноконтурные, двухконтурные, многоконтурные.

Вода – теплоемкий и широкодоступный ТН, тогда как воздух является незамерзающим ТН. В связи с этим в воду необходимо добавлять незамерзающие жидкости при температурах ниже 0°C . Однако вода, насыщенная кислородом, вызывает коррозию трубопроводов и аппаратов. Расход металла в водяных ГС значительно ниже, чем для устройства систем воздушного отопления [12].

Для сезонных гелиосистем ГВС характерны одноконтурные схемы, которые эксплуатируются в летние и переходные месяцы, в периоды с положительной температурой наружного воздуха (рисунок 1.7). В ГС возможен дополнительный источник теплоты, в зависимости от назначения обслуживаемого объекта и условий эксплуатации.

Для отопления зданий обычно используют двухконтурные или многоконтурные ГУ (рисунок 1.8). В таких схемах возможно применение различных ТН для разных контуров: в гелиоконтуре – водные растворы незамерзающих жидкостей, в промежуточных контурах – воду, а в контуре потребителя – воздух [12].

Комбинированные ГС обычно круглогодичного действия, используют для целей тепло-холодоснабжения зданий, включают дополнительный источник теплоты в виде традиционного теплогенератора, работающего на органическом топливе, или трансформатора теплоты.

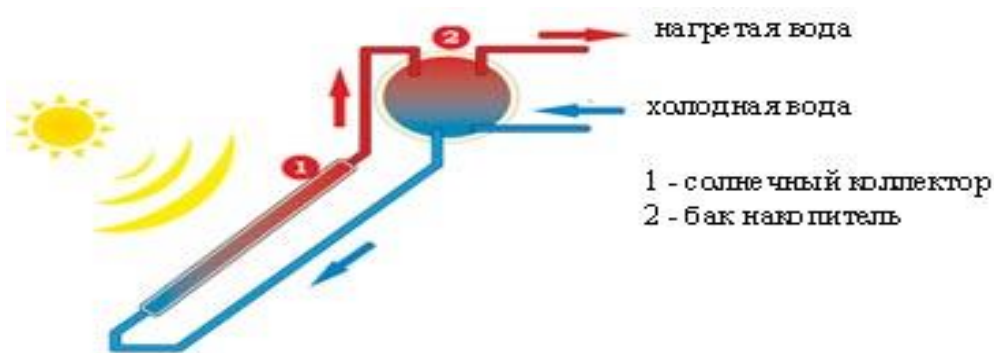


Рисунок 1.7 – Схема одноконтурной гелиоустановки с естественной циркуляцией

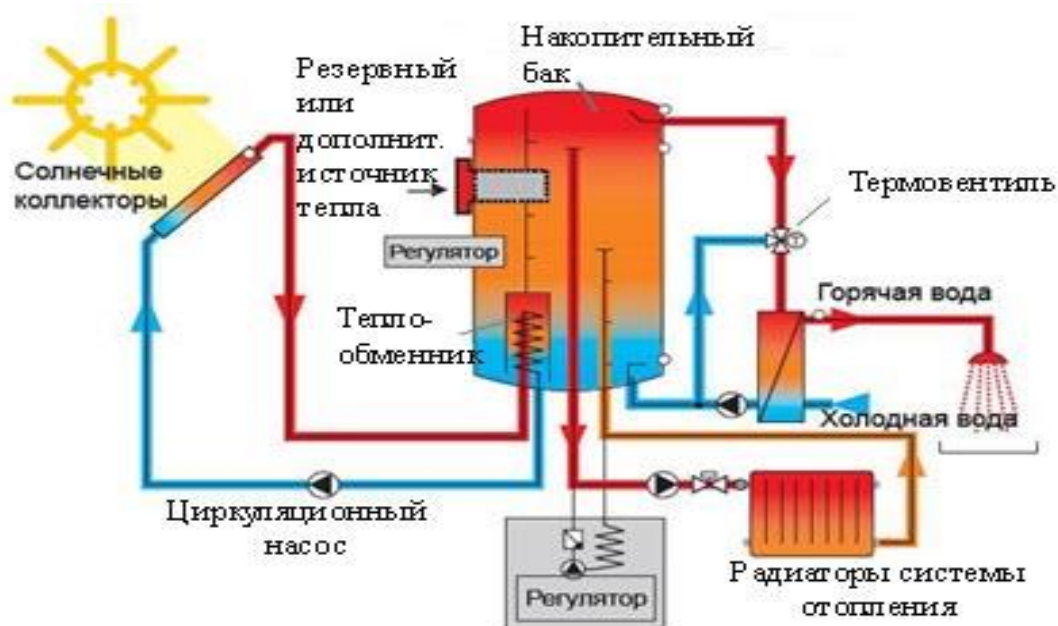


Рисунок 1.8 – Вариант двухконтурной гелиоустановки для горячего водоснабжения и отопления с принудительной циркуляцией

1.3 Солнечные коллекторы

На сегодняшний день СК являются наиболее эффективными устройствами, использующими энергию солнца. Для сравнения, КПД фотоэлектрических панелей составляет около 14 – 18%, на СК эффективно используется приблизительно 80 – 95% поглощенной солнечной энергии [13].

По конструктивным особенностям СК бывают: воздушные и водяные. Водяные СК подразделяются на: вакуумные плоские.

1.3.1 Воздушные солнечные коллекторы

Воздушный СК предназначен для нагрева воздуха непосредственно подаваемого в систему теплоснабжения, применяется в осушительных аппаратах, в системах с воздушным отоплением, и с рекуперацией воздуха в помещениях [14].

Конструкция СК представляет собой плоскую панель, вмонтированную в южный фасад здания. Абсорбер выполнен из пластин хорошо проводящего металла (медь, алюминий), реже из пластика. Воздух нагревается непосредственно при контакте с пластиной абсорбера. Для увеличения площади теплоотдачи абсорбер имеет ребристую форму или перфорацию. СК должен быть хорошо изолирован для уменьшения тепловых потерь. Циркуляция воздуха в таких системах может быть как естественной, так и принудительной с применением вентиляторов [15].

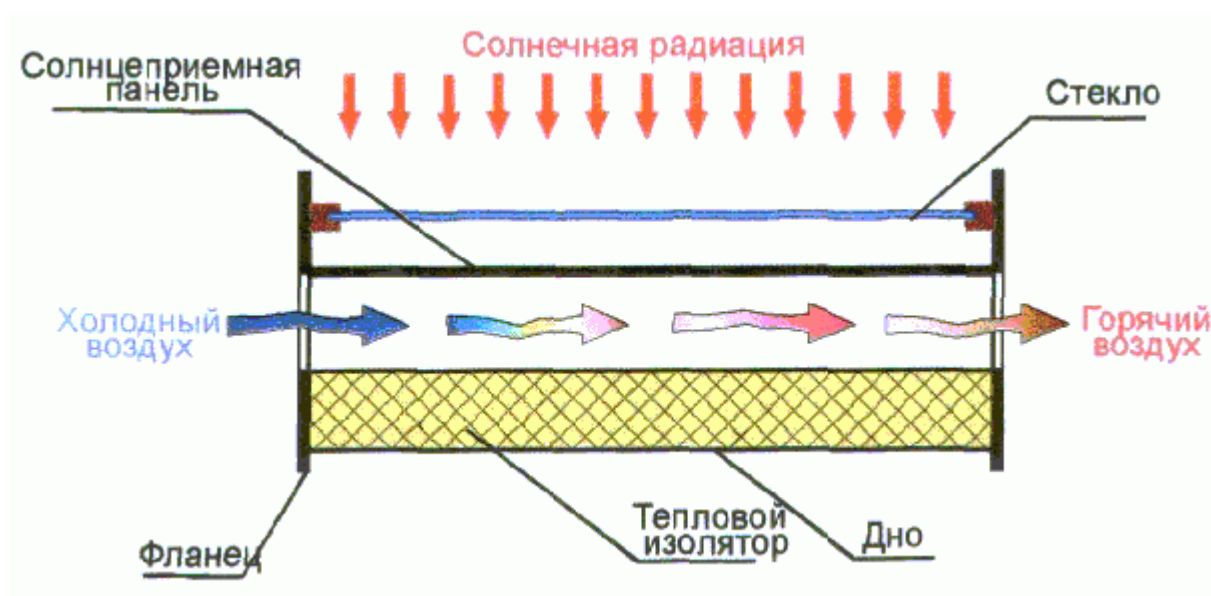


Рисунок 1.9 – Схема работы воздушного солнечного коллектора

Воздушный коллектор работает при значительно меньших температурах, для начала работы ГС температура на коллекторе должна быть 25 – 30 °С. Снижение тепловых потерь повышает эффективность системы. Однако ввиду того, что теплопроводность воздуха мала применение таких систем весьма ограничено [14].

Благодаря воздушным коллекторам можно добиться значительной экономии энергоресурсов в системах воздушного отопления.

Преимущества воздушных коллекторов: простота; дешевизна; эффективность при использовании в системах сушки.

Недостатки воздушных коллекторов: низкие теплоёмкость воздуха и КПД, что приводит к увеличению габаритов установок; интегрирование коллектора в обогреваемом помещении для увеличения эффективности [14].

1.3.2 Вакуумные солнечные коллекторы

В основе конструкции вакуумного солнечного коллектора (ВСК) заложена система изоляции медного абсорбера. Каждая медная трубка вставлена в запаянный по концам стеклянный сосуд цилиндрической формы и имеет свою собственную изоляцию. Вакуум – теплоизолирующий материал, не проводит теплоту, полностью исключая потери на конвекцию и теплопроводность, сводит общие тепловые потери коллектора к минимуму. Это обеспечивает высокий КПД коллектора даже при слабом рассеянном солнечном излучении в облачный день, а также при отрицательной температуре наружного воздуха [16].

По сравнению с другими типами коллекторов, ВСК производят на 30 – 40% больше тепловой энергии в течение года.

Стеклянные трубы ВСК позволяют солнечным лучам всегда падать на приёмную поверхность медных трубок под прямым углом, сводя отражения к минимуму. Трубки выполнены из ударопрочного стекла, способного выдержать удары града даже большого размера или падение коллектора с небольшой высоты. За счёт минимальной толщины стенок стеклянных трубок ВСК обладают наименьшей тепловой инерцией. Благодаря этому он намного быстрее освобождается от оледенения, инея, снега.

Трубки абсорбера выполняются U-образной формы, или коаксиально, то есть в виде двух трубок разного диаметра, вставленных друг в друга. По внутренней трубке вниз подаётся холодная жидкость, нагревающаяся по мере движения. Частично прогретая вода устремляется вверх по наружной трубке,

где сильнее нагревается и часть своей теплоты отдаёт внутренней трубке, которая греет очередную порцию воды [16].

Различают ВСК [16]:

- с прямой теплоотдачей воде;
- с прямой теплоотдачей воде и встроенным теплообменником;
- с термотрубками.

Первый тип еще называют термосифонными системами, так как работают на принципе естественной конвекции, преимущество которых является непосредственная передача теплоты воде без участия других элементов.

Второй тип имеет все преимущества предыдущего типа ВСК.

Отличием является наличие встроенного в бак эффективного теплообменника, что позволяет подсоединить коллектор с баком к напорной сети водоснабжения. Возможность работы при небольших минусовых температурах, если в водонагревательный контур добавить незамерзающей жидкости. Так как расходующаяся вода проходит только по внутреннему медному теплообменнику, объем ТН постоянен, в коллекторе не откладываются соли жесткости и другие загрязнения.

Главный элемент третьего типа ВСК – термотрубка – закрытая медная труба с небольшим содержанием легкокипящей жидкости, работа которых основана на принципе тепловой трубы. Основным преимуществом такого типа ВСК является испарение жидкости при температуре около 30°C, а при меньшей температуре трубка «запирается» и дополнительно сохраняет теплоту [16].

Для ВСК выделяют следующие преимущества [17]:

- высокие рабочая температура и КПД;
- отсутствие вероятности заморозки (для пароконденсатных);
- способность улавливать прямую и рассеянную радиацию;
- стационарная установка без применения гелиоследящих устройств;
- отсутствие условий для коррозии.

Недостатками ВСК являются:

- хрупкость светопрозрачного листового покрытия;
- небольшая площадь абсорбера;
- отношение апертурной площади к общей площади плоского СК;
- высокая стоимость;
- невозможность реализации режима принудительной оттайки выпавшего снега без внедрения дополнительных систем.

1.3.3 Плоские солнечные коллекторы

Плоские солнечные коллекторы (ПСК) максимально просты и надёжны, срок эксплуатации достигает 50 лет. Это незначительной толщины прямоугольного вида панели с размером около двух квадратных метров. КПД достаточно высок за счёт больших поглощающих площадей [18, 19].

ПСК состоят из нескольких слоев (рисунок 1.10):

- прозрачный внешний слой (закалённое стекло);
- поглощающий рабочий слой (покрыт чёрной краской или специальным селективным покрытием);
- светоотражающий слой (эффективность поглощения возрастает до 95%, используется не всегда);
- слой термоизоляции (например, полиизоцианурит).

Для прозрачного слоя кроме стекла может применяться особый рифленый поликарбонат. В самом простом исполнении – пара поликарбонатных листов, закрепленных на алюминиевой раме.

Абсорбер – ключевая часть ПСК. В нем происходит процесс преобразования солнечной энергии в тепловую энергию, которая передается с поверхности абсорбера ТН. Изготавливают из различных материалов: медь, алюминий, стекло, может иметь различную форму. Для максимального поглощения солнечного излучения на абсорбер наносят специальное поглощающее селективное покрытие [20].

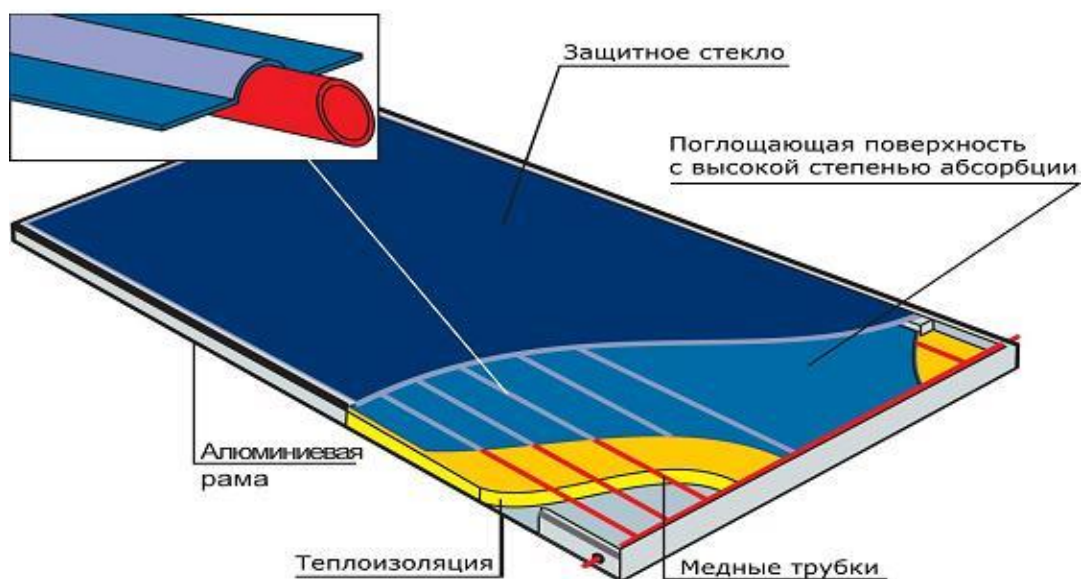


Рисунок 1.10 – Схема плоского солнечного коллектора

Используют абсорберы перьевого или цельнолистового типов [4].

В перьевых абсорберах к отдельным пластинам прикреплены трубки, которые соединяются между собой в виде арфы. Такое соединение называют коллекторным типом.

В цельнолистных абсорберах система распределения ТН может быть в виде меандра или же трубок коллекторного типа.

Корпус ПСК предназначен для соединения в одно целое всех его частей, надёжной защитой от неблагоприятных природных явлений и присоединения коллектора к конструкции дома. Чаще всего его выполняют из анодированного алюминия в виде рамки, обратная сторона которой закрывается плоской панелью из алюминия или пластика для облегчения веса. В корпусе встроены два патрубка из меди или сшитого полиэтилена, через которые входит и выходит ТН [4].

В работе [17] выделяют следующие преимущества ПСК:

- большая площадь абсорбера;
- отношение апертурной площади к общей площади;
- низкая стоимость, простота изготовления;

- способность улавливать прямую и рассеянную радиацию;
- стационарная установка без применения гелиоследящих устройств;
- возможность реализации режима принудительного оттаивания выпавшего снега без внедрения дополнительных систем;
- стоимость ГУ можно существенно уменьшить путем совмещения конструкции кровли с ПСК.

К недостаткам ПСК относят [17]:

- хрупкость светопрозрачного листового покрытия;
- низкий КПД при высоких температурах абсорбера;
- возможность замерзания ТН зимой;
- максимальная рабочая температура ТН не превышает 100 °С)
- коррозия.

1.4 Приближенная методика расчета характеристик солнечных водонагревательных установок

ПСК почти всегда устанавливаются неподвижно, их ориентация оптимизируется для конкретного места его расположения и для времени года, в течение которого планируется работа СВУ [21].

Геометрические соотношения между положением плоскости, определенным образом ориентированной относительно Земли в какой-либо момент времени и направлением прямого солнечного излучения, то есть положение Солнца относительно этой плоскости.

При расчете ПСК необходимо знать, сколько солнечной энергии попадает на его поглощающую панель. Падающее солнечное излучение содержит три составляющих излучения, прямое, рассеянное и отраженное от земной поверхности, причем каждая составляющая рассматривается отдельно [21].

При падении прямой солнечной радиации на стекло (прозрачную изоляцию) показатели преломления излучения в стекле (n_1) и воздухе (n_2), углы падения и преломления Θ_1 и Θ_2 по закону Снеллиуса связаны таким образом [21]:

$$n_1 \cdot \sin(\Theta_1) = n_2 \cdot \sin(\Theta_2). \quad (1.1)$$

При нормальном падении излучения к плоскости стекла, с учетом того, что одной из сред является воздух, показатель преломления которого имеет значение, близкое к 1, соотношение принимает вид:

$$r(0) = \left(\frac{n_2 - 1}{n_2 + 1} \right)^2. \quad (1.2)$$

В таблице 1.1 представлены средние значения показателей преломления n_2 для некоторых материалов прозрачных покрытий [21].

Таблица 1.1 Показатели преломления некоторых материалов покрытий

Материал покрытия	Среднее значение n_2
Стекло	1,526
Полиметилметакрилат	1,49
Поливинилфторид	1,45
Полифторированный этиленпропилен	1,34
Поитетрафторэтилен	1,37
Поликарбонат	1,60

Коэффициент поглощения солнечного излучения прозрачной изоляцией (стеклом):

$$\tau_\alpha = \exp\left(\frac{K \cdot L}{\cos(\Theta_2)}\right), \quad (1.3)$$

где K – удельный коэффициент поглощения солнечного излучения стеклом;
 L – толщина стекла.

В работе [21] отмечено, что пропускательная способность прозрачного покрытия для рассеянной солнечной радиации равна

пропускающей способности прямого солнечного излучения, падающего под углом 60° .

При расчетах тепловых процессов в коллекторах применяется понятие приведенной поглотательной способности $(\tau\alpha)$,

где τ – пропускающая способность покрытия при определенном угле падения;

α – направленная поглотательная способность абсорбера.

Таким образом, приведенная поглотательная способность $(\tau\alpha)$ является свойством системы: покрытие – абсорбер, а не произведением значений двух свойств и определяется при многократном отражении по формуле [21, 22]:

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho_d}, \quad (1.4)$$

где ρ_d – величина, характеризующая отражение рассеянного солнечного излучения от тыльной стороны прозрачного покрытия.

Значение поглощенной абсорбером суммарной солнечной радиации определяется по формуле [21, 22]:

$$I_s = I_p \cdot R_p \cdot (\tau\alpha)_p + I_r \cdot (\tau\alpha)_r \cdot \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + I_s \cdot \rho_q \cdot (\tau\alpha)_q \cdot \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right), \quad (1.5)$$

где I_p – прямая солнечная радиация;

R_p – отношение месячной прямой солнечной радиации на коллекторную и на горизонтальную поверхности; $(\tau\alpha)_p$

$(\tau\alpha)_r$, $(\tau\alpha)_q$ – приведенные поглотательные способности для прямой, рассеянной и отраженной солнечной радиации;

I_r – рассеянная солнечная радиация;

$1 + \cos(\beta)$, $1 - \cos(\beta)$ – угловые коэффициенты облучения СК небосводом и земной поверхностью;

I_s – суммарная солнечная радиация, падающая на абсорбер;

ρ_q – величина, характеризующая долю отраженной от земной поверхности солнечной радиации.

Для стационарного состояния СК уравнение теплового баланса имеет вид [21, 22]:

$$Q_{CK} = A_C \cdot [I_S - U_L \cdot (T_{pm} - T_a)], \quad (1.6)$$

где Q_{CK} – полезная тепловая энергия на выходе из СК;

A_C – площадь СК;

U_L – коэффициент тепловых потерь;

T_{pm} , T_a – средние температуры абсорбера и окружающей среды.

Данное уравнение показывает как энергия подающего солнечного излучения распределяется между полезной энергией, тепловыми и оптическими потерями.

Основным показателем эффективности СК является КПД.

КПД СК – это соотношение полезной термической энергии и получаемой солнечной энергии, без тепловых потерь (в некоторых случаях происходят оптические потери) [23].

Физический смысл КПД – отношение тепловой энергии, которая отводится от абсорбера с помощью теплоносителя, циркулирующего через коллектор, к падающей на него суммарной лучистой энергии [23].

$$\eta = \frac{\int Q_{CK} dt}{A_C \cdot \int I_S dt}. \quad (1.7)$$

Полезная выработка тепла гелиоустановкой:

$$Q_{CK} = A_C \cdot F_R \cdot [I_S - U_L \cdot (T_{pm} - T_a)], \quad (1.8)$$

где F_R – коэффициент отвода тепла от коллектора, определяется по формуле:

$$F_R = \frac{m_K \cdot c_p}{A_C \cdot U_L} \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{A_C \cdot U_L \cdot F'}{m_K \cdot c_p} \right) \right], \quad (1.9)$$

где m_K – расход теплоносителя через СК;

c_p – теплоемкость теплоносителя;

F' – коэффициент эффективности СК:

$$F' = U_0 / U_L,$$

где U_0 – термическое сопротивление воздуха.

Для определения мгновенного значения КПД СК используют выражение [21, 22]:

$$\eta = \frac{Q_{СК}}{A_c \cdot I_s} = \frac{F_R \cdot I_s \cdot (\tau\alpha) - U_L \cdot (T_i - T_a)}{I_s}. \quad (1.10)$$

Действительное значение КПД ПСК [24]:

$$\eta = \frac{c_p \cdot \rho \cdot G \cdot (T_2 - T_1)}{q \cdot S} \quad (1.11)$$

где c_p – теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

ρ – плотность воды, кг/м³;

G – расход воды, кг/с;

T_1, T_2 – температуры ТН на входе и выходе из коллектора, К;

q – плотность потока излучения, Вт/м²;

S – габаритная площадь поглощающей панели СК, м².

Так как солнце в течение дня меняет свое положение, следовательно, меняется угол падения солнечной радиации (α) на ПСК, поэтому в знаменателе учтен α и коэффициент отражения ($k_{отр}$), тогда формула (1.11) преобразуется:

$$\eta = \frac{c_p \cdot \rho \cdot G \cdot (T_z - T_x)}{q \cdot (1 - k_{отр}) \cdot \sin(\alpha) \cdot S}, \quad (1.12)$$

Таким образом, расчет КПД осуществлен по формуле (1.12). Это позволяет рассчитать более точное значение КПД ПСК.

2. ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объект исследования

Основной целью данного исследования является проведение комплексной оценки эффективности использования ГУ для теплоснабжения зданий. Основным элементом ГУ, нагревающий ТН для ГВС, является СК. Поэтому объектом исследования выбран ПСК, на основании его простоты конструкции и эксплуатации, долговечности.

Главная деталь СК – это поглотитель солнечной энергии (абсорбер). В данном случае материал абсорбера – фольгированный утеплитель из вспененного полиэтилена. В него интегрированы медные трубки, через которые протекает ТН, воспринимающий от абсорбера теплоту, тем самым нагревающий воду. Защитное стекло из светопрозрачного материала – сотового поликарбоната. Теплоизоляция осуществлена с помощью фанеры ФК, обладающей высокой прочностью и влагостойкостью.

2.2 Алгоритм решения задачи теплопроводности

Для анализа нагрева воды в СК для ГВС в настоящей работе используется математическое моделирование, которое разделяется на следующие этапы [25]:

1. Физическая постановка задачи;
2. Создание или формулировка математической модели;
3. Выбор численного метода
4. Создание алгоритма;
5. Написание, отладка и тестирование программы;
6. Многовариантные расчеты по отлаженной программе;
7. Анализ полученных результатов;

8. Внедрение полученных результатов.

Как говорилось ранее, объект исследования – ПСК, на который действует прямой солнечный поток.

Математическое моделирование сведено к решению системы двумерных нестационарных уравнений теплопроводности с граничными и начальными условиями. Для ее решения применен метод конечных разностей.

Разностные аналоги дифференциальных уравнений решены на основе локально – одномерного метода А. А. Самарского, являющегося абсолютно устойчивым, обладающим свойством суммарной аппроксимации [25]. Одномерные разностные уравнения решены методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы (рисунок 2.1), где со старого временного слоя берется одна точка, на новом временном слое берутся три точки, для определения поля температур решена система линейных алгебраических уравнений.

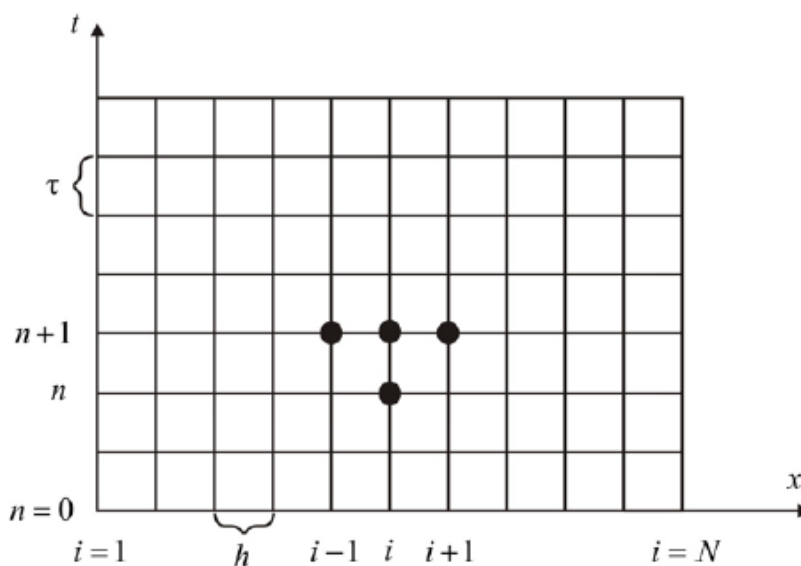


Рисунок 2.1 – Шаблон неявной четырехточечной разностной схемы

При решении задач теплопроводности методом конечных разностей (МКР) твердое тело представляется в виде совокупности узлов. Частные производные дифференциального уравнения аппроксимируются, то есть

заменяются конечными разностями, в результате получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), из численного решения которой определяется температура, как локальная характеристика в каждом узле сетки [26].

Уравнение теплопроводности для исследования:

$$\rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right). \quad (2.1)$$

Для аппроксимации дифференциального уравнения (2.1) разностным методом вводится пространственно – временная сетка с координатами:

$$x_i = (i-1) \cdot h_x,$$

$$y_j = (j-1) \cdot h_y,$$

$$t_n = n \cdot \tau,$$

где h_x, h_y – шаги по координатам x и y ; τ – шаг по времени.

Область определения i, j и n находятся в пределах: $i = \overline{1, N_x}$; $j = \overline{1, N_y}$; $n = \overline{0, K}$.

Расчетная область покрывается сеткой (рисунок 2.2).

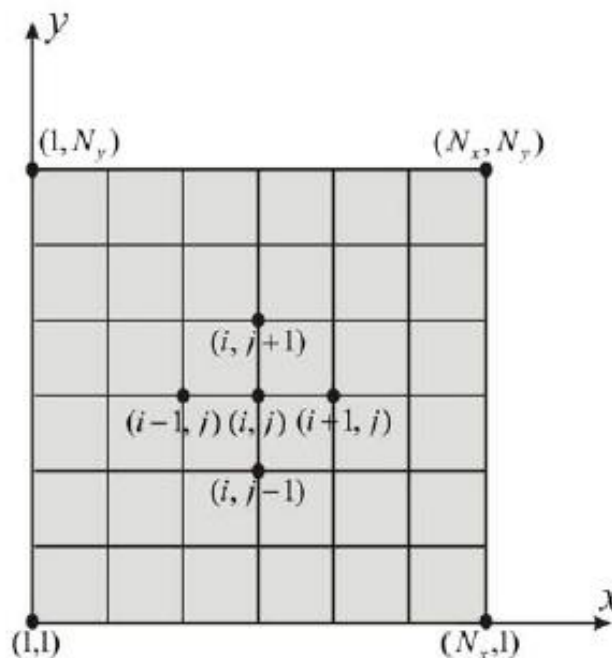


Рисунок 2.2 – Разностная сетка области решения

Локально-одномерный метод А. А. Самарского реализуется в два этапа. На первом промежуточном этапе, в двумерном уравнении температура изменяется только в направлении оси x , т.е. получаем одномерное уравнение. После решения которого приступаем ко второму этапу, проводится дискретизацию уравнения по направлению y , решая полученное одномерное уравнение, определяем поле температуры на целом шаге по времени [26].

Получаем:

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - T_{i,j}^n}{\tau} = \lambda \cdot \left(\frac{T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - 2 \cdot T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{h_x^2} \right), \quad (2.2)$$

$$\rho \cdot c \cdot \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\tau} = \lambda \cdot \left(\frac{T_{i,j+1}^{n+1} - 2 \cdot T_{i,j}^{n+1} + T_{i,j-1}^{n+1}}{h_y^2} \right). \quad (2.3)$$

Разностные уравнения (2.2) и (2.2) сводятся к стандартному трехдиагональному виду и решаются последовательно методом прогонки. Сначала для всей области решается уравнение (2.2), после чего переходим к решению уравнения (2.3).

Рассмотрим решение уравнения (2.2) методом прогонки.

$$A_i \cdot T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \cdot T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \cdot T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = F_i. \quad (2.4)$$

где $A_i = C_i = \frac{\lambda}{h_x^2}$, $B_i = \frac{2 \cdot \lambda}{h_x^2} + \frac{\rho \cdot c}{\tau}$, $F_i = -\frac{\rho \cdot c \cdot T_{i,j}^n}{\tau}$.

Система (2.4) имеет трехдиагональную структуру, решаем ее на каждом шаге по времени.

Трехточечное уравнение второго порядка преобразуется в двухточечное уравнение первого порядка [25]:

$$T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \alpha_i \cdot T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + \beta_i \quad (2.5)$$

Уменьшив индекс в уравнении (2.5) на единицу, $T_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}} = \alpha_{i-1} \cdot T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + \beta_{i-1}$, подставляем данное уравнение в (2.4):

$$A_i \cdot T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - B_i \cdot T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \cdot \alpha_{i-1} \cdot T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_i \cdot \beta_{i-1} = F_i.$$

Из уравнения получаем:

$$T_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}} \cdot T_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}.$$

$$\text{где } \alpha_i = \frac{A_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}, \beta_i = \frac{C_i \cdot \beta_{i-1} - F_i}{B_i - C_i \cdot \alpha_{i-1}}.$$

Для определения α_i и β_i необходимо знать первые прогоночные коэффициенты, которые находятся из левого граничного условия.

Из правого граничного условия находим значение температуры $T_{N_x,j}^{n+\frac{1}{2}}$.

Далее по формуле (2.5) находим поле температур.

После этого приступаем к решению уравнения (2.3). Этапы решения аналогичны решению уравнения (2.2).

Таким образом, решение методом прогонки сводится к нахождению прогоночных коэффициентов (прямая прогонка), определение неизвестных температур (обратная прогонка) [24].

3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1 Физическая постановка задачи

Проанализируем процесс теплопереноса в СК, представляющий собой совокупность нескольких слоев с различными теплофизическими характеристиками (рисунок 3.1).

Математическая модель разработана с учетом следующих предположений и допущений:

1. Рассматривается одна панель ПСК.
2. ПСК состоит из шести слоев, шестой из которых ТН, теплофизические характеристики слоев представлены в таблице 3.1.
3. Теплофизические свойства воды и воздуха не изменяются в зависимости от температуры окружающей среды.
4. Полная солнечная радиация используется без учета потерь в окружающую среду.
5. Расчет ведется с учетом изменения положения солнца, учитывается угол наклона солнечной радиации.

Таблица 3.1 – Теплофизические характеристики материалов

	Плотность, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Удельная теплоемкость, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	Коэффициент теплопроводности, $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Верхняя крышка	170	1170	0,2
Воздушная прослойка	1,205	1005	0,026
Медные трубки	8930	385	390
Вода	998,2	4183	0,6
Абсорбер	37,5	1950	0,038
Нижняя крышка	550	1400	0,15

3.2 Геометрическая постановка задачи

На рисунке 3.1 представлен ПСК с геометрическими характеристиками: 2008x1093x100 мм.

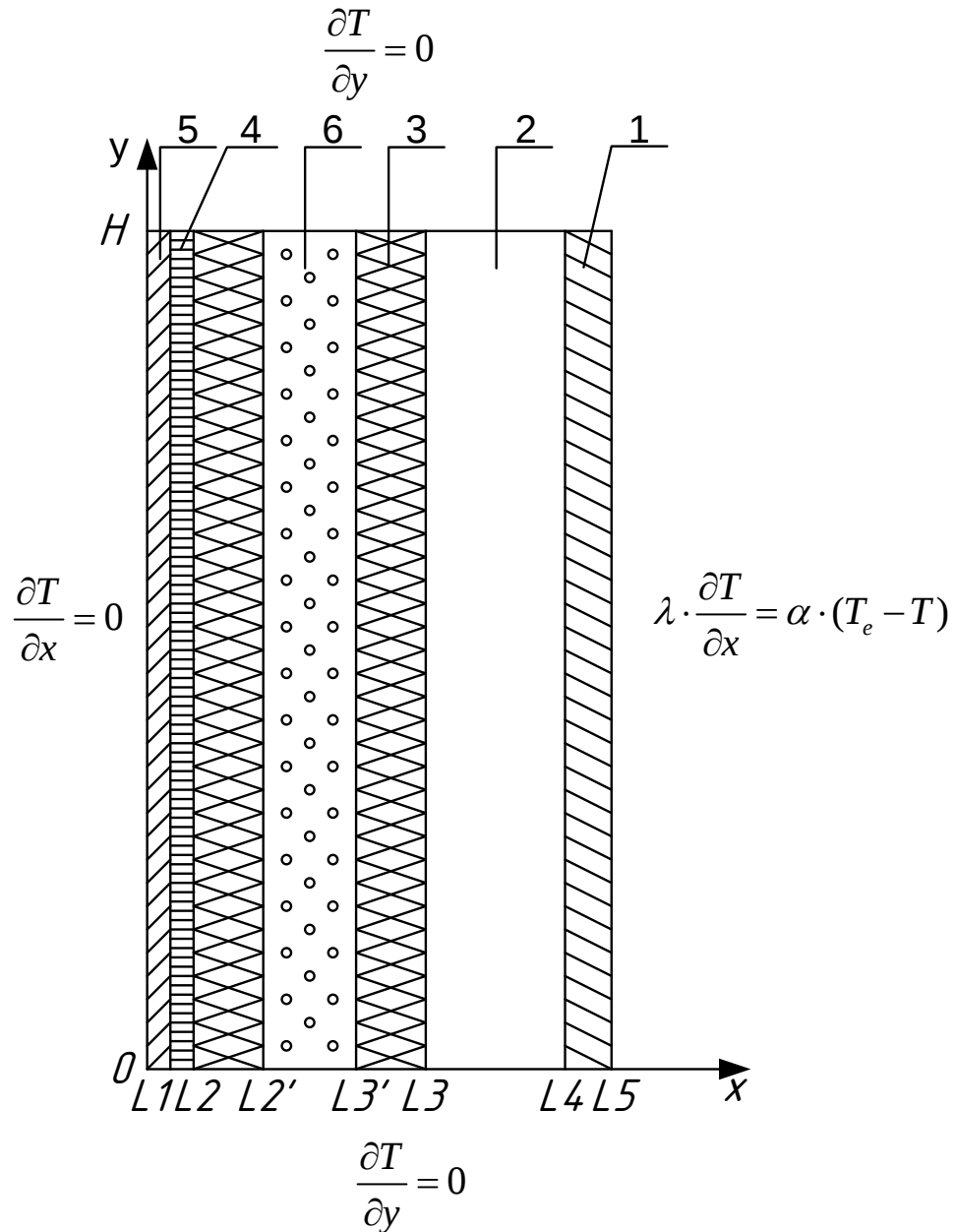


Рисунок 3.1 – Геометрическая постановка задач

1 – верхняя крышка; 2 – воздушная прослойка; 3 – медная трубка;
4 – абсорбер; 5 – нижняя крышка; 6 – вода.

3.3 Математическая постановка задачи

Математически процессы теплопереноса в ПСК могут быть описаны нестационарными дифференциальными уравнениями теплопроводности с соответствующими краевыми условиями:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \rho_1 \cdot c_1 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_1 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), & 0 < x < \ell_1, \quad 0 < y < H \\ \rho_2 \cdot c_2 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_2 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), & \ell_1 < x < \ell_2, \quad 0 < y < H \\ \rho_3 \cdot c_3 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_3 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), & \ell_2 < x < \ell_3, \quad 0 < y < H \\ \rho_6 \cdot c_6 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_6 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), & \ell_2' < x < \ell_3', \quad 0 < y < H \\ \rho_4 \cdot c_4 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_4 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), & \ell_3 < x < \ell_4, \quad 0 < y < H \\ \rho_5 \cdot c_5 \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_5 \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), & \ell_4 < x < \ell_5, \quad 0 < y < H \end{array} \right. \quad (3.1)$$

где c_i – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К);

ρ_i – плотность, кг/м³;

λ_i – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК);

T_i – температура, °С.

Под индексом: 1 – крышка (теплоизолятор) ПСК; 2 – абсорбер; 3 – медные трубки; 4 – воздушная прослойка; 5 – крышка из светопрозрачного материала (стекло); 6 – вода.

Начальные и граничные условия:

$$\begin{aligned}
t=0: T &= T_0, \quad 0 \leq x \leq L; \quad 0 \leq y \leq H; \\
x=0: \frac{\partial T}{\partial x} &= 0, \quad t > 0; \\
x=L: \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} &= \alpha \cdot (T_e - T), \quad t > 0, \quad \alpha > 0; \\
y=0: \frac{\partial T}{\partial y} &= 0, \quad t > 0; \\
y=0, \ell_{2'} < x < \ell_{3'}: T &= T_1, \\
y=L: \frac{\partial T}{\partial y} &= 0, \quad t > 0.
\end{aligned}$$

В начальный момент времени температура равна T_0 . На границах $x=0$, $y=0$ и $y=L$ ПСК теплоизолирован. На границе $x=L$ задано граничное условие III рода. На границе $y=0$, где протекает ТН граничное условие I рода. В точках контакта двух сред – граничное условие IV рода.

$$\begin{cases} T_1(t, x, y) = T_2(t, x, y), \\ -\lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial x} \Big|_{x=\ell_1} = -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\ell_1} \end{cases} ;$$

$$\begin{cases} T_2(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial x} \Big|_{x=\ell_2} = -\lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=\ell_2} \end{cases} ;$$

$$\begin{cases} T_3(t, x, y) = T_6(t, x, y), \\ -\lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=\ell'_2} = -\lambda_6 \cdot \frac{\partial T_6}{\partial x} \Big|_{x=\ell'_2} \end{cases} ;$$

$$\begin{cases} T_6(t, x, y) = T_3(t, x, y), \\ -\lambda_6 \cdot \frac{\partial T_6}{\partial x} \Big|_{x=\ell'_3} = -\lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=\ell'_3} \end{cases} ;$$

$$\begin{cases} T_3(t, x, y) = T_4(t, x, y), \\ -\lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=\ell_3} = -\lambda_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=\ell_4} \end{cases} ;$$

$$\begin{cases} T_4(t, x, y) = T_5(t, x, y), \\ -\lambda_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=\ell_4} = -\lambda_5 \cdot \frac{\partial T_5}{\partial x} \Big|_{x=\ell_5} \end{cases}.$$

Математическая модель осуществлялась в несколько этапов.

1. Расчет двумерной задачи теплопроводности для однородного тела – ПСК представлен как пластина.

На данном этапе рассматривается пластина с геометрическими размерами ПСК, с аналогичными начальными и граничными условиями, методика решения задачи представлена в п. 2.2.

2. Расчет двумерной задачи теплопроводности для совокупности пластин с различными теплофизическими характеристиками – ПСК, состоящий из нескольких слоев.

На данном этапе решение задачи проводится также численно на основе неявной разностной схемы (как в первом этапе), с учетом контакта сред с граничным условием четвертого рода.

Сначала проводится аппроксимация дифференциального уравнения конечными разностями. Получив СЛАУ вида (2.2) и (2.3), решаем методом прогонки. При нахождении прогоночных коэффициентов в области $0 < x < \ell_1$ используются характеристики среды 5, при $\ell_1 < x < \ell_2$ – среды 4, при $\ell_2 < x < \ell_2'$ и $\ell_3' < x < \ell_3$ – среды 3, при $\ell_2' < x < \ell_3'$ – среды 6, при $\ell_3 < x < \ell_4$ – среды 4, при $\ell_4 < x < \ell_5$ – среды 5.

В точке контакта двух сред используется граничное условие четвертого рода. Шаблон разностной сетки на примере воздушной прослойки и теплоизолирующей крышки представлен на рисунке 3.2.

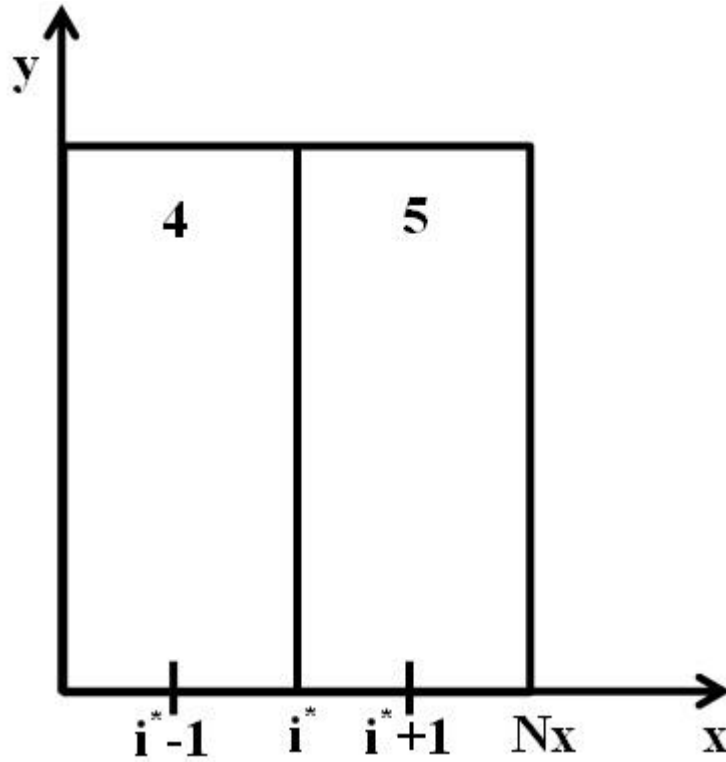


Рисунок 3.2 – Шаблон разностной сетки

Выведем прогоночные коэффициенты в точке контакта сред 4 и 5.

Граничное условие:

$$\begin{cases} T_{4,i^*} = T_{5,i^*}, \\ -\lambda_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=x^*} = -\lambda_5 \cdot \frac{\partial T_5}{\partial x} \Big|_{x=x^*} \end{cases}.$$

Рассмотрим аппроксимацию первого порядка относительно шага по пространственной координате. Принимая во внимание, что при $i < i^*$ $T = T_4$ при $i > i^*$ $T = T_5$, исключая индексы, характеризующие среду, получим следующие соотношения:

$$\begin{cases} T_{4,i^*} = T_{5,i^*}, \\ -\lambda_4 \cdot \frac{T_{4,i^*} - T_{i^*-1}}{h_x} = -\lambda_5 \cdot \frac{T_{i^*+1} - T_{5,i^*}}{h_x} \end{cases}.$$

Введем обозначение $T_{4,i} = T_{5,i} = T_i$.

Используя прогоночное соотношение $T_{i-1,j} = \alpha_{i-1} \cdot T_{i,j} + \beta_{i-1}$ из второго равенства условий получим:

$$T_{i,j} - \alpha_{i-1} \cdot T_{i,j} - \beta_{i-1} = \frac{\lambda_5}{\lambda_4} \cdot T_{i+1,j} - \frac{\lambda_5}{\lambda_4} \cdot T_{i,j}.$$

$$T_{i,j} - \alpha_{i-1} \cdot T_{i,j} - \beta_{i-1} = \frac{\lambda_5}{\lambda_5 + \lambda_4 \cdot (1 - \alpha_{N_4-1})} \cdot T_{i+1,j} - \frac{\lambda_4}{\lambda_5 + \lambda_4 \cdot (1 - \alpha_{N_4-1})}.$$

Таким образом,

$$\begin{cases} \alpha_i = \frac{\lambda_5}{\lambda_5 + \lambda_4 \cdot (1 - \alpha_{N_4-1})}; \\ \beta_i = \frac{\lambda_4}{\lambda_5 + \lambda_4 \cdot (1 - \alpha_{N_4-1})}. \end{cases}$$

В области расчета ТН задаемся граничным условием 1 рода, который в ходе исследования варьируем.

3. Расчет предыдущего этапа с учетом плотности теплового потока солнечной энергии.

Солнечный поток падает на ПСК, поглощается абсорбером, нагревая медные трубы. Принимаем, что солнечный поток полностью поглощается СК, не отражаясь от него и не теряясь в окружающую среду. В связи с этим на границе сред медной трубки и воздушной прослойки изменятся первые прогоночные коэффициенты.

Из четвертого граничного условия:

$$-\lambda_3 \cdot \frac{\partial T_3}{\partial x} \Big|_{x=\ell_3} = -\lambda_4 \cdot \frac{\partial T_4}{\partial x} \Big|_{x=\ell_4} + q_c$$

$$-\lambda_4 \cdot \frac{T_i - T_{i-1}}{h_x} = -\lambda_5 \cdot \frac{T_{i+1} - T_i}{h_x} + q_c$$

$$T_{i,j} = \frac{k_\lambda}{(1 - \alpha_{N_4-1}) + k_\lambda} \cdot T_{i+1,j} - \frac{\beta_{i-1} + \frac{q \cdot h_x}{\lambda_3}}{(1 - \alpha_{N_4-1}) + k_\lambda},$$

$$\text{где } k_\lambda = \frac{\lambda_4}{\lambda_3}$$

Таким образом,

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_i = \frac{\lambda_4}{\lambda_3 + \lambda_4 \cdot (1 - \alpha_{N_3-1})}; \\ \beta_i = \frac{\beta_{i-1} + \beta_{i-1} + \frac{q \cdot h_x}{\lambda_6}}{(1 - \alpha_{N_3-1}) + \frac{\lambda_4}{\lambda_3}}. \end{array} \right.$$

4. Расчет предыдущего этапа с учетом угла падения солнечных лучей на протяжении всего дня.

На протяжении дня солнце на небе меняет свое положение с востока (утром) на запад (вечером), следовательно, изменяется угол падения солнечных лучей, в программе это учтено. В таблице 3.2 представлены углы солнца в зависимости от часа суток.

Таблица 3.2 – Изменение угла падения солнечной радиации

Время	Угол
1	2
00:00	-12,94
01:00	-14,56
02:00	-14,08
03:00	-11,56
04:00	-7,2
05:00	-1,34
06:00	5,65
07:00	13,42
08:00	21,6
09:00	29,84
10:00	37,69
11:00	44,59
12:00	49,74
13:00	52,24
14:00	51,49

Продолжение таблицы 3.2.

1	2
15:00	47,69
16:00	41,64
17:00	34,23
18:00	26,15
19:00	17,89
20:00	9,85
21:00	2,39
22:00	-4,14
23:00	-9,37
24:00	-12,71

5. Расчет тепловых потоков солнца и воды, КПД ПСК.

Расчет КПД солнечного коллектора осуществлялся по формуле (1.12).

$$\eta = \frac{Q_{water}}{Q_{sun}},$$

где Q_{water} – тепловой поток воды, определяется по формуле:

$$Q_{water} = G \cdot c_p \cdot (T_e - T_x) \cdot \tau,$$

Q_{sun} – тепловой поток солнечного излучения, находится как:

$$Q_{sun} = q \cdot (1 - k_{omp}) \cdot \sin(\alpha) \cdot S \cdot \tau.$$

6 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

При современной экономической ситуации, росте цен на энергоносители, актуален вопрос применения возобновляемых источников энергии, в частности, использовании неиссякаемой энергии Солнца.

Солнечную энергию можно применяться практически для любых хозяйственных нужд, где требуется тепло:

- для автономного горячего водоснабжения;
- в качестве основного или дополнительного отопления жилых помещений;
- для подогрева открытых и закрытых бассейнов;
- для обогрева теплиц, производственных помещений.

В связи с тем, что в Западной Сибири наблюдается недостаток солнечного освещения, следовательно, солнечные коллекторы не могут быть использованы в полном объеме, применяются лишь для дополнительного нагрева воды в летний период.

Современные солнечные коллекторы позволяют нагревать теплоноситель до относительно высоких температур, порядка 180 °С. Средний КПД установок колеблется от 30 до 60 %. Не смотря на достигнутые в настоящее время технико-экономические показатели установок, в России солнечные коллекторы пока не получили широкого внедрения, хотя в мире применение их достаточно развито.

На сегодняшний день солнечные водонагревательные системы используются в частных домах, многоквартирных зданиях, школах, автомойках, больницах, ресторанах, в сельском хозяйстве и промышленности.

Плоские солнечные коллекторы – самый удобный, простой и экономичный вариант установки гелиосистем благодаря относительно невысоким ценам и высокой эффективности, простоте монтажа и установки.

Целью данного раздела является сравнение экономической эффективности работы плоского солнечного коллектора и электрического нагревателя.

Для реализации данной цели необходимо:

- рассчитать потребление электроэнергии на нагрев воды установленного объема с одинаковой начальной и конечной температурой.

- рассчитать возможную экономию средств, затраченных на нагрев воды за определенный период.

Определить срок окупаемости установки для нагрева воды с помощью солнечного коллектора.

6.1 Экономическая эффективность

Расход энергии для нагрева воды не зависит от того, какой вид энергии используем для нагрева. Исходя из опытов, определим количество тепловой энергии, воспринятое теплоносителем первого контура, за счет излучения солнца. Для расчета берем данные 28 апреля 2017 года, в период с 12.00 до 14.00 часов.

Количество тепловой энергии, переданное теплоносителем первого контура:

$$Q_1 = G \cdot c_p \cdot (t_1 - t_2), \quad (6.1)$$

где t_1 – температура теплоносителя на входе в аккумулирующий бак, равна 62,5 °C;

t_2 – температура теплоносителя на выходе из аккумулирующего бака, равна 31,2 °C;

$$t_{cp} = \frac{t_1 + t_2}{2} - \text{средняя температура теплоносителя,}$$

$$t_{cp} = \frac{62,5 + 31,2}{2} = 46,85 \text{ } ^\circ\text{C},$$

c_p – теплоемкость теплоносителя (антифриза) при средней температуре $t_{cp} = 46,85 \text{ } ^\circ\text{C}$ равна $3361,02 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$,

G – массовый расход теплоносителя, определяется по формуле:

$$G = \rho \cdot V, \quad (6.2)$$

где V – объемный расход теплоносителя, равен $0,8 \text{ л/мин}$, или $1,33 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$;

ρ – плотность теплоносителя (антифриза) при средней температуре $t_{cp} = 46,85 \text{ } ^\circ\text{C}$ равна $1065,41 \text{ кг/м}^3$;

$$G = 1065,41 \cdot 1,33 \cdot 10^{-5} = 0,0142 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$

Тогда количество тепловой энергии равно:

$$Q_1 = 0,0142 \cdot 3361,02 \cdot (62,5 - 31,2) = 1493,84 \text{ Вт} = 1,494 \text{ кВт}.$$

Количество тепловой энергии, воспринятое теплоносителем второго контура (нагреваемой водой):

$$Q_2 = \eta \cdot Q_1, \quad (6.3)$$

где $\eta = 0,99$ – тепловые потери при передаче тепла.

$$Q_2 = 0,99 \cdot 1,494 = 1,479 \text{ кВт}.$$

Предварительно предположив, что такая мощность солнечного коллектора может развиваться в течение шести часов в сутки на протяжении шести месяцев (с апреля по сентябрь), при этом средняя температура горячей воды будет составлять $50 \text{ } ^\circ\text{C}$, можно рассчитать выработку тепла солнечным коллектором за год:

$$Q_{год} = Q_2 \cdot \tau \cdot \varphi, \quad (6.4)$$

где $\varphi = 0,75$ – поправка на облачность.

$$Q_{\text{зод}} = 1,479 \cdot 6 \cdot 183 \cdot 0,75 = 1217,96 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

При этом расход электрической энергии на привод насоса за этот период составит:

$$Q_H = P_H \cdot \tau, \quad (6.5)$$

где $P_H = 0,1 \text{ кВт}$ – мощность насоса.

$$Q_H = 0,1 \cdot 6 \cdot 183 = 109,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Тогда стоимость затраченной энергии на нагрев воды солнечным коллектором составит:

$$Z_{CK} = Q_H \cdot T_{\text{ээ}}, \quad (6.6)$$

где $T_{\text{ээ}} = 2,17 \frac{\text{руб}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}$ – тариф на электроэнергию (Томская область).

$$Z_{CK} = 109,8 \cdot 2,17 = 238,3 \text{ руб}.$$

Если нагрев воды производить электрическим нагревателем, то для этого потребуется тепла:

$$Q_{\text{эН}} = \frac{Q_{\text{зод}}}{\eta_{\text{эН}}}, \quad (6.7)$$

где $\eta_{\text{эН}} = 0,95$ – КПД электрического нагревателя.

$$Q_{\text{эН}} = \frac{1217,96}{0,95} = 1282,06 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Следовательно, стоимость затраченной энергии на нагрев воды электрическим нагревателем составит:

$$Z_{\text{эН}} = Q_{\text{эН}} \cdot T_{\text{ээ}}, \quad (6.8)$$

$$Z_{\text{эН}} = 1282,06 \cdot 2,17 = 2782,07 \text{ руб}.$$

Примем объем нагретой воды за год равным:

$$V_{\text{зод}} = 50 \text{ м}^3.$$

Цена одного кубометра воды при нагреве солнечным коллектором:

$$C_{CK} = \frac{Z_{CK}}{V_{\text{зод}}}, \quad (6.9)$$

$$C_{CK} = \frac{238,3}{50} = 4,8 \text{ руб.}$$

Цена одного кубометра воды при нагреве электрическим нагревателем:

$$C_{ЭН} = \frac{З_{ЭН}}{V_{год}}, \quad (6.10)$$

$$C_{ЭН} = \frac{2782,07}{50} = 55,64 \text{ руб.}$$

Стоимость централизованного горячего водоснабжения составляет в открытой системе водоснабжения в доме – 95,9, в закрытой – 119,59 рубля за кубометр (цены указаны за 2016 год). Стоимость горячей воды при нагреве солнечным коллектором в значительной мере меньше централизованного горячего водоснабжения (ГВС), но при централизованном ГВС вода поступает с более высокими параметрами.

Экономия при использовании солнечного коллектора по сравнению с электрическим нагревателем за год составит:

$$\mathcal{E} = З_{ЭН} - З_{СК}, \quad (6.11)$$

$$\mathcal{E} = 2782,07 - 238,3 = 2543,77 \text{ руб.}$$

6.2 Срок окупаемости солнечного коллектора

Чтобы определить срок окупаемости установки для нагрева воды с помощью солнечного коллектора, необходимо рассчитать издержки и капитальные вложения. В таблице 1 приведена основная информация по оборудованию.

Таблица 1 – Стоимость, срок службы и норма амортизации оборудования

Оборудование	Стоимость, руб.	Срок службы, лет	Норма амортизации
Солнечный коллектор Сокол – Эффект – М	25200	15	0,07
Бак-водонагреватель ЯSOLAR 230 ST DUO TURBO	59800	10	0,1
Насосная станция циркуляционная в сборе 25/60	11500	10	0,1
Прочее	8000	15	0,07

Капитальные вложения:

$$K = \sum C_{оборуд} \quad (6.12)$$

$$K = 25200 + 59800 + 11500 + 8000 = 104500 \text{ руб.}$$

Издержки:

$$I = \sum C_{оборуд} \cdot K_{ам} + I_{пр} \quad (6.13)$$

где $I_{пр}$ – прочие издержки (стоимость использованной холодной воды за год), составляет 1365,60 руб.

$$I = 25200 \cdot 0,07 + 59800 \cdot 0,1 + 11500 \cdot 0,1 + 8000 \cdot 0,07 + 1365,6 = 10819,6 \text{ руб}$$

Срок окупаемости:

$$T = \frac{K}{I}, \quad (6.14)$$

$$T = \frac{104500}{10819,6} = 9,7 \text{ лет.}$$

6.3 Выводы по разделу

В данном разделе был произведен сравнительно – экономическая эффективность солнечного коллектора и электрического нагревателя. Расчет

показал, что применение солнечного коллектора для нагрева воды выгоднее, экономия составляет 2543,77 рубля. Но по сравнению с центральным ГВС не выгодно, так как вода к потребителю поступает с более высокими параметрами.

Расчет окупаемости солнечного коллектора показал: не смотря на высокие капиталовложения, срок окупаемости составил 9,7 лет. Данный срок можно охарактеризовать, как реальный.