

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ  
И ОБРАЗОВАНИЯ



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

КРАСНОЯРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*А.В. Бастрон, Н.Б. Михеева, Е.М. Судаев*

# ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКИХ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Красноярск 2016



ББК 38.765(2Рос-4Крн)

Б 27

*Рецензенты:*

*Л.В. Куликова*, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электрификация производства и быта» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова

*В.А. Тремясов*, канд. техн. наук, профессор кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» Политехнического института Сибирского федерального университета

*Научный редактор*

*Я.А. Кунгс*, канд. техн. наук, профессор КрасГАУ

**Б 27 Бастрон, А.В.**

**Горячее водоснабжение сельских бытовых потребителей Красноярского края с использованием солнечной энергии / А.В. Бастрон, Н.Б. Михеева, Е.М. Судаев; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2016. – 132 с.**

ISBN 978-5-94617-375-9

В монографии изложены теоретические исследования и практические рекомендации по горячему водоснабжению сельских бытовых потребителей Красноярского края с использованием солнечной энергии.

Предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов агроинженерных и энергетических специальностей высших учебных заведений, а также научных работников и специалистов агроинженерных и энергетических специальностей при прохождении ими курсов повышения квалификации по энергосбережению и использованию возобновляемых источников энергии.

ББК 38.765(2Рос-4Крн)

ISBN 978-5-94617-375-9

© Бастрон А.В., Михеева Н.Б., Судаев Е.М., 2016

© ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет», 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКИХ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	9
1.1 Солнечная энергетика в мире и в России.....	9
1.2 Обзор систем солнечного горячего водоснабжения.....	17
1.2.1 Конструктивные особенности систем солнечного горячего водоснабжения.....	17
1.2.2 Конструктивные особенности солнечных коллекторов....	18
1.3 Проблемы использования солнечной энергии для горячего водоснабжения сельских жилых домов.....	28
2 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ, РЕСПУБЛИК ХАКАСИЯ И ТЫВА.....	35
2.1 Разработка структуры моделирования влияния природно- техногенных факторов на режимы работы, энергетическую и экономическую эффективность ССГВ.....	35
2.2 Методика расчета валовых ресурсов солнечной радиации в точке $A(\varphi, \psi)$ и заданной территории $S$ для горизонтальной площадки.....	35
2.3 Обоснование модели и моделирование поля солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.....	39
2.3.1 Обоснование модели поля солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.....	39
2.3.2 Моделирование поля солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.....	44
2.4 Разработка частных квазипериодических моделей динамики солнечной радиации по актинометрическим станциям.....	46

2.5 Разработка общей модели динамики поля солнечной радиации в зависимости от географических координат установки ССГВ.....	50
<b>3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ССГВ СЕЛЬСКИХ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ.....</b>	<b>55</b>
3.1 Особенности электропотребления систем горячего водоснабжения сельских бытовых потребителей.....	55
3.2 Особенности горячего водоснабжения сельских жилых домов.....	60
3.2.1 <i>Водопотребление сельских жилых домов.....</i>	60
3.2.2 <i>Конструктивные особенности водонагревателей.....</i>	62
3.2.2.1 <i>Аккумуляционные водонагреватели.....</i>	62
3.2.2.2 <i>Проточные водонагреватели.....</i>	63
3.2.2.3 <i>ССГВ на базе солнечного коллектора «Сокол».....</i>	64
3.3 Разработка конструкций ССГВ.....	65
3.3.1 <i>Основные проблемы известных конструкций ССГВ.....</i>	65
3.3.2 <i>ССГВ-конструкции КрасГАУ.....</i>	66
3.3.2.1 <i>ССГВ для комбинированного использования нескольких возобновляемых источников энергии...</i>	66
3.3.2.2 <i>Система солнечного горячего водоснабжения с вакуумированным трубчатый солнечным коллектором.....</i>	68
3.3.2.3 <i>Двухконтурная система солнечного горячего водоснабжения.....</i>	71
3.4 Обоснование параметров и моделирование режимов работы ССГВ.....	75
3.4.1 <i>Моделирование параметров внешней среды.....</i>	75
3.4.1.1 <i>Моделирование интенсивности солнечной радиации и потока солнечной радиации за данные сутки.....</i>	75
3.4.1.2 <i>Моделирование температуры окружающего воздуха....</i>	79
3.4.2 <i>Моделирование тепловых процессов, протекающих при работе ССГВ.....</i>	83
3.4.3 <i>Моделирование теплопроизводительности ССГВ.....</i>	84
3.4.4 <i>Моделирование режимов работы ССГВ.....</i>	88

4 РАБОТА СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ.....	94
4.1 Экспериментальные исследования ССГВ на базе гелиоколлектора «СОКОЛ».....	94
4.2 Экспериментальные исследования ССГВ на базе трубчатого вакуумированного солнечного коллектора.....	101
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКИХ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ.....	106
5.1 Общие вопросы экономической оценки использования ВИЭ.....	106
5.2 Определение технико-экономических показателей ССГВ.....	107
5.3 Методика расчета себестоимости производства тепловой энергии от ССГВ для горячего водоснабжения сельского жилого дома.....	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119

## ВВЕДЕНИЕ

Развитие сельского хозяйства зависит от многих факторов, и к числу главных следует отнести создание благоприятных, комфортных условий быта на селе. При этом важным является решение проблемы обеспечения сельских жителей горячей водой для удовлетворения гигиенических и бытовых нужд, хозяйственных нужд личных приусадебных хозяйств (ЛПХ) и фермерских (крестьянских) хозяйств.

Из почти миллиона сельских жителей, проживающих в Красноярском крае, республиках Хакасия и Тыва, только небольшой процент в основном живущих в районных центрах имеет возможность круглогодично обеспечивать себя горячей водой в требуемом объеме.

Существующие на селе системы теплоснабжения, включающие и горячее водоснабжение, основаны на теплогенераторах, работающих в основном на органическом топливе. Постоянный рост цен на органическое топливо (уголь, дрова, газ, дизельное топливо, мазут) и электрическую энергию, а также перегруженность существующих сельских электрических сетей 0,38–10 кВ сдерживает внедрение систем горячего водоснабжения (СГВ) на селе.

Современный мировой опыт показывает, что одним из путей решения проблемы эффективного горячего водоснабжения коммунально-бытовых потребителей является использование солнечной энергии (СЭ). Для широкого внедрения и эффективного использования систем солнечного горячего водоснабжения (ССГВ) в сельских жилых домах, расположенных на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва, необходимо решить комплекс научных задач, связанных с изучением режимов поступления солнечной радиации на указанную территорию, обоснованием и выбором рациональных параметров и режимов работы ССГВ с учетом мест их установки.

Работа выполнена в соответствии с планом НИР КрасГАУ на 2006–2010 гг. «Горячее водоснабжение сельских жилых домов от гелиоустановок в условиях Красноярского края, республик Хакасия и Тыва».

**Целью проведения научных исследований** являлось повышение эффективности систем солнечного горячего водоснабжения сельских бытовых потребителей путем совершенствования конструкций

ССГВ и учета режима поступления солнечной радиации в условиях Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.

Для достижения указанной цели были решены следующие задачи:

- проведен анализ современного состояния вопроса использования солнечной энергии в жилых домах;
- разработана математическая модель и методика исследований поступления солнечной радиации в зависимости от географических координат установки ССГВ на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва;
- разработаны ССГВ и обоснованы их параметры и режимы работы для энергоэффективного горячего водоснабжения сельских бытовых потребителей;
- определены энергетические характеристики разработанных ССГВ в производственных условиях;
- обоснована экономическая эффективность использования СЭ в ССГВ.

**Исследованию подвергались** системы солнечного горячего водоснабжения сельских бытовых потребителей, а также зависимость параметров и режимов работы различных конструкций ССГВ от динамики распределения солнечной радиации по географическим координатам природно-климатической зоны Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.

**Методы исследования.** При выполнении вышеперечисленных работ были использованы методы математического моделирования, аппараты алгебры и линейного программирования, система компьютерной математики Maple.

**Научная новизна:**

- разработанный комплекс математических моделей, выполненных в среде Maple, необходимых для моделирования режимов работы ССГВ на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва, включающий:

- квазипериодическая модель поступления прямой, диффузной и суммарной солнечной радиации с учетом географических координат  $\varphi_A, \psi_A$  интересующей точки  $A$  на поверхности Земли;

- модель среднемесячной температуры окружающего воздуха с учетом географических координат  $\varphi_A, \psi_A$  интересующей точки  $A$  на поверхности Земли;

– модель режимов работы ССГВ с различными конструкциями солнечных коллекторов, в том числе трех оригинальных ССГВ, в климатических условиях Красноярского края, республик Хакасия и Тыва;

- экспериментальные зависимости, устанавливающие влияние параметров различных конструкций ССГВ и режимов поступления солнечной радиации на энергетические характеристики и режимы работы ССГВ.

**Практическая значимость исследований:**

– оценка солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва;

– предложенные оригинальные конструкции ССГВ сельских бытовых потребителей;

– энергетическая оценка использования ССГВ сельских бытовых потребителей в климатических условиях Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.

Результаты экспериментальных исследований, представленные в работе, получены авторами лично.

*Авторы монографии выражают глубокую благодарность научному редактору книги – заслуженному энергетику РФ, профессору Я.А. Кунгсу, за большую работу и ценные замечания, которые будут учтены при последующей работе в данном направлении.*



# 1 СОСТОЯНИЕ, ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКИХ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

## 1.1 Солнечная энергетика в мире и в России

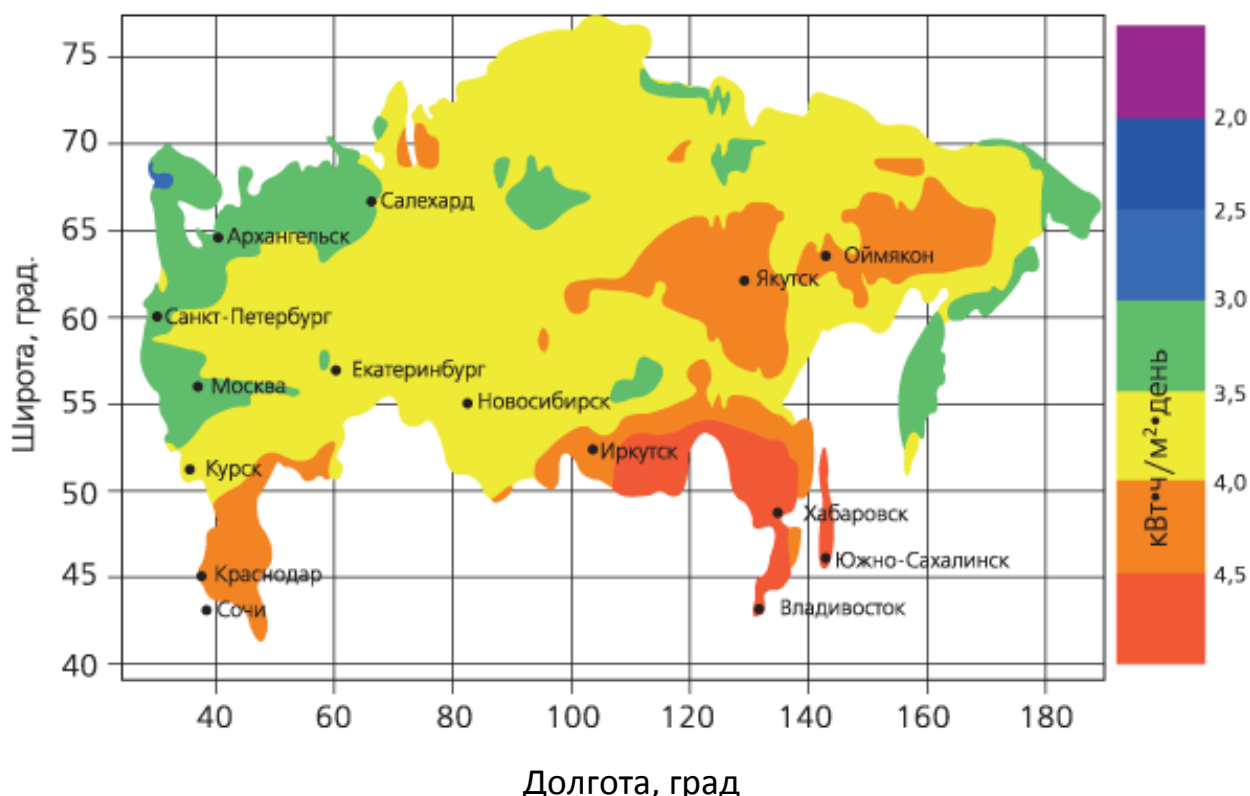
Источник солнечного излучения – Солнце, которое в каждый момент времени излучает в космическое пространство около  $4 \cdot 10^{23}$  кВт солнечной радиации [5, 81]. Количество лучистой энергии, попадающей на Землю, в энергетическом эквиваленте составляет  $10^{18}$  кВт·ч в год [5, 42, 44, 81]. Эта энергия в 50 раз превышает всю ту энергию, которую можно получить из доказанных на сегодня запасов ископаемого органического топлива, и в 35000 раз превышает нынешнее ежегодное потребление энергии в мире [42].

Вопросам анализа поступления солнечной радиации на исследуемую территорию для разных регионов России и мира в целом, а также эффективного использования солнечной энергии для горячего водоснабжения коммунально-бытовых потребителей посвящены научные исследования Р.Р.Авезова, Р.А. Амерханова, П.П. Безруких, У. Бекмана, Т.Г. Берлянд, А.А. Бурмистрова, В.А. Бутузова, М.И. Валова, В.И. Виссарионова, Дж. Даффи, Г.В. Дерюгиной, Б.И. Казанджана, С. Клейна, Ю.Г. Коломиец, С.В. Кривенковой, Л.В. Куликовой, Б.В. Лукутина, Д. Мак-Вейга, Ю.А. Меновщикова, В.А. Никифорова, З.И. Пивоваровой, О.С. Поппель, М.Д. Рабиновича, Р.Б. Салиевой, Л.А. Саплина, В.В. Стадник, Д.С. Стребкова, В.Т. Тайсаевой, Б.В. Тарнижевского, С.Н. Удалова, В.М. Усаковского, А.Д. Ушаковой, В.Я. Федянина, А.Р. Ферта, Н.В. Харченко, С.К. Шерьязова, Н.В. Цугленка и других.

Как показали исследования томских ученых [42], среднегодовая плотность потока солнечного излучения в центральной части России составляет 130–210 и 80–130 Вт/м<sup>2</sup> на севере России. Пиковая плотность потока солнечного излучения достигает 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Годовой поток солнечного излучения на территории России изменяется в широких пределах (рис. 1.1).

На 1 м<sup>2</sup> горизонтальной поверхности на северных островах и в Северо-Восточной Сибири за год поступает 550–830 кВт·ч, на большей части европейской территории и Сибири – 830–1100 кВт·ч, в южных районах Сибири и Дальнего Востока – 1100–1380 кВт·ч.

В центральной части России за летнее полугодие, когда теплопотребление минимально, на Землю поступает около  $2/3$  всего годового количества солнечной энергии, а в июле приход солнечной энергии в 5–10 раз больше, чем в декабре [6, 42]. При этом следует учесть, что поступление солнечной радиации в г. Красноярске в течение года всего лишь на 1,8 % ниже, чем на юге Германии (г. Штуттгарт), а в летние месяцы превышает аналогичные показатели (табл. 1.1).



*Рисунок 1.1 – Среднедневные суммы солнечной радиации за год, оптимально ориентированная поверхность [3]*

Экологическая чистота солнечных электростанций (СЭС) и систем солнечного горячего водоснабжения позволяет создавать архитектурные и инженерные композиции, в которых органически сочетаются природные ландшафты и среда обитания с энергетическими установками [4, 42, 116]. СЭС и ССГВ могут образовывать пространственно-архитектурные композиции, которые являются элементами фасадов и крыш зданий общественных центров, пляжей, автостоянок, кафе, магазинов, промышленных и сельскохозяйственных предприятий, жилых домов (коттеджей, сельских жилых домов) [1, 2, 22, 42, 54, 133, 134].

Таблица 1.1 – Удельная суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность, кВт · ч/(м<sup>2</sup> · день)

Месяц	Stuttgart (Германия)	Влади- восток	Хаба- ровск	Москва	Одесса	Красно- ярск
Январь	0,97	2,17	1,64	0,50	1,01	0,67
Февраль	1,66	3,11	2,72	0,94	1,50	1,61
Март	2,67	4,25	4,11	2,63	3,14	3,22
Апрель	4,06	4,69	4,61	3,07	4,08	4,34
Май	4,97	5,36	5,39	4,69	5,84	5,02
Июнь	5,41	4,69	5,86	5,44	6,04	6,05
Июль	5,44	4,31	5,42	5,51	6,59	5,61
Август	4,49	4,14	4,53	4,26	5,48	4,43
Сентябрь	3,64	4,06	3,81	2,34	4,05	2,79
Октябрь	2,22	3,17	2,56	1,08	2,53	1,61
Ноябрь	1,1	2,19	1,72	0,56	0,94	0,78
Декабрь	0,76	1,78	1,28	0,36	0,72	0,45
<b>За год</b>	<b>1137,40</b>	<b>1336,05</b>	<b>1327,83</b>	<b>954,58</b>	<b>1275,21</b>	<b>1116,91</b>

Как известно, имеются три основных направления использования солнечной энергии: прямое преобразование солнечной энергии в электроэнергию, преобразование солнечной энергии в тепловую энергию и преобразование солнечной энергии в электрическую по термодинамическому циклу (термодинамические солнечные электростанции). Наибольшее распространение в мире получили первые два направления [42].

Прямое преобразование солнечной энергии в электроэнергию осуществляется с помощью солнечных элементов, в основном солнечных фотоэлектрических элементов (СФЭ), в основу работы которых положен фотоэффект.

Во многих странах мира намечаются и проводятся грандиозные правительственные программы стимулирования развития фотоэнергетики, однако особые усилия в этой области прилагают в Китае, США, Германии, Японии и Индии [12, 13, 21]. Среди стран СНГ – в Казахстане.

По итогам 2009 г., наибольшие капиталовложения в сектор экологически чистой энергетики сделаны в Китае, который уверенно обогнал США и прочие страны: инвестиции в сектор в Китае подско-

чили за год на 50 %: с \$ 23,1 млрд до \$ 32 млрд, в то время как американские капиталовложения в сектор упали на 42 % – до \$ 18,6 млрд, что связано с давлением рецессии [85].

С марта 2010 года китайское правительство щедро одаривает национальных производителей солнечных батарей субсидиями на всех уровнях: на национальном, региональном и даже местном. Производителям дают дешевые кредиты, земли без необходимости внесения арендных платежей. Такой интерес к экологически безопасным технологиям вполне объясним: страна является главным потребителем электроэнергии в мире и, как следствие, главным его загрязнителем. Цель Пекина – начать генерировать 20 ГВт солнечной энергии к 2020 году [85].

В США с 1997 года действует программа «Миллион солнечных крыш», в рамках которой планируется установить солнечные энергосистемы на крышах одного миллиона муниципальных и частных домов. Реализация программы идет при активной поддержке правительства США, и уже сейчас установленная мощность фотоэлектрических преобразователей достигла 60 МВт [42]. Проект имеет в своем распоряжении более чем 3 млрд долл. с целью поощрения использования солнечных ресурсов и предусматривает строительство солнечных модулей общей мощностью 3000 МВт к 2017 году.

Правительством Германии были обеспечены механизмы стимулирования развития фотоэнергетики в стране. В соответствии с немецким проектом «1000 солнечных крыш», в дальнейшем сменившимся на проект «2000 крыш», были установлены фотоэлектрические преобразователи общей мощностью порядка 50 МВт. Субсидирование проектов в некоторых землях доходило до 70 % [42].

В Японии, согласно национальной программе «70000 солнечных крыш», начиная с 1994 года, ведется строительство сетевых фотоэлектрических станций на крышах жилых домов. В рамках утвержденной правительством схемы финансирования энергетических проектов с использованием фотоэлектрических станций частным покупателям предлагается субсидирование расходов на покупку системы в размере 35–50 %. Благодаря этому в настоящее время установленная мощность фотоэлектрических станций (ФЭС) в Японии составляет около 80 МВт [42].

Однако, несмотря на положительные тенденции мирового рынка, высокая стоимость электроэнергии от ФЭС сдерживает их более широкое применение. Она обусловлена дороговизной как основного

материала, так и технологического процесса. Поэтому в мире ведутся интенсивные исследования и разработки, направленные на удешевление ФЭС.

В области фотоэлектричества наиболее перспективными считаются следующие направления: ФЭС с концентраторами солнечной энергии; ФЭС на основе системы «арсенид галлия – арсенид алюминия»; тонкопленочные солнечные элементы [42, 94, 95].

Одним из перспективных направлений является создание высокоэффективных ФЭС с концентраторами солнечного излучения [12, 42, 94, 95]. Наиболее интенсивно исследования в этой области проводятся в США, России, Японии. КПД разработанных в США солнечных элементов на основе монокристаллического кремния достигает 20–25 % при концентрации в 10–100 солнц и рабочей температуре 25°C [42]. При большей концентрации эти СЭ требуют принудительного охлаждения, так как их КПД существенно снижается с ростом температуры (на 1/3 при повышении температуры на 100°C). Для работы при концентрации в 300–1000 солнц более перспективны СЭ на основе системы «арсенид галлия – арсенид алюминия», впервые разработанной в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Тонкопленочные солнечные элементы представляют большой интерес в связи с их относительной дешевизной, связанной с существенно уменьшенным использованием чувствительного материала и более дешевыми технологиями [42]. Ожидается, что в силу этих и других факторов стоимость получаемых материалов будет достаточно низкой при массовом производстве и применении СЭ. Японская компания «Kyosemi Corporation» продемонстрировала новый дизайн сферических солнечных батарей микронного размера под названием «Sphelar» [96]. Чтобы избежать зависимости эффективности плоских солнечных батарей от их положения относительно Солнца, компания предложила новый подход – солнечные батареи сферической формы, которые поглощают солнечный свет под любым углом. Это также позволит избегать дополнительных затрат энергии при реализации движения коллекторов по ходу движения Солнца. Матрица из крошечных солнечных батарей, по словам разработчика, почти на 20 % эффективнее преобразовывает энергию в сравнении с плоскими коллекторами. Гибкость позволяет применять изделие в различных масштабах и продуктах, включая мобильные электронные устройства.

В России, несмотря на имеющийся в этой области научно-технический и промышленный потенциал, ФЭС не имеют сколь-

нибудь ощутимого распространения. Суммарная установленная мощность фотоэлектрических систем в нашей стране составляет около 0,5 МВт [9, 42].

Тем не менее работы по развитию данной отрасли энергетики ведутся. В России разработана оригинальная технология изготовления СФЭ с КПД до 16 % и осуществлено ее внедрение в опытно-промышленное производство на фирме «Солнечный ветер» (г. Краснодар). Техничко-экономические показатели изготавливаемых СФЭ соответствуют лучшим образцам. Одновременно начато внедрение этой технологии в ЗАО ОКБ завода «Красное знамя» (г. Рязань). Там, под руководством Российского центра солнечной энергии «Интерсолларцентр» (г. Москва), разработан проект организации широкомасштабного производства кремния, кремниевых солнечных элементов и модулей общим объемом до 2 МВт в год [29, 42, 95].

Наибольшее распространение в России и мире получило преобразование солнечной энергии в низкопотенциальную тепловую энергию, достаточную, однако, для горячего водоснабжения и отопления [1–5, 7, 12, 13, 22, 24, 31, 33, 39, 40, 54, 62, 66, 68, 74, 76, 79, 86, 87, 89, 91, 97, 101, 104, 107–109, 111, 112, 116, 123, 126, 127, 129, 130, 132–134]. Это объясняется тем, что КПД преобразования солнечной энергии в тепловую энергию выше, чем КПД преобразования солнечной энергии в электрическую энергию. Кроме того, преобразование солнечной энергии в тепловую реализуется с помощью достаточно простых, а следовательно, и относительно дешевых технических устройств.

Общая площадь солнечных коллекторов (СК), установленных в странах ЕС к концу 2008 года, достигла 13 млн 960 тыс. м<sup>2</sup>, а в мире превысила 150 млн м<sup>2</sup> [131].

Ежегодный прирост площади солнечных коллекторов в Европе в среднем составляет 12 %, а в отдельных странах достигает уровня 20–30 % и более. По количеству коллекторов на тысячу жителей населения мировым лидером является Кипр, где 90 % домов оборудованы солнечными установками (на тысячу жителей здесь приходится 615,7 м<sup>2</sup> солнечных коллекторов), за ним следуют Израиль, Греция и Австрия. Абсолютным лидером по площади установленных коллекторов в Европе является Германия – 47 %, далее следуют Греция – 14 %, Австрия – 12, Испания – 6, Италия – 4, Франция – 3 %. Европейские страны являются бесспорными лидерами в разработке новых технологий систем солнечного теплоснабжения, однако сильно усту-

пают Китаю в объемах ввода в эксплуатацию новых солнечных установок. Статистические данные по увеличению количества вводимых в эксплуатацию солнечных коллекторов по итогам 2008 года дают следующее распределение: Китай – 78 %, Европа – 9, Турция и Израиль – 8, остальные страны – 5 %.

По экспертной оценке ESTIF (Европейская Федерация промышленности солнечных тепловых установок), технико-экономический потенциал по использованию солнечных коллекторов в системах теплоснабжения только в странах ЕС составляет 1,4 млрд м<sup>2</sup>. Они способны производить ежегодно более 680 ТВт·ч тепловой энергии. В 2010 году планировалось установить в этом регионе около 100 млн м<sup>2</sup> коллекторов.

В России масштабы применения ССГВ незначительны – действуют системы солнечного теплоснабжения с площадью солнечных коллекторов чуть более 0,1 млн м<sup>2</sup> [9, 42]. Наиболее широко солнечная энергия используется в Краснодарском крае [4, 5]. В 2001 году здесь действовало около 40 ССГВ общей площадью 3025 м<sup>2</sup>. В Республике Бурятия работают 36 гелиоустановок общей площадью 2000 м<sup>2</sup>. Они используются для горячего водоснабжения и отопления торгово-гостиничных комплексов, детских садов, учреждений здравоохранения, а также в качестве приставок к существующим котельным [42].

Объем производства солнечных коллекторов в нашей стране составляет порядка 10–20 тыс. м<sup>2</sup> в год [42]. Их выпуском занимаются Ковровский механический завод (г. Ковров, Владимирская область) и фирма «Радуга-Ц» (г. Жуковский, Московская область). Отдельные партии изготавливает НПО «Машиностроение» (г. Реутово, Московская область) [42, 102].

Средняя цена простейших американских солнечных коллекторов для нагрева бассейнов составляла в 2005 г. 20–22 \$/м<sup>2</sup>, коллекторы для систем теплоснабжения стоили 200–300 \$/м<sup>2</sup> [42]. На европейском рынке стоимость СК составляет 250–300 \$/м<sup>2</sup>.

Анализ удельной стоимости производимых в настоящее время солнечных коллекторов (табл. 1.2) показывает, что для зарубежных изделий она находится в пределах 260–300 \$/м<sup>2</sup>, а отечественных – 100–200 \$/м<sup>2</sup>. Столь высокая стоимость коллекторов объясняется тем, что для их изготовления используют металлы, в том числе и цветные [42].

Солнечный коллектор SOL 25 Plus фирмы Stiebel Eltron стоит 776 долларов (290 \$/м<sup>2</sup>), устройство ориентации для одного коллек-

тора – 64 доллара (24 \$/м<sup>2</sup>), сенсор – 13 долларов (5 \$/м<sup>2</sup>), контроллер – 159 \$, аккумуляторные баки – от 880 \$ при емкости 40 галлонов (22 \$/галлон; 6 \$/л) до 2393 \$ при емкости 158 галлонов (15 \$/галлон; 4 \$/л) [42].

Стоимость коллекторов в общих капиталовложениях в системы солнечного теплоснабжения (ССТ) составляет обычно 35–65 %.

Солнечные коллекторы Сокол-А производства НПО «Машиностроение» (г. Реутов) изготовлены полностью из алюминия и соответствуют мировым стандартам [42].

СК фирмы АЛЬТЭН (г. Москва) изготавливаются на производственной базе НПО «Машиностроение». Они несколько дороже коллекторов Сокол-А [42].

Солнечные коллекторы Ковровского механического завода отличаются низкой ценой (примерно 140 \$/м<sup>2</sup>), но одновременно большим весом и плохой теплоизоляцией [42]. Однако нельзя исключить возможность их применения в низкобюджетных схемах.

**Таблица 1.2 – Техничко-экономические характеристики зарубежных и отечественных солнечных коллекторов [42]**

Тип	Производитель (страна)	Площадь панели, м <sup>2</sup>	Цена, \$	Удельная цена, \$/м <sup>2</sup>
SECO	Solar En (Армения)	2,05	535	260
SOL 25	Stiebel Eltron (Германия)	2,7	776	290
SFB 105818	SFB (Китай)	2,6	620	240
SFB 205818	SFB (Китай)	5,2	1220	235
Сокол-А	НПО «Машиностроение» (Россия)	2,05	400	195
Альтэн-1	АЛЬТЭН (Россия)	2,6	540	205

В России производят также пластиковые коллекторы СКП-2 (г. Улан-Удэ). Они гораздо дешевле металлических, но имеют малый срок службы и низкую эффективность нагрева. Их использование рекомендуется в низкобюджетных ССТ сезонного использования.

Стоимость солнечных коллекторов может быть существенно снижена при изготовлении их из полимерных материалов. Такие коллекторы не уступают по своим техническим характеристикам коллек-



торам из металла и требуют, по сравнению с последними, в 1,5–2 раза меньше трудозатрат на изготовление [42].

Далее приведены стоимостные показатели систем солнечного горячего водоснабжения на базе СК СОКОЛ-А при разной емкости аккумуляторных баков: от 125 до 1000 литров (табл. 1.3) [42].

Тенденция последних трех лет – повышение мощности ССГВ при снижении их цены [131]. Сегодня стоимость ССГВ на базе вакуумированных солнечных коллекторов вполне сопоставима со стоимостью традиционных систем горячего водоснабжения и отопления.

Внедрение передовых вакуумных технологий будет способствовать реализации политики ресурсосбережения, принятой странами ЕС, США, Китаем, Россией и другими странами.

**Таблица 1.3 – Стоимость отдельных компонентов и в целом систем солнечного горячего водоснабжения, руб. [42]**

Оборудование	Объем бака			
	125 л	250 л	750 л	1000 л
СК	10500	21000	73000	93000
Бойлер	11500	18000	85000	96000
Насос	2800	3900	9800	9800
Контроллер с датчиками	3100	3100	3200	5000
Расширительный бак	800	820	1700	1800
Клапан предохранит.	250	250	350	350
Воздухоотводчик	150	150	250	250
Фитинги	300	330	600	600
<b>Итого, руб.</b>	<b>29400</b>	<b>47750</b>	<b>173900</b>	<b>206800</b>

## **1.2 Обзор систем солнечного горячего водоснабжения**

### ***1.2.1 Конструктивные особенности систем солнечного горячего водоснабжения***

Системы солнечного горячего водоснабжения жилых домов могут быть пассивного или активного типа [88]. В пассивных (термосифонных) ССГВ подогретый в солнечном коллекторе теплоноситель

(например, вода или антифриз) циркулирует через систему за счет естественной гравитации, возникающей при разности плотностей нагретого в СК и охлажденного в баке-аккумуляторе теплоносителя. Пассивные системы с конвекцией дешевле, чем активные системы, но и менее эффективны из-за медленной, нерегулируемой циркуляции теплоносителя в системе.

Активные системы используют электрические насосы, клапаны и контроллеры для циркуляции теплоносителя [88]. Они обычно более дорогие, чем пассивные системы, но и более эффективны. Активные системы с открытым контуром используют насосы для циркуляции воды через солнечные коллекторы и обычно имеют сезонный характер использования при положительных температурах наружного воздуха или круглогодично используются в южных странах.

В активных ССГВ с закрытым контуром теплоносителем является обычно водно-гликолиевый антифриз. Теплообменники передают тепловую энергию от теплоносителя первого контура, имеющего высокую температуру за счет его нагрева в солнечном коллекторе, воде, которая запасена в баках-аккумуляторах. Системы с закрытым контуром используются там, где продолжительно действуют отрицательные температуры наружного воздуха, так как они имеют хорошую тепловую защиту для предотвращения замораживания теплоносителя.

Для преобразования солнечной радиации в тепловую энергию теплоносителя в ССГВ используются разные виды солнечных коллекторов.

### ***1.2.2 Конструктивные особенности солнечных коллекторов***

Вплоть до 2010 года наиболее распространенными являлись плоские солнечные коллекторы как наиболее простые в изготовлении, которые находят широкое распространение и до наших дней [88]. Плоский СК состоит из элемента, поглощающего солнечное излучение, поглощающей панели (ПП), прозрачного покрытия и термоизолирующего слоя. Поглощающая панель называется абсорбером. Он связан с теплопроводящей системой. Прозрачная изоляция обычно выполняется из закаленного стекла с пониженным содержанием металлов. В плоском СК площадь «окна», через которое солнечная энергия попадает внутрь коллектора, равна площади поглощающей

поверхности, и поэтому плотность потока солнечной радиации не увеличивается.

При использовании концентраторов, т.е. оптических устройств типа зеркал или линз, достигается повышение плотности потока солнечной энергии. С точки зрения концентрации солнечной радиации наиболее эффективной формой является шар с ПП, выполненной также в форме шара [88]. Далее идут элементы конструкции СК для концентрации солнечной радиации в виде линз, парабол, полусфер, цилиндров, полуцилиндрических или цилиндро-параболических поверхностей, конусов и т.д. (рис. 1.2).

Все вероятное многообразие конструкций солнечных коллекторов полно представлено на сайте ФИПС [45] в международной патентной классификации в разделе F: ССГВ с солнечными коллекторами в виде шара могут являться частью архитектурного ансамбля здания (в виде его шпиля и т.д.) [88].

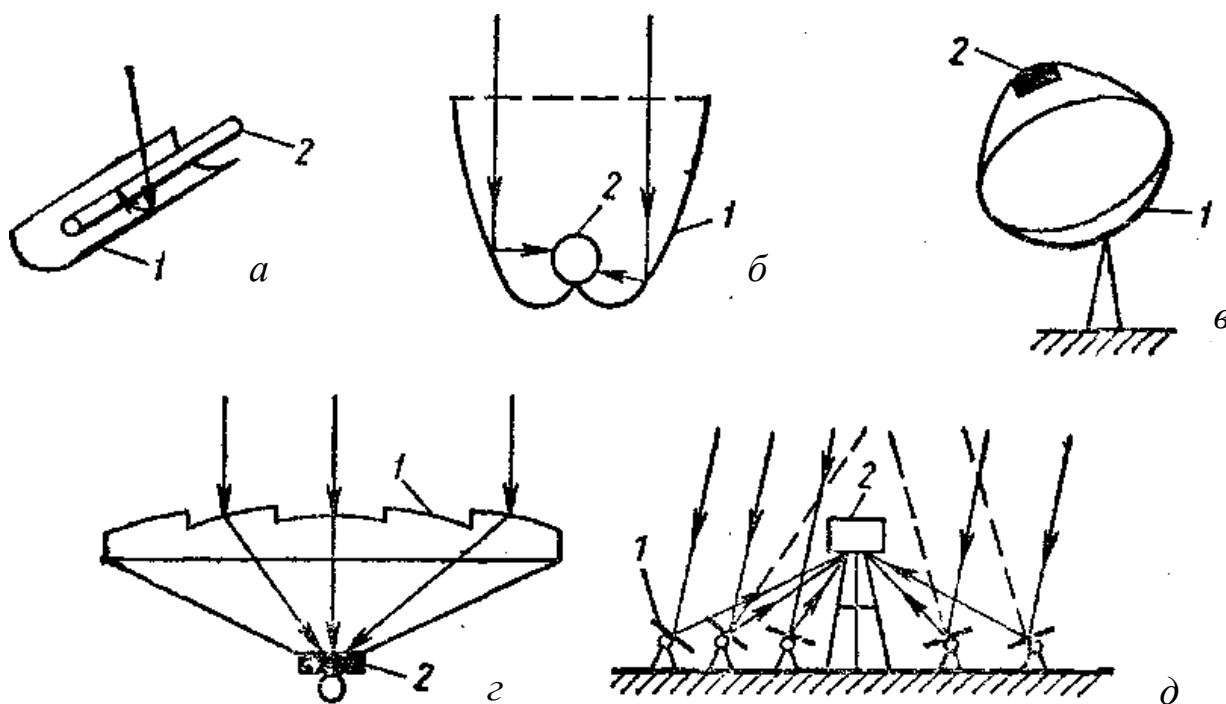


Рисунок 1.2 – Концентраторы солнечной энергии:

*а – параболо-цилиндрический концентратор с трубчатым приемником излучения; б – фоклин; в – параболоидный концентратор; г – линза Френеля; д – поле гелиостатов с центральным приемником излучения; 1 – отражатель; 2 – приемник излучения*

## **F24J 2/00 Использование солнечного тепла, например солнечные тепловые коллекторы:**

- F24J 2/04 ... тепловые солнечные коллекторы с рабочей средой, проходящей через коллектор;
- F24J 2/05 ... окруженные прозрачным ограждением, например вакуумированные солнечные коллекторы;
- F24J 2/06 ... с элементами для концентрации энергии;
- F24J 2/07 ... высокотемпературные ресиверы, например для солнечных энергетических установок;
- F24J 2/08 ... с линзами в качестве концентрирующих элементов;
- F24J 2/10 ... с отражателями в качестве концентрирующих элементов;
- F24J 2/12 ... параболическими;
- F24J 2/13 ... полусферическими;
- F24J 2/14 ... полуцилиндрическими или цилиндро-параболическими;
- F24J 2/15 ... коническими;
- F24J 2/16 ... в виде плоских пластин;
- F24J 2/18 ... с пространственно разделенными, с противоположно лежащими взаимодействующими отражательными поверхностями;
- F24J 2/20 ... с рабочей средой, проходящей между пластинами;
- F24J 2/22 ... с увеличенными поверхностями, например за счет выступов, рифлений или гофров;
- F24J 2/23 ... с рабочей средой, протекающей тонкой струей через элементы коллектора;
- F24J 2/24 ... с рабочей средой, проходящей через трубчатые каналы, поглощающие тепло;
- F24J 2/26 ... с увеличенными поверхностями, например за счет выступов;
- F24J 2/28 ... содержащие проникаемую массу, дырчатый или пористый материал;
- F24J 2/32 ... имеющие испарительную и конденсирующую секции, например тепловую трубу;
- F24J 2/34 ... содержащие массу для аккумуляции тепла;
- F24J 2/36 ... сворачиваемые или складываемые секции коллектора;
- F24J 2/38 ... использование направляющих средств;
- F24J 2/40 ... приспособления для управления;
- F24J 2/44 ... с термосифонной циркуляцией;
- F24J 2/48 ... отличающиеся поглощающим материалом;
- F24J 2/50 ... прозрачные покрытия;
- F24J 2/51 ... теплоизоляция;
- F24J 2/54 ... специально предназначенные для вращательного движения.

Принцип действия СК с концентраторами солнечной энергии такой: поглощающая панель солнечного коллектора монтируется в фокусе линзы большого размера или зеркального отражателя, а вся установка регулируется так, что на тепловоспринимающую поверхность постоянно поступает солнечное излучение. Чтобы точно сконцентрировать прямой поток параллельных лучей, отражающая поверхность в сечении должна иметь форму правильной параболы. В качестве концентраторов, следящих за перемещением Солнца по небосводу, в основном используются параболо-цилиндрические, имеющие форму водосточной трубы, или параболоидные, похожие на круглую чашу. В фокусе параболоида достигается значительная степень концентрации излучения: в солнечных печах получают температуру свыше  $2000^{\circ}\text{C}$ , а на тепловых электростанциях – более  $300^{\circ}\text{C}$ . В случае параболо-цилиндра степень концентрации солнечных лучей относительно небольшая, поэтому получаемая температура составляет  $100\text{--}200^{\circ}\text{C}$ .

Если использовать в качестве концентраторов солнечного излучения большие линзы, выполненные из толстого слоя стекла, то они будут тяжелыми и очень дорогими, поэтому обычно для этой цели применяют линзы Френеля, у которых профиль канавок, как у пластинок, получают теснением.

Существенным недостатком таких СК является необходимость использования следящего устройства, которое следовало бы за движением Солнца и ориентировало коллектор таким образом, чтобы сконцентрированное солнечное излучение постоянно поступало на ПП. К тому же фокусирующие коллекторы гораздо дороже плоских. Коллекторы с концентраторами собирают только прямое солнечное излучение, поскольку сконцентрировать таким образом удастся только параллельные лучи; рассеянное излучение эти коллекторы не фокусируют.

Однако у фокусирующих коллекторов есть и положительные стороны – существует множество способов их использования без систем слежения за Солнцем.

Первый способ состоит в установке оси параболо-цилиндрического зеркала по оси «восток-запад». Если зафиксировать угол наклона в соответствии с движением Солнца по сезонам, то отпадет необходимость почасового слежения за Солнцем и нужно будет ручным способом менять лишь угол наклона в соответствии с временем года.

Второй способ предполагает сделать внутреннюю часть зеркального отражения более глубокой, чем у параболоида, и увеличить площадь тепловоспринимающей поверхности для того, чтобы солнечные лучи, отклонившиеся от главной оси, все равно попадали на эту поверхность. Такой способ обычно применяют в коллекторах с составными параболическими концентраторами.

Вакуумированный трубчатый солнечный коллектор обеспечивает сбор солнечного излучения в любую погоду, вне зависимости от внешней температуры [131]. Коэффициент поглощения энергии таких коллекторов может достигать 97 %. Солнечные коллекторы устанавливают на крыше зданий с ориентацией на юг. ССГВ с использованием вакуумированных трубчатых солнечных коллекторов – это закрытые системы, которые могут работать под давлением.

Основные характеристики ССГВ с использованием вакуумированных трубчатых СК:

- Используются вакуумированные трубки (в некоторых конструкциях для повышения эффективности теплопередачи внутри установлен теплопроводящий стержень). Такие трубки могут работать при низких температурах (вплоть до  $-50^{\circ}\text{C}$ ) и стандартном давлении водопровода.

- Солнечный коллектор и бак-аккумулятор могут быть совмещены или расположены отдельно и соединены трубопроводом. Коллектор обычно монтируется на крыше, а бак-аккумулятор внутри здания. Именно поэтому такие системы называют сплит-системами.

- Работа системы автоматизирована специализированным контроллером.

- Теплоноситель циркулирует в системе принудительно. Для этого применяется циркуляционный насос.

Теплопроводящая трубка СК – это двойная стеклянная вакуумная трубка с закрытой медной трубкой внутри. Конструкция вакуумных труб похожа на конструкцию термоса: одна трубка вставлена в другую с большим диаметром. Между ними вакуум, который представляет совершенную термоизоляцию. Внутренняя труба покрыта специальным селективным слоем, который хорошо поглощает солнечную энергию, а вакуум препятствует потерям тепловой энергии. Медная трубка запаяна и содержит небольшой объем легкокипящей жидкости. Под воздействием солнечной радиации жидкость испаряется, пары поднимаются в верхнюю часть – накопитель, где конденсируются и передают тепловую энергию теплоно-

сителю основного контура (незамерзающей жидкости). Конденсат стекает вниз, и процесс «испарение-конденсация» повторяется. Данная трубка устойчива к замораживанию. Испарение жидкости начинается при достижении температуры внутри трубки +30°C. При меньшей температуре трубка «запирается» и дополнительно сохраняет тепловую энергию. Такие трубки функционируют и в пасмурную погоду, и при отрицательной температуре: они преобразуют прямые и рассеянные солнечные лучи в тепловую энергию.

Сравнительные характеристики солнечных коллекторов различных типов приведены в таблице 1.4. и на рисунке 1.3.

В России вакуумированные коллекторы не производятся, однако имеется возможность заказать коллекторы зарубежного производства [22, 132, 133]. Они в 2–4 раза дороже, чем алюминиевые, но их эффективность намного выше. Массовый выпуск таких коллекторов налажен в Китае, где они примерно в два раза дешевле своих европейских аналогов [54, 86, 87, 89].

Немецким институтом Institut Solare Energiesystem (Freiburg) предложена методика расчета энергетических характеристик и проведены исследования вакуумированных солнечных коллекторов серии Seido [134], производимых Beijing Sunda Solar Energy Technology Co. Ltd. (Китай) (рис. 1.4).

Таблица 1.4 – Характеристики солнечных коллекторов [88]

Тип солнечного коллектора	Рабочая температура, °С	КПД коллектора, %	Относительная требуемая площадь, %	Слежение за Солнцем
Плоский	30–100	30–50	100	Не требуется
Солнечный пруд	40–100	15–25	130	Не требуется
Центральный приемник с полем гелиостатов	До 1000	60–75	20–40	Вращение вокруг двух осей
Параболоцилиндрический концентратор	До 500	50–70	30–50	Вращение вокруг одной оси
Вакуумированный стеклянный трубчатый коллектор	90–300	40–60	50–75	Не требуется

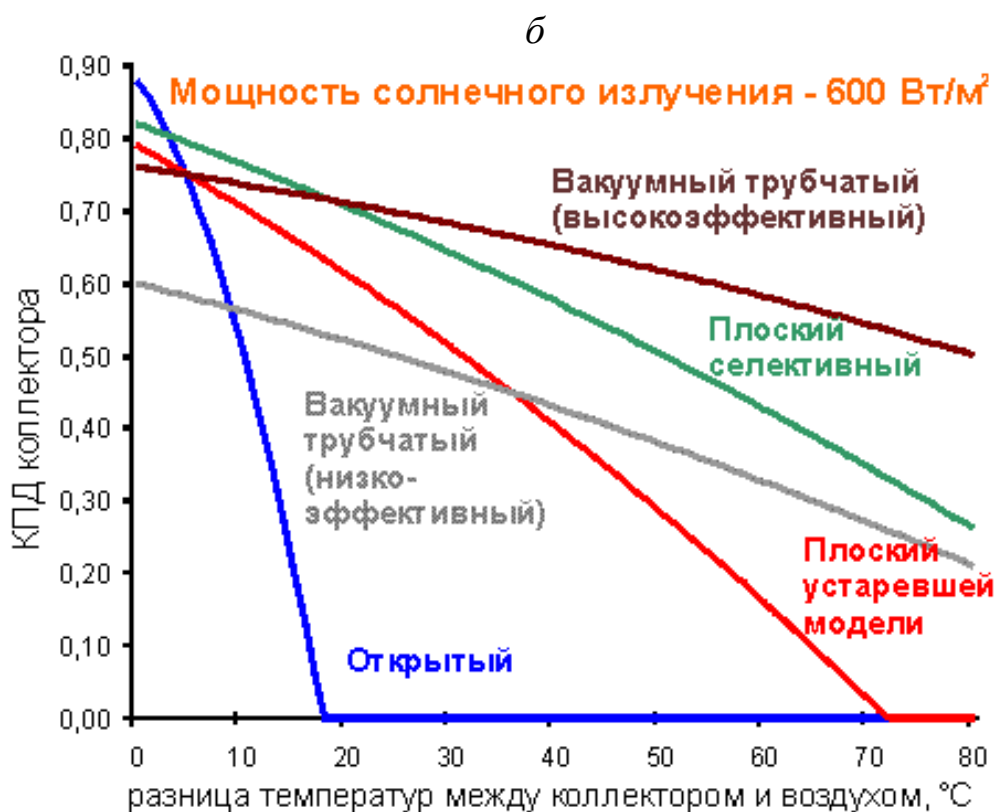
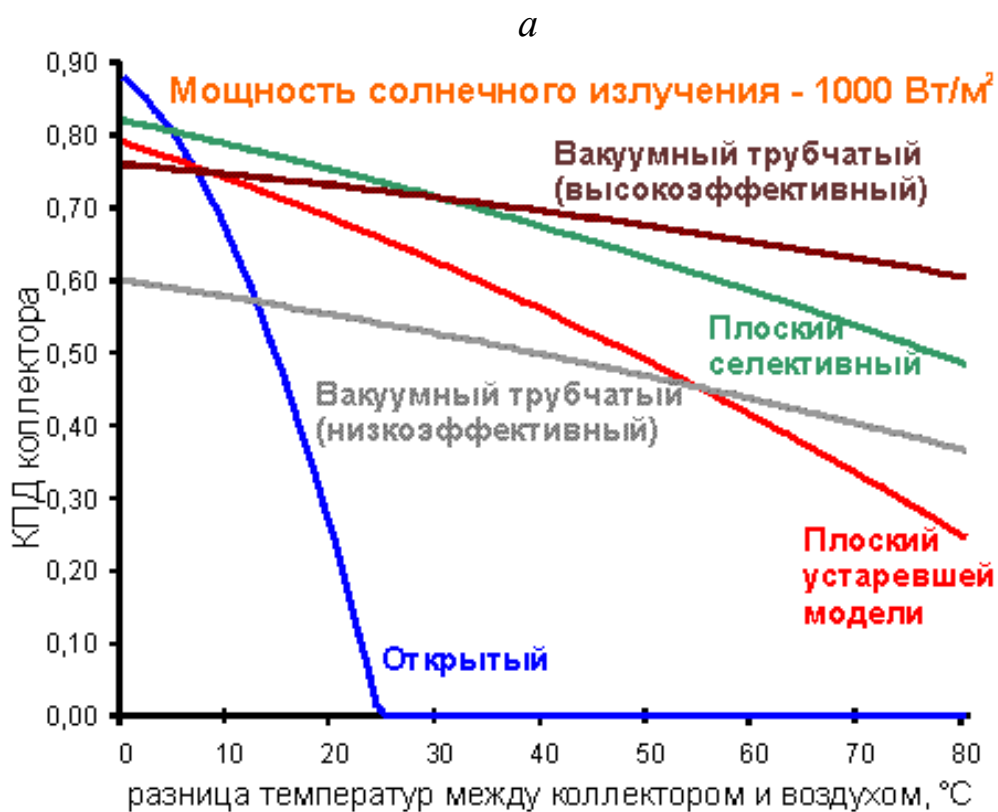


Рисунок 1.3 – Графики изменения КПД различных солнечных коллекторов от разницы температур между коллектором и воздухом при мощности солнечного излучения: *a* – 1000 Вт/м<sup>2</sup>; *б* – 600 Вт/м<sup>2</sup>





Рисунок 1.4 – Солнечный коллектор Seido 1-16

Коэффициент использования солнечной радиации (или по другому – солнечного излучения (СИ)) вакуумированного СК (коэффициент полезного действия СК) определяют по формуле [134]

$$\eta_{СК} = \eta_0 - U_{L1} \frac{T_{ср} - T_{окр}}{R_{\beta}} - U_{L2} \frac{(T_{ср} - T_{окр})^2}{R_{\beta}}, \quad (1.1)$$

где  $\eta_0$  – коэффициент полезного действия солнечного коллектора без учета потерь тепловой энергии в СК, т.е. при равенстве температур воздуха окружающей среды  $T_{окр}$  и средней температуры СК,  $T_{ср}$ ;

$U_{L1}, U_{L2}$  – коэффициенты тепловых потерь СК, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);

$R_{\beta}$  – мощность потока СР, приходящаяся на поверхность СК, наклоненную под углом  $\beta$  к горизонту, Вт/м<sup>2</sup>.

Результаты исследований СК Seido 1-16 общей площадью 2,949 м<sup>2</sup> при площади абсорбера (16 вакуумированных трубок) 2,750 м<sup>2</sup>, следующие:

$$- U_{L1} = 2,118 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С});$$

$$- U_{L2} = 0,004 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}).$$

Каждая трубка, выполненная из боросиликатного стекла, имеет длину 2114 мм при внешнем диаметре 100 мм и толщине стенки 2,5 мм. Расстояние между отдельными трубками СК – 20 мм. Материал селективного покрытия – нитрид алюминия.

Коэффициент полезного действия солнечного коллектора (без учета потерь тепловой энергии в СК)  $\eta_0$  для данного типа коллекторов равен 0,744, при этом коэффициент поглощения  $CP \geq 0,92$ , а коэффициент пропускания  $CP \leq 0,08$ .

За счет чего достигается столь высокий КПД СК? Верхняя кривая (рис. 1.5) демонстрирует возможность пассивного отслеживания Солнца с помощью трубчатых вакуумированных солнечных коллекторов [132]. При угле падения 0 градусов (полдень) Солнце перпендикулярно плоскости СК, и коллектор поглощает максимальное количество солнечной радиации. За счет пробелов между трубками некоторое количество солнечной радиации проходит сквозь коллектор. При угле около 40 град – нет пробелов между трубками, и Солнце еще перпендикулярно коллектору, что позволяет получить максимальное количество  $CP$  за счет того, что непоглощенная вакуумированной трубкой  $CP$  отражается на соседних трубках (пиковая теплопроизводительность).

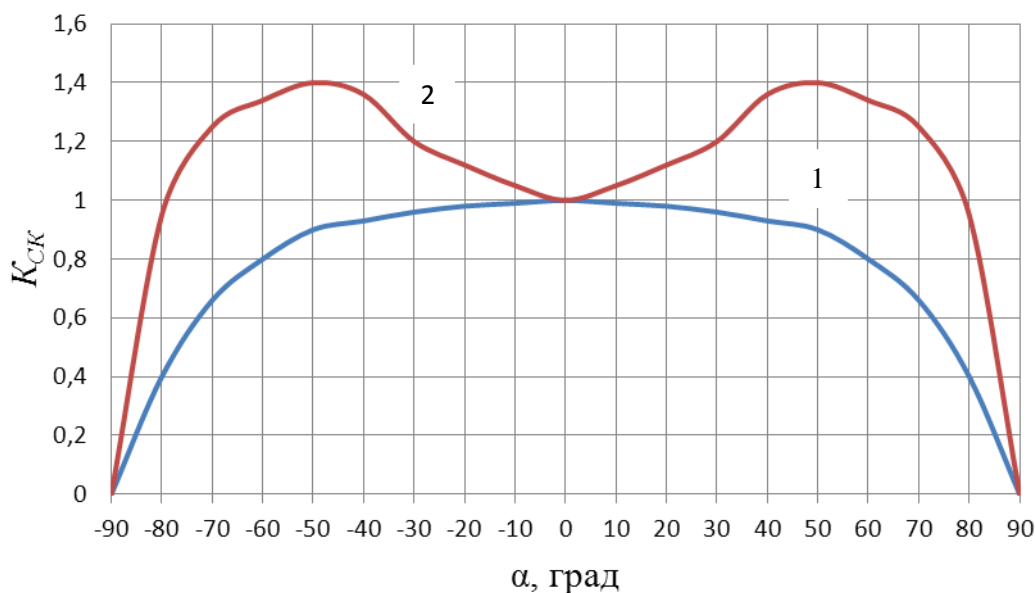


Рисунок 1.5 – Сравнение коэффициента положения солнечного коллектора  $K_{СК}$  для плоских (1) и вакуумированных трубчатых (2) СК

Как только угол падения  $CP$  больше 40 град, вакуумированные трубки начинают перекрываться и подвергаются меньшей солнечной радиации. Площадь поверхности солнечного коллектора по-прежнему поглощает  $CP$ , но производительность снижается из-за перекрытия трубок. Это оказывает минимальное влияние на общую ежедневную теплопроизводительность коллектора, потому что толь-

ко небольшой процент от солнечной радиации выходит за оптимальный угол 40 град (очень рано утром или поздно вечером).

Таким образом, за счет описанного эффекта происходит увеличение теплопроизводительности СК с вакуумированными трубками до 25 % по сравнению с плоскими коллекторами (верхняя кривая, см. рис. 1.5) с той же площадью поглотителя и при одинаковых условиях эксплуатации.

Компания «САНГЛ-РОССИЯ» в течение четырех лет тестировала в различных климатических условиях нашей страны (от плюс 35 до минус 38°C) модель системы солнечного горячего водоснабжения марки «САНГЛ» (SANGLE), и в 2007 году компания «САНГЛ СОЛАР ЭНЕРДЖИ» предоставила на российский рынок первые три модели на 160, 180 и 220 литров [89].

Краткие характеристики ССГВ «SANGLE»:

- внутренний резервуар из пищевой нержавеющей стали, без сварных швов;

- внешнее покрытие бака – сталь с особым покрытием (Япония);

- теплоизоляция внутреннего резервуара – пенополиуретановой пеной (толщиной 7 см);

- подставка и отражающие экраны позади солнечных труб выполнены из сплава алюминия;

- эквивалент одной солнечной трубки примерно 100 Вт электрической энергии. Длина трубки 1,8 м, диаметр 58 мм;

- количество солнечных труб в моделях в зависимости от объема бака: 160 л – 20 шт., 180 л – 24 шт., 220 л – 30 шт.

Контроль осуществляется цифровым пультом (контроллером):

- который позволяет пользователю выбрать три уровня заполнения резервуара;

- автоматически происходит заполнение холодной водой по достижении нижнего уровня в резервуаре;

- при понижении в зимнее время температуры воды до плюс 4°C в водоводе, находящемся вне здания (от места входа в здание до водонагревателя), контроллер дает команду нагревательному кабелю на прогрев трубы водовода (функция «Антифрост»);

- возможность подключения нагнетательного насоса и его управление;

- возможность подогрева воды электрическим нагревательным элементом, встроенным в резервуар;

- УЗО, защита от перегрева, высокой температуры (при нагреве электричеством), короткого замыкания.

### **1.3 Проблемы использования солнечной энергии для горячего водоснабжения сельских жилых домов**

Приход солнечной радиации к земной поверхности зависит от многих факторов [15, 16, 26–28, 34–36, 38, 42, 53, 60, 61, 99, 100, 103]:

- широта местности;
- время года и суток;
- прозрачность атмосферы;
- облачность;
- характер подстилающей поверхности;
- высота места над уровнем моря;
- закрытость горизонта.

Последние два фактора оказывают существенное влияние на поступающую солнечную радиацию в условиях изрезанного рельефа.

Количество радиации, получаемое земной поверхностью за сутки, зависит прежде всего от широты и времени года. На каждой широте время года определяет продолжительность дневной части суток (светового дня) и, следовательно, продолжительность притока радиации. С увеличением широты продолжительность светового дня зимой уменьшается, а летом увеличивается.

Приток солнечной радиации на горизонтальную поверхность зависит не только от продолжительности дня, но и от высоты Солнца. Высота Солнца меняется в зависимости от широты места, времени года и суток.

Зависимость прихода солнечной радиации от широты более четко прослеживается зимой: в направлении к более высоким широтам количество солнечной радиации убывает. Летом с увеличением широты местности увеличивается продолжительность дня и прозрачность атмосферы, что способствует увеличению прямой и суммарной радиации. Увеличение же облачности уменьшает прямую и увеличивает рассеянную радиацию. Поток рассеянной радиации частично компенсирует ослабление потока прямой солнечной радиации в атмосфере, но эта компенсация не является полной. Поэтому поток суммарной радиации при наличии облачности, если Солнце не закрыто облаками, будет больше, чем при безоблачном небе.

Влияние роста прозрачности в реальных условиях может перекрываться влиянием облачности на приход радиации. Уменьшение прозрачности атмосферы приводит к увеличению рассеянной радиации.

Пространственно-временное изменение солнечного излучения на Земле может квалифицировано как детерминированно-стохастический процесс [8, 28, 42, 71–73, 75, 77, 78, 80, 92, 93, 100]. С одной стороны, такие закономерные явления, как суточные, годовые и многолетние циклы солнечной активности, определяемые обращением Земли вокруг Солнца и собственной оси, а также межпланетными факторами, а с другой – случайные изменения солнечного излучения, происходящие из-за стохастической природы процессов в атмосфере (циркуляция воздушных потоков, облачность, аэрозоли, пыль и т.д.). Все это используется при изучении солнечного излучения на Земле не только детерминированных, но и вероятностных подходов. В данном случае внимание уделяется средневзвешенным значениям (или математическим ожиданиям) тех или иных показателей солнечной энергии.

Оценка потенциала солнечной энергетики основывается на многолетних данных актинометрических наблюдений на возможно большем количестве станций, распределенных довольно неравномерно по территории России. К середине 90-х годов прошлого столетия в России было около 240 метеостанций, где производились измерения прихода солнечного излучения на Землю. На 140 из них были установлены актинометры, пиранометры и балансомеры, что позволило измерять суммарную, прямую, рассеянную и отраженную от поверхности Земли мощность солнечного излучения и радиационный баланс с помощью непрерывной регистрации или срочных наблюдений, проводимых через три часа восемь раз в сутки [6, 10, 28, 92, 93]. На огромной территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва имеется лишь 11 актинометрических станций [99, 100, 103].

Однако, прежде чем использовать в дальнейших расчетах, следует оценить достоверность полученных результатов измерений с учетом погрешностей, возникающих вследствие микропогодных и микроклиматических различий, а также с учетом погрешностей измерительных приборов. Кафедрой нетрадиционных и возобновляемых источников энергии МЭИ произведена оценка погрешности в расчетах потока солнечного излучения за разные интервалы времени по четырем сезонам года и за год в целом [27, 28], которая показала, что с увеличением расчетного периода значение погрешности по всем составляющим солнечного излучения существенно уменьшается. Например, для прямой радиации при переходе от интервала времени

измерений от одних суток к одному месяцу и затем к одному году погрешность снизилась с 40 до 12 % и далее до 3 %. Следовательно, при переходе к интервалу времени 1 ч погрешности в оценке потока солнечного излучения будут еще большими. Этой же кафедрой установлено, что при доверительной вероятности 0,9 необходимое количество наблюдений за солнечным излучением будет равно 30 годам, а при вероятности 0,68 – не более 15. Для солнечных энергетических установок, работающих на автономного потребителя, требуются также данные по солнечному излучению за период не более одних суток. Расчеты показали, что при доверительной вероятности 0,9 для 35–40-летних рядов суточных измерений солнечного излучения погрешность составляет 1–3 %, а для 10-летних рядов погрешность не превышает 10 %.

Для оценки прихода солнечной радиации на определенную территорию за разные промежутки времени (час, сутки, месяц, год) строятся изолинии прихода, например суммарной солнечной радиации за год на горизонтальную приемную площадку, которые наносятся на план с учетом географических координат местности. Наличие подобных топограмм для разных временных периодов может дать весьма представительскую информацию для климатологических расчетов с точки зрения динамики изменения интенсивности и потока прихода солнечного излучения на Землю. Последнее имеет огромное значение и для чисто энергетических расчетов по проектированию и обоснованию режимов солнечных энергетических установок разного назначения.

Из вышесказанного следует, что потенциальные возможности прихода солнечной радиации определяются в основном географической широтой места. Климатические характеристики района, косвенно характеризующиеся продолжительностью солнечного сияния, вносят существенные коррективы в возможность эффективного использования энергии Солнца.

По утверждению ученых из Томска, распространенным методом описания поля суммарной радиации является полиномиальная аппроксимация [42]. Метод основан на описании участка поля метеорологической величины ( $T$ ) в окрестностях точки полиномом первого порядка

$$T(x, y) = A_0 + A_1 \cdot x + A_2 \cdot y, \quad (1.2)$$

где  $x$  и  $y$  – декартовы координаты локальной системы, причем ось  $x$  направлена на восток, а ось  $y$  на север, координаты задаются в сотнях километров;

$A_0, A_1, A_2$  – весовые коэффициенты.

Для их вычисления применяется метод наименьших квадратов, подробно изложенный во многих работах [11, 15–19, 23, 32, 42, 43, 46, 48, 50, 55–57, 69, 78, 80, 84, 99, 100, 103, 105, 118, 121, 124, 125].

Суть метода наименьших квадратов состоит в следующем: наилучшими коэффициентами аппроксимации или выравнивания считаются те, для которых сумма квадратов невязок будет минимальной [42].

$$S(A_0, A_1, A_2) = \sum_{i=1}^N [f(x_i, y_i; A_0, A_1, A_2) - T_i]^2 = \min. \quad (1.3)$$

Необходимое условие минимума функции многих переменных заключается, как известно, в том, что все ее частные производные должны равняться нулю. Отыскав частные производные по  $A_0, A_1, A_2$  и приравняв их к нулю, получим систему уравнений с тремя неизвестными [42]

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial A_0} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N (A_0 + A_1 \cdot x_i + A_2 \cdot y_i - T_i) = 0; \\ \frac{\partial f}{\partial A_1} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N (A_0 + A_1 \cdot x_i + A_2 \cdot y_i - T_i) \cdot x_i = 0; \\ \frac{\partial f}{\partial A_2} = 2 \cdot \sum_{i=1}^N (A_0 + A_1 \cdot x_i + A_2 \cdot y_i - T_i) \cdot y_i = 0. \end{cases} \quad (1.4)$$

Неизвестные коэффициенты  $A_0, A_1, A_2$ , характеризующие поле величины  $T$ , находятся решением системы линейных уравнений, в которых  $N$  – число влияющих станций, выбранных для расчета полей характеристик солнечной радиации. Суммирование прямоугольных координат локальной системы  $x$  и  $y$  ведется по всем станциям.

Координаты  $x$  и  $y$  определяются по формулам [45]:

$$x = a \cdot \cos \varphi (\psi - \psi_0); y = a \cdot (\varphi - \varphi_0), \quad (1.5)$$

где  $x$  и  $y$  – прямоугольные координаты, в сотнях километров;  
 $\varphi$  и  $\psi$  – широта и долгота станции, в градусах;

$\varphi_0$  и  $\psi_0$  – координаты начала локальной прямоугольной системы координат, в градусах;

$\varphi$  – средняя широта исследуемого района, в градусах;

$a$  – коэффициент, равный 111,2 км/градус, соответствующий средней длине одного градуса дуги меридиана.

Вышеприведенные формулы, хотя и являются приближенными, но для умеренных широт дают хорошие результаты для площадей, поперечник которых не превышает 2000–3000 км [42].

Аналитическое представление осредненных полей средних месячных величин в виде полинома позволяет оценить их горизонтальное распределение. Физический смысл весовых коэффициентов предельно прост и заключается в следующем:  $A_0$  – характеризует месячные значения метеорологической величины в начале координат ( $x = 0, y = 0$ );  $A_1$  – показывает изменение этой величины в направлении с запада на восток на 100 км, знак минус означает понижение ее с запада на восток;  $A_2$  – показывает изменение величины с юга на север на 100 км, знак минус соответствует понижению ее с увеличением широты местности.

В качестве примера обработки статистических наблюдений облачности над территорией Томской области приведена полиномиальная зависимость первой степени, отражающая среднегодовое значение общей облачности в баллах, полученная томскими учеными [42]

$$N = 6,76 + 0,02 \cdot x - 0,03 \cdot y. \quad (1.6)$$

Коэффициент 6,76 характеризует среднее годовое количество облаков в баллах (в начале локальной системы координат). Коэффициент при  $x$  показывает, что общая облачность за год имеет тенденцию к увеличению на 0,02 балла на 100 км с запада на восток. Коэффициент при  $y$  характеризует уменьшение среднего балла общей облачности на 0,03 балла с юга на север. Общий градиент увеличения облачности направлен с северо-запада на юго-восток Томской области.

Кроме прозрачности и облачности большое влияние на рассеянную радиацию оказывает характер подстилающей поверхности. По мере увеличения отражательной способности подстилающей поверхности значительно возрастает поток рассеянной радиации. При наличии снежного покрова увеличивается отражение прямой солнечной радиации, вторичное рассеяние которой в атмосфере приводит к увеличению рассеянной радиации.



С увеличением высоты над уровнем моря поток прямой солнечной радиации возрастает, что объясняется уменьшением оптической толщины атмосферы. Вследствие этого максимальные значения потока солнечной радиации в горных районах больше, чем на равнинной местности.

Величина потока рассеянной радиации с поднятием над уровнем моря уменьшается при ясном небе, так как уменьшается толща рассеивающих слоев атмосферы. При наличии же облачности поток рассеянной радиации в слоях ниже облаков с высотой увеличивается.

Приход прямой и суммарной солнечной радиации уменьшается в пунктах, расположенных на дне долин или котловин, за счет закрытости горизонта.

Прямая, рассеянная и суммарная солнечная радиация имеет хорошо выраженные годовой и суточный ходы, которые определяются изменениями высоты Солнца и облачности.

По потенциальным возможностям поступления солнечной радиации в пределах Томской области томскими учеными выделены следующие зоны [42]:

**I – юго-западная часть** Томской области. Средние годовые суммы суммарной радиации на горизонтальную поверхность составляют 1100–1200 кВт·ч/м<sup>2</sup> при средних значениях облачности, прозрачности атмосферы и открытости горизонта. Эти условия обеспечивают стабильную эксплуатацию солнечных энергетических установок.

**II – центральная часть** Томской области. Среднее значение энергетических ресурсов за год составляет 1000–1100 кВт·ч/м<sup>2</sup>, что в основном удовлетворяет требованиям эксплуатации малых и средних солнечных энергетических установок.

**III – северо-восточная часть** Томской области. Потенциальные гелиоресурсы составляют 900–1000 кВт·ч/м<sup>2</sup>. В этом районе условия неблагоприятны для использования крупных и средних солнечных энергетических установок.

Приведенные характеристики потенциальных гелиоэнергетических характеристик являются интегральными, что не позволяет отражать ряд микроклиматических особенностей, которые могут оказывать на них определенное влияние.

Изучение распределения мощности солнечного излучения по месяцам позволило сделать вывод, что эффективная работа солнеч-

ных энергоустановок в северной и центральной частях Томской области до широты  $58^{\circ}$  продолжается с апреля по август. В более южных районах период их эффективной работы увеличивается с марта по сентябрь. В остальные месяцы, из-за малой высоты Солнца над горизонтом и ослабления солнечного излучения атмосферой, эффективность использования солнечных энергетических установок упадет в 4–5 раз.

Таким образом, как установлено учеными Томского политехнического университета, Томская область характеризуется довольно широкими возможностями для применения солнечных энергоустановок сезонного типа, особенно в сельской местности.

Территория Красноярского края, республик Хакасия и Тыва несоизмеримо больше Томской области, следовательно, обоснование целесообразности использования солнечной энергии в СГВ в том или ином месте установки ССГВ является актуальной научной проблемой.

## **2 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕСУРСОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ НА ТЕРРИТОРИИ КРАСНОЯРСКОГО КРАЯ, РЕСПУБЛИК ХАКАСИЯ И ТЫВА**

### **2.1 Разработка структуры моделирования влияния природно-техногенных факторов на режимы работы, энергетическую и экономическую эффективность ССГВ**

В настоящее время в мире и России разработано и широко используется целое множество математических моделей по оценке ресурса солнечной радиации на поверхности Земли (например, система Surfer) [4]. В них используют в основном среднемесячные (реже – среднесуточные) данные о солнечной радиации [37, 64]. Однако для более детальной оценки технического и экономического потенциала солнечной энергетики на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва целесообразна разработка оригинальных математических моделей и, как следствие, новых программных продуктов.

Предлагается использовать один программный продукт Maple для разработки всего пакета программ, содержащих математические модели поля солнечной радиации, других климатических факторов, влияющих на режимы работы систем солнечного горячего водоснабжения, выполненных на базе различных солнечных коллекторов, а также модели по расчету энергетических и технико-экономических показателей использования ССГВ на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.

Предложенная структура моделирования влияния природно-техногенных факторов на режимы работы, энергетическую и экономическую эффективность ССГВ приведена на рисунке 2.1.

### **2.2 Методика расчета валовых ресурсов солнечной радиации в точке $A(\varphi, \psi)$ и заданной территории $S$ для горизонтальной площадки**

Как установлено кафедрой нетрадиционных и возобновляемых источников энергии МЭИ [27, 28], практически все разработанные в мире методы расчета ресурсов солнечной радиации (СР) на поверхности Земли базируются на одном методическом приеме.



Рисунок 2.1 – Структура моделирования влияния природно-техногенных факторов на режимы работы, энергетическую и экономическую эффективность ССГВ

Учитывая, что большинство актинометрических станций в мире измеряет, как правило, приход солнечной радиации на неподвижную горизонтальную приемную площадку, то именно значение прихода  $SR$  на горизонтальную площадку и принимается в качестве количественной меры оценки ресурсов  $SR$  как в точке  $A(\varphi, \psi)$ , так и для заданной территории  $S$  (км<sup>2</sup>). Далее полученные данные для горизонтальной приемной площадки (ПП) пересчитываются по эмпирическим формулам, предлагаемым разными авторами [11, 14, 42, 46, 78, 114, 119, 122, 128], на произвольно ориентированную приемную площадку с тем или иным по уровню детализации учетом различных факторов, влияющих на приход солнечной радиации. В связи с этим особое значение приобретают методы расчета прихода солнечной радиации на горизонтальную приемную площадку, с помощью которых и определяют сегодня валовые ресурсы (потенциал) солнечной энергетики на Земле.

Под валовым потенциалом солнечной энергетики или солнечного излучения в заданной точке земной поверхности  $A(\varphi, \psi)$  обычно принимается среднегодовое значение солнечной энергии, поступающей на горизонтальную приемную площадку площадью в один квадратный метр за период, равный одному календарному году –  $\mathcal{E}_{\text{вал}}^{\Gamma}$ , кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год) [28]. Учитывая переменный характер поступления солнечной радиации по годам, для получения достаточно достоверного значения  $\mathcal{E}_{\text{вал}}^{\Gamma}$  необходимо иметь информацию о приходе солнечной энергии на горизонтальную площадку за достаточно длительный период времени  $T$  (годы), больший, чем известный 11-летний солнечный цикл (цикл Вольфа).

В этом случае, если имеются данные о непрерывном во времени приходе солнечной радиации, приходе суммарной солнечной радиации на горизонтальную приемную площадку  $R_{\Sigma}^{\Gamma}(t)$  за длительный период времени  $T$  (годы), то значение  $\mathcal{E}_{\text{вал}}^{\Gamma}$  рассчитывают по формуле [28]

$$\mathcal{E}_{\text{вал}}^{\Gamma} = \frac{\sum_{k=1}^d \mathcal{E}_{\text{вал } k}^{\Gamma}}{d}, \quad (2.1)$$

где  $d$  – число расчетных лет;

$\mathcal{E}_{\text{вал } k}^{\Gamma}$  – приход солнечной радиации на горизонтальную площадку за  $k$ -й год, рассчитываемый по формуле [28]

$$\mathcal{E}_{\text{вал } k}^{\Gamma} = \int_0^{T_{\text{год}}} R_{\Sigma}^{\Gamma}(t) dt. \quad (2.2)$$

При расчете валовых ресурсов солнечной энергетики для заданной территории  $S$  (км<sup>2</sup>) вся территория предварительно разделяется на  $l$  представительных зон, в каждой из которых можно рассчитать среднемноголетний приход солнечной радиации на территорию  $l$ -й зоны площадью  $S_l$ (км<sup>2</sup>) –  $\mathcal{E}_{\text{вал } l}^r$ , кВт·ч/год, при использовании известных законов интерполяции принятых исходных данных в расчетных точках  $A_j(\varphi, \psi) – R_{\Sigma j}^r(t)$ .

Тогда валовые ресурсы солнечной энергетики для территории  $S$  (км<sup>2</sup>) –  $\mathcal{E}_{\text{вал}}^r(S)$ , состоящей из  $r$  расчетных зон  $S_l$  ( $l= 1, \dots, r$ ), могут быть найдены из соотношения [28]

$$\mathcal{E}_{\text{вал}}^r(S) = \sum_{l=1}^r \mathcal{E}_{\text{вал } l}^r(S_l), \quad (2.3)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{вал}}^r(S)$  – приход СР на горизонтальную территорию земной поверхности площадью  $S$  (км<sup>2</sup>) на период времени, равный одному году.

Использование современных программных продуктов, например системы Surfer-8 [28], позволяет находить интегральные значения прихода СР на горизонтальную территорию земной поверхности площадью  $S$  (км<sup>2</sup>) за исследуемый период времени (день, месяц, год). Для этого все известные данные по солнечной радиации задаются для территории  $S$  (км<sup>2</sup>) в ряде точек  $A(\varphi, \psi)$  (например,  $R_{\Sigma}^r$ , Вт/м<sup>2</sup>), находящихся на заданной территории или на небольшом удалении от ее границ. Система Surfer по заданным значениям  $\bar{R}_{\Sigma}^r$  в каждой точке  $A(\varphi, \psi)$  рассчитывает топограмму изолиний постоянных значений  $\bar{R}_{\Sigma}^r$  с заданной пользователем дискретностью. Далее на основе полученных изолиний  $\bar{R}_{\Sigma i}^r = \text{const}$  по всей территории система Surfer-8 интегрирует значения  $\bar{R}_{\Sigma}^r$  (Вт/м<sup>2</sup>), тем самым определяя для нее значения валовых ресурсов СИ.

Как подчеркивается в [28], непрерывная форма задания  $R_{\Sigma}^r$  в функции времени  $t$ , т.е.  $R_{\Sigma}^r(t)$  в настоящее время может быть реализована достаточно в редких случаях на территории России. Чаще можно получить информацию об  $R_{\Sigma}^r(t)$  в виде среднеинтервальных ее значений за заданные расчетные интервалы времени –  $(\Delta t)$  (час, сутки, месяц, год), т.е.  $\bar{R}_{\Sigma}^r(\Delta t)$ .

В этом случае расчет  $\mathcal{E}_{\text{вал } k}^r$  для точки  $A(\varphi, \psi)$  и  $\mathcal{E}_{\text{вал } l}^r(S_l)$  может быть произведен по следующим формулам [28]:

$$\mathcal{E}_{\text{вал } k}^{\Gamma} = \sum_{i=1}^n \bar{R}_{\Sigma i}^{\Gamma} (\Delta t_i) \Delta t_i; \quad (2.4)$$

$$\mathcal{E}_{\text{вал } l}^{\Gamma}(S_l) = (S_l) \cdot 10^6 \sum_{i=1}^n \bar{R}_{\Sigma i}^{\Gamma} (\Delta t_i) \Delta t_i, \quad (2.5)$$

где  $\bar{R}_{\Sigma l_i}^{\Gamma} = 0,25(\bar{R}_{\Sigma 1}^{\Gamma} + \bar{R}_{\Sigma 2}^{\Gamma} + \bar{R}_{\Sigma 3}^{\Gamma} + \bar{R}_{\Sigma 3}^{\Gamma})$ ,

при условии, что календарный год –  $T_{\text{год}}$  (час) разбит на  $n$  расчетных интервалов длительностью  $\Delta t_i$  каждый, т.е.

$$T_{\text{год}} = \sum_{i=1}^n \Delta t_i. \quad (2.6)$$

В качестве расчетных интервалов принимаются  $\Delta t_i$ , равные одним суткам или одному месяцу.

Таким образом, установлено, что в настоящее время разработаны и широко используются математические модели по оценке ресурса солнечной радиации на поверхности Земли (например, система Surfer), которые используют в основном среднемесячные (реже – среднесуточные) данные о солнечной радиации. Однако для оценки технического и экономического потенциала солнечной энергетики на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва потребуется не только приобретение указанного программного продукта, но и дальнейшее использование программной оболочки, в которой он выполнен, иначе могут возникнуть затруднения с разработкой и использованием разработанных другими авторами и в других оболочках программных продуктов. Следовательно, целесообразно использовать один программный продукт, например Maple, для разработки всего пакета программ, содержащих математические модели поля солнечной радиации и других климатических факторов, влияющих на работу системы солнечного горячего водоснабжения.

## **2.3 Обоснование модели и моделирование поля солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва**

### ***2.3.1 Обоснование модели поля солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва***

На солнечную радиацию, поступающую на поверхность Земли, оказывают влияние факторы планетарной активности за счет плане-

тарных приливов и изменения положения центра масс Солнечной системы, взаимного положения планет [51].

Как отмечено в [51], отбор факторов возмущения солнечной активности должен учитывать сопоставимость периодов действия факторов и выбранного временного шага дискретизации процесса. Выбранный фактор может быть учтен в рамках разрабатываемой модели, если период изменения больше или равен шагу дискретизации системы и в том числе кратен этому шагу. В противном случае от факторного показателя не может быть получено данных о законах его изменения, и следовательно, фактор превращается в шум. Если периоды всех отобранных факторов кратны  $h$ , то получается периодическая модель исследуемой системы с периодом  $h$ . В противном случае система может быть описана аппаратом квазипериодических функций.

Явления солнечной активности имеют направленность в мировом пространстве и подразделяются на два вида ориентированных процессов (рис. 2.2).

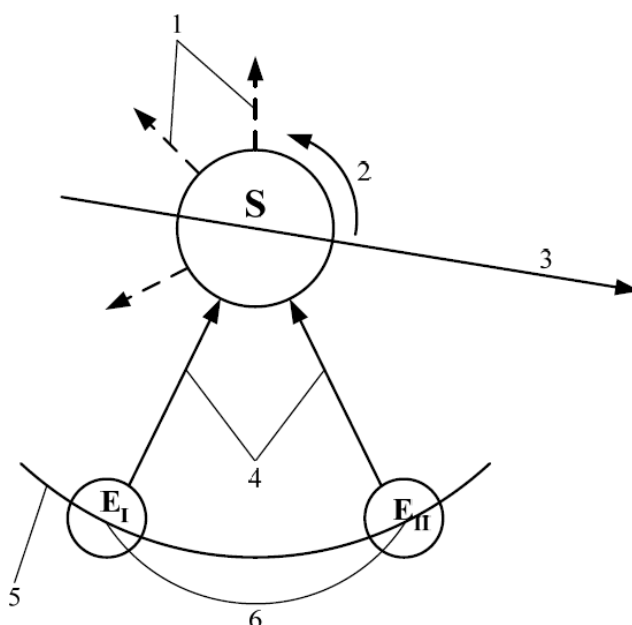


Рисунок 2.2 – Схема процессов солнечной активности:

- 1 – направление относительно ориентированных явлений;
- 2 – направление вращения фотосферы вокруг оси Солнца;
- 3 – направление абсолютно ориентированных явлений;
- 4 – направление наблюдений; 5 – орбита Земли; 6 – перемещение земли за период дискретизации; S – Солнце; E<sub>I</sub>, E<sub>II</sub> – положения Земли



Установлено [51], что безусловная ориентация солнечных процессов есть их неизменность в мировом пространстве в определенный промежуток времени, например за период обращения Солнца вокруг своей оси – эти процессы не связаны с изменением координат солнечной сферы вследствие ее собственного вращения.

Основанием для классификации таких процессов служат факторы внешних возмущений, например выпучивание солнечной поверхности в сторону равнодействующих сил притяжения Солнца всеми планетами, перераспределение солнечной массы по мере перемещения барицентра. Относительная ориентация солнечных процессов определяется процессами, проходящими в определенных областях сферы Солнца и изменяющих свое положение в мировом пространстве по мере собственного вращения Солнца. Они основываются на том, что гелиокоординаты групп солнечных пятен остаются неизменными на всем видимом с Земли диске Солнца и возвращаются с невидимой полусферы в тех же солнечных долготах и широтах.

Описание взаимодействия двух видов процессов в общей системе солнечной активности может быть представлено следующим образом [51]. Действие внешних факторов создает безусловно ориентированные изменения на Солнце. Внутренние закономерности и те внешние факторы, которые изменяются синхронно с вращением Солнца, определяют динамику относительно ориентированных процессов. Развитие внутренней динамики происходит на фоне внешних возмущений, за счет чего происходит подавление, активизация действующих областей сферы Солнца или образование новых зон.

Период обращения точек фотосферы зависит от их гелиокоординат: 26 дней (земных) на экваторе, 34 дня – у полюса. Эффективный период вращения фотосферы составляет 27 дней, что соизмеримо с продолжительностью месячного периода дискретизации

$$T = \frac{365,25}{12} = 30,47 \text{ дней.} \quad (2.7)$$

Отсюда видно, что за период дискретизации вся фотосфера подвергается наблюдениям – одни и те же относительно ориентированные зоны солнечной активности наблюдаются с Земли в течение месяца. Следовательно, данные наблюдений за фотосферой в течение месяца отражают солнечные процессы в усредненном виде и не могут быть отнесены к меньшему периоду дискретизации.

Точки фотосферы, приближающиеся к полюсам, перемещаются с угловой скоростью

$$\frac{360}{34} = 10,6 \frac{\text{град}}{\text{дней}}. \quad (2.8)$$

За период дискретизации 30,47 дней земля перемещается на

$$\frac{360}{12} = 30 \text{ град}. \quad (2.9)$$

Следовательно, вторичные наблюдения точек фотосферы возможны, если угловая скорость составит не меньше

$$W = \frac{360+30}{30,47} = 12,8 \text{ град/день} \quad (2.10)$$

или при периоде обращения не больше чем

$$T = \frac{380}{12,8} = 28 \text{ дней}. \quad (2.11)$$

Точки наиболее активных экваториальных областей фотосферы имеют период обращения меньше названного критического значения 28 дней, то есть движутся с более высокой скоростью и потому наблюдаются с Земли за месячный период дискретизации на всех долготах Солнца [51]. Наиболее заметная роль в системе отводится самой крупной планете – Юпитеру. Действие факторов обращения Юпитера за 11,862 года вокруг Солнца предположительно определяет цикл солнечной активности в 11 лет. Остальные планеты имеют индивидуальное влияние на солнечную активность, искажая действие основного возмутителя – Юпитера.

Предполагаемое влияние суммарной силы притяжения Солнца всеми планетами на солнечную активность отражается положением центра масс планет Солнечной системы с периодом 178,917 лет, когда все планеты Солнечной системы собираются в минимальном секторе небесной сферы.

Приведенные показатели в основном могут определять солнечные процессы во всей солнечной сфере, то есть процессы, которым соответствует неопределенность их ориентации в пространстве. В то же время показатели солнечной активности, имеющиеся в архивах актинометрических станций, отражают процессы на Солнце в направлении от Солнца к Земле.

Выбрав шаг  $h$  дискретизации процесса по времени равным одному месяцу, получим периоды действий отобранных факторов:

- $T_1 = 12$  – период обращения Земли вокруг Солнца (годовой);
- $T_2 = 13,105$  – период сближения Юпитера с Землей (юпитеровый);
- $T_3 = 25,621$  – период сближения Марса с Землей (марсовый);
- $T_4 = 132$  – одиннадцатилетний солнечный (солнечный);
- $T_5 = 2147$  – период концентрации планет (центромассовый).

На территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва имеется 11 актинометрических станций со следующими географическими координатами:

- Норильск	$\varphi = 69^{\circ}20'$ с.ш., $\psi = 88^{\circ}18'$ в.д.;
- Туруханск	$\varphi = 65^{\circ}47'$ с.ш., $\psi = 87^{\circ}56'$ в.д.;
- Тура	$\varphi = 64^{\circ}16'$ с.ш., $\psi = 100^{\circ}14'$ в.д.;
- Ванавара	$\varphi = 60^{\circ}20'$ с.ш., $\psi = 102^{\circ}16'$ в.д.;
- Енисейск	$\varphi = 58^{\circ}27'$ с.ш., $\psi = 92^{\circ}90'$ в.д.;
- Солянка	$\varphi = 56^{\circ}10'$ с.ш., $\psi = 95^{\circ}16'$ в.д.;
- Шумиха	$\varphi = 55^{\circ}57'$ с.ш., $\psi = 92^{\circ}18'$ в.д.;
- Хакасская	$\varphi = 53^{\circ}46'$ с.ш., $\psi = 91^{\circ}19'$ в.д.;
- Кызыл	$\varphi = 51^{\circ}43'$ с.ш., $\psi = 94^{\circ}30'$ в.д.;
- Назарово	$\varphi = 56^{\circ}20'$ с.ш., $\psi = 89^{\circ}12'$ в.д.;
- КАТЭК	$\varphi = 55^{\circ}32'$ с.ш., $\psi = 89^{\circ}12'$ в.д.

Для районирования указанной территории по удельной суммарной солнечной радиации  $R_{\Sigma}$  (МДж/м<sup>2</sup>), поступающей за месяц на горизонтальную поверхность, нами использованы многолетние данные (с 1980 по 2005 г.) Среднесибирского УГМС ГУ «Красноярский ЦГМС-Р» Гидрометеорологического центра (г. Красноярск). Ежемесячные значения прямой  $R_{пр}$  (МДж/м<sup>2</sup>), диффузной (рассеянной)  $R_{д}$  (МДж/м<sup>2</sup>) и суммарной солнечной радиации  $R_{\Sigma}$  (МДж/м<sup>2</sup>) являются исходными массивами информации для программ расчета параметров уравнений, описывающих поступление суммарной солнечной радиации с учетом географических координат  $\varphi_A, \psi_A$  интересующей точки  $A$  на поверхности Земли. Квазипериодическая модель суммарной солнечной радиации выполнена в среде Maple 9.5 [82].

### 2.3.2 Моделирование поля солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва

Для моделирования поля солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва разработана программа «Квазипериодическая модель суммарной солнечной радиации».

Исходными данными для математической модели являются:

- географические координаты ( $\varphi$  и  $\psi$  – широта и долгота станции, в градусах) и высота над уровнем моря  $H$  актинометрических станций Норильск, Туруханск, Тура, Ванавара, Енисейск, Солянка, Шумиха, Хакасская, Кызыл, Назарово, КАТЭК;

- месячные значения  $СР$  на горизонтальную приемную площадку  $i$ -й актинометрической станции:

- прямая  $R_{пр}$  (МДж/м<sup>2</sup>);

- рассеянная  $R_d$  (МДж/м<sup>2</sup>);

- суммарная  $R_{\Sigma}$  (МДж/м<sup>2</sup>).

При проведении моделирования рассчитываются:

- квазипериодическая модель суммарной солнечной радиации:

- частные квазипериодические модели динамики солнечной радиации по актинометрическим станциям (прямая  $R_{пр}$  (МДж/м<sup>2</sup>), рассеянная  $R_d$  (МДж/м<sup>2</sup>) и суммарная солнечная радиация  $R_{\Sigma}$  (МДж/м<sup>2</sup>) в момент времени  $t$  в точке  $A$  с географическими координатами ( $\varphi_A, \psi_A$ ));

- постоянная составляющая суммарной солнечной радиации  $C$ , МДж/м<sup>2</sup>;

- функциональные коэффициенты разложения квазипериодической функции (коэффициенты главных гармоник)  $a_{1k}(\varphi, \psi) \dots a_{5k}(\varphi, \psi)$ ,  $b_{1k}(\varphi, \psi) \dots b_{5k}(\varphi, \psi)$ ;

- временные пространственные факторные периоды  $T$ .

Результатами расчета являются:

- приход прямой  $R_{пр}$  (МДж/м<sup>2</sup>), рассеянной  $R_d$  (МДж/м<sup>2</sup>) и суммарной  $R_{\Sigma}$  (МДж/м<sup>2</sup>)  $СР$  на горизонтальную приемную площадку в точке  $A$  ( $\varphi, \psi$ ) и для заданной территории  $S$  (км<sup>2</sup>) за месяц в расчетный 25-летний период;

- удельный валовый (за календарный год) потенциал солнечного излучения  $\mathcal{E}_{вал}^r$ , кВт·ч/(м<sup>2</sup>·год), или ГДж/(м<sup>2</sup>·год);

- приход солнечной радиации на горизонтальную территорию земной поверхности площадью  $S$  ( $\text{км}^2$ ) на период времени, равный одному году  $\Xi_{\text{вал}}^r(S)$ , ( $\text{кВт}\cdot\text{ч}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$  или  $\text{ГДж}/(\text{м}^2\cdot\text{год})$ );

- линии уровня и поля прихода прямой  $R_{\text{пр}}$  ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ), рассеянной  $R_{\text{д}}$  ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ) и суммарной  $R_{\Sigma}$  ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ) СР.

Суммарная солнечная радиация  $R_{\Sigma}$  ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ) по актинометрической станции Солянка в период с 1980 по 1997 г. представлена на рисунке 2.3.

Анализ суммарной солнечной радиации за 17-летний период показал, что наибольшие отклонения суммарной солнечной радиации от среднего значения происходили в весенне-летний период и составили: для апреля – 18,2 %, для июля – 15,1 %.

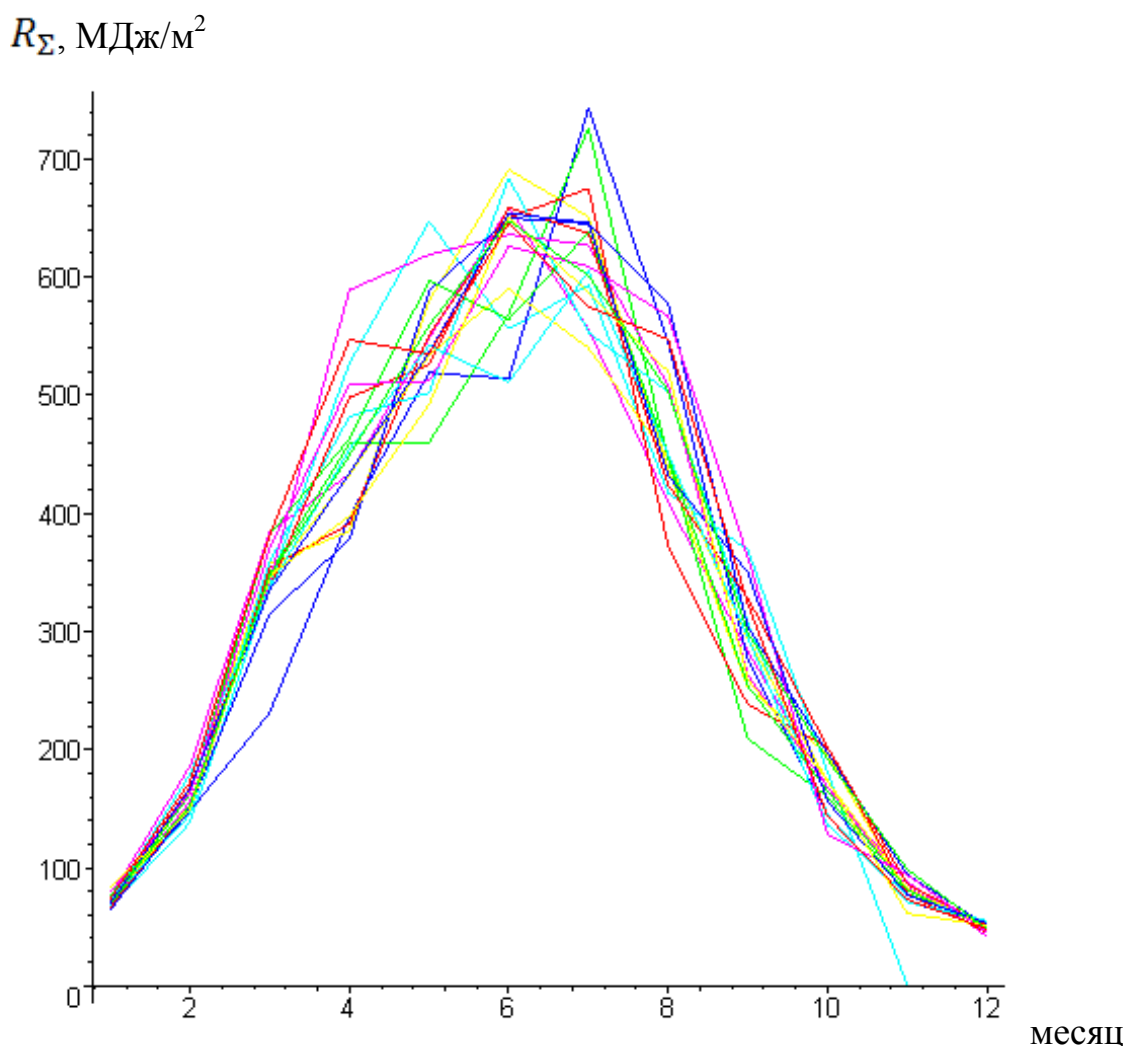


Рисунок 2.3 – Суммарная солнечная радиация  $R_{\Sigma}$  ( $\text{МДж}/\text{м}^2$ ), поступающая за месяц на горизонтальную поверхность по актинометрической станции Солянка в течение года в период с 1980 по 1997 г.

## 2.4 Разработка частных квазипериодических моделей динамики солнечной радиации по актинометрическим станциям

Для каждой актинометрической станции применима частная модель. Суммарная солнечная радиация  $R_{\Sigma}$  (МДж/м<sup>2</sup>) в момент времени  $t$  в точке  $A$  с географическими координатами  $(\varphi_A, \psi_A)$  описывается рядом Фурье, имеющим общую структуру в виде квазипериодической регрессии, применимой в случае невозможности замены системы факторов одним обобщающим фактором для периодов  $T_1$ ,  $T_2$  и т.д.

$$R_{\Sigma(\varphi_A, \psi_A)}(t) = c + \left[ \sum_{k=1}^{n_1} \left( a_{1k} \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_1}\right) + b_{1k} \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_1}\right) \right) \right] + \\ + \left[ \sum_{k=1}^{n_2} \left( a_{2k} \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_2}\right) + b_{2k} \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_2}\right) \right) \right] + \left[ \sum_{k=1}^{n_3} \left( a_{3k} \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_3}\right) + b_{3k} \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_3}\right) \right) \right] + \\ + \left[ \sum_{k=1}^{n_4} \left( a_{4k} \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_4}\right) + b_{4k} \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_4}\right) \right) \right] + \left[ \sum_{k=1}^{n_5} \left( a_{5k} \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_5}\right) + b_{5k} \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_5}\right) \right) \right] , \quad (2.12)$$

где  $R_{\Sigma(\varphi_A, \psi_A)}(t)$  – функция суммарной солнечной радиации актинометрической станции;

$c$  – постоянная составляющая суммарной солнечной радиации для данной местности, МДж/м<sup>2</sup>;

$a_{1k} \dots a_{5k}$ ,  $b_{1k} \dots b_{5k}$ ,  $k$  – коэффициенты разложения квазипериодической функции;

$T_1 \dots T_5$  – временные пространственные факторные периоды;

$t$  – время.

Коэффициенты для частной модели находят методом наименьших квадратов, минимизирующих невязки, т.е. отклонение теоретических значений от расчетных.

Постоянная составляющая суммарной солнечной радиации

$$c = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \left[ \frac{\int_0^{\Delta t} R_{\Sigma}(t) dt}{\Delta t} \right], \quad (2.13)$$

где  $\Delta t$  – расчетный период времени.

Коэффициенты разложения квазипериодической функции определяются выражениями:

$$a_{sk} = \text{coeff} \frac{R_{\Sigma}(t)}{\cos \frac{2\pi k_s \pi}{T_s}}, \quad (2.14)$$

$$b_{sk} = \text{coeff} \frac{R_{\Sigma}(t)}{\sin \frac{2\pi k_s \pi}{T_s}}. \quad (2.15)$$

Результаты расчета на ПЭВМ в виде таблиц коэффициентов (табл. 2.1–2.5) и графиков (рисунки 2.4–2.5) представлены ниже.

**Таблица 2.1 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для частных моделей динамики поступления солнечной радиации по годовичному циклу**

Станция	c	$a_{11}$	$b_{11}$	$a_{12}$	$b_{12}$
Енисейск	300,82	-301,77	-3,58	28,59	11,80
КАТЭК	457,59	-272,21	-0,12	15,76	8,74
Кызыл	157,96	-308,14	-20,39	-7,18	-11,46
Назарово	713,34	-256,33	-0,48	17,57	11,49
Солянка	343,97	-285,44	-3,70	11,52	9,73
Хакасская	252,24	281,99	-12,46	5,19	8,84
Шумиха	364,38	-261,37	-245	19,25	10,65

**Таблица 2.2 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для частных моделей динамики поступления солнечной радиации по юпитеровому циклу**

Станция	$a_{21}$	$b_{21}$
Енисейск	-2,54	1,43
КАТЭК	2,59	6,69
Кызыл	1,30	3,64
Назарово	0,89	3,52
Солянка	-0,94	2,28
Хакасская	-3,25	2,40
Шумиха	0,38	3,17

**Таблица 2.3 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для частных моделей динамики поступления солнечной радиации по марсовому циклу**

Станция	$a_{31}$	$b_{31}$
Енисейск	-5,51	2,06
КАТЭК	2,35	5,26
КЫЗЫЛ	1,32	4,49
Назарово	0,33	2,06
Солянка	2,52	1,47
Хакасская	-0,88	0,77
Шумиха	1,23	2,01

**Таблица 2.4 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для частных моделей динамики поступления солнечной радиации по одиннадцатилетнему циклу**

Станция	$a_{41}$	$b_{41}$
Енисейск	7,53	1,16
КАТЭК	8,76	-1,17
КЫЗЫЛ	9,13	-1,16
Назарово	-7,18	9,40
Солянка	7,44	-3,16
Хакасская	6,23	-3,50
Шумиха	1,75	0,65

**Таблица 2.5 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для частных моделей динамики поступления солнечной радиации по центромассовому циклу**

Станция	$a_{51}$	$b_{51}$
Енисейск	1,10	4,35
КАТЭК	-130,86	-73,83
КЫЗЫЛ	-88,35	11,58
Назарово	-379,36	-201,92
Солянка	-13,42	-22,07
Хакасская	59,08	55,11
Шумиха	-67,39	-64,46



$R_{\Sigma}$ , МДж/м<sup>2</sup>

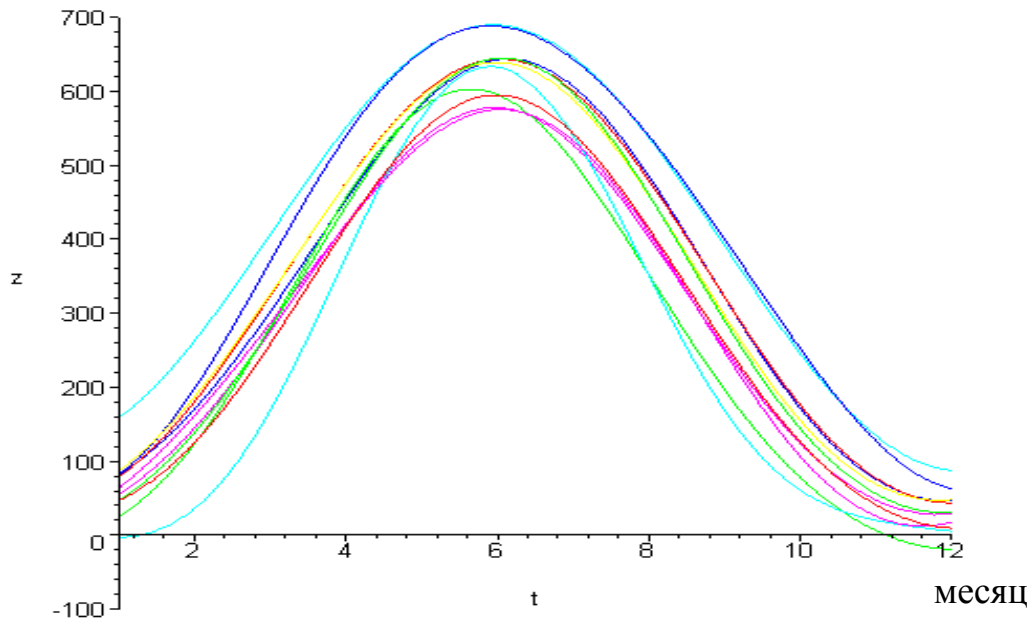


Рисунок 2.4 – Частные квазипериодические функции суммарной солнечной радиации в годовом цикле по актинометрическим станциям Красноярского края, республик Хакасия и Тыва

$R_{\Sigma}$ , МДж/м<sup>2</sup>

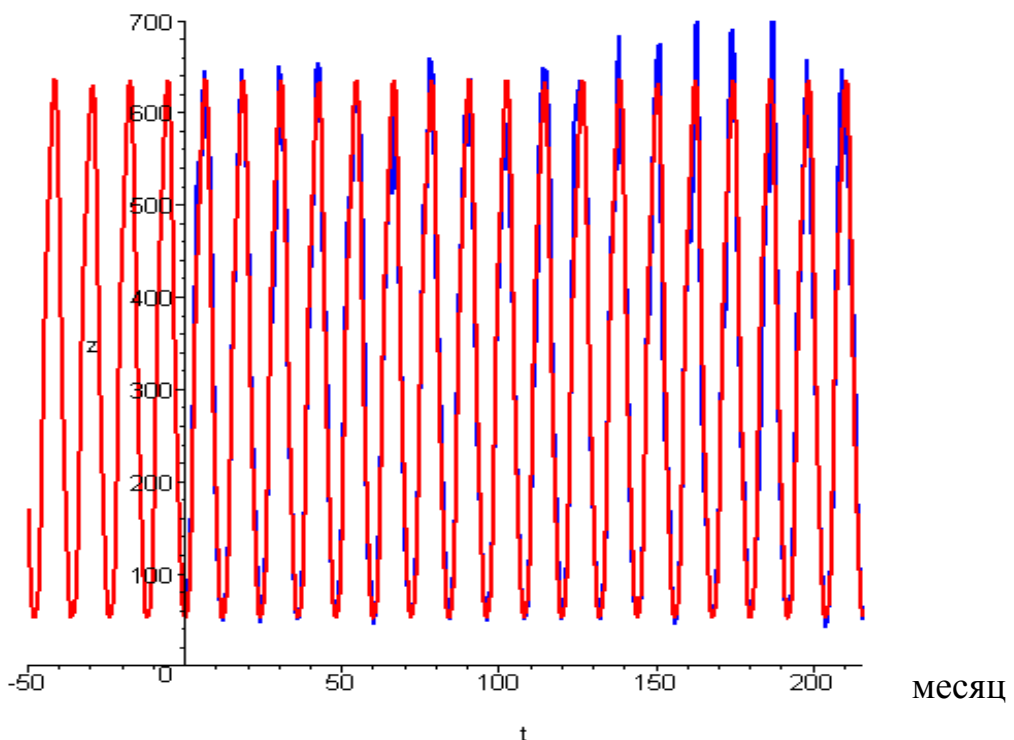


Рисунок 2.5 – Квазипериодическая функция удельной суммарной месячной солнечной радиации (линия тренда) и действительные значения удельной месячной суммарной солнечной радиации  $R_{\Sigma}$  (МДж/м<sup>2</sup>) в период с 1980 по 2005 год по актинометрической станции Солянка

Сопоставив полученные в результате расчетов значения квазипериодической функции за исследуемый период с действительными значениями суммарной солнечной радиации  $R_{\Sigma}$  (МДж/м<sup>2</sup>), можно заметить, что среднеквадратическое отклонение не превышает 8,3 % (см. рис. 2.5).

## 2.5 Разработка общей модели динамики поля солнечной радиации в зависимости от географических координат установки ССГВ

Квазипериодическая модель суммарной солнечной радиации, учитывающая географические координаты местности, описывается выражением

$$\begin{aligned}
 R_{\Sigma}(t, \varphi, \psi) = & c(\varphi, \psi) + \left[ \sum_{k=1}^{n_1} \left( a_{1k}(\varphi, \psi) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_1}\right) + b_{1k}(\varphi, \psi) \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_1}\right) \right) \right] + \\
 & + \left[ \sum_{k=1}^{n_2} \left( a_{2k}(\varphi, \psi) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_2}\right) + b_{2k}(\varphi, \psi) \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_2}\right) \right) \right] + \\
 & + \left[ \sum_{k=1}^{n_3} \left( a_{3k}(\varphi, \psi) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_3}\right) + b_{3k}(\varphi, \psi) \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_3}\right) \right) \right] + \\
 & + \left[ \sum_{k=1}^{n_4} \left( a_{4k}(\varphi, \psi) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_4}\right) + b_{4k}(\varphi, \psi) \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_4}\right) \right) \right] + \\
 & + \left[ \sum_{k=1}^{n_5} \left( a_{5k}(\varphi, \psi) \cos\left(\frac{2\pi kt}{T_5}\right) + b_{5k}(\varphi, \psi) \sin\left(\frac{2\pi kt}{T_5}\right) \right) \right]
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

где  $\varphi$  – географическая долгота местности;

$\psi$  – географическая широта местности;

$a_{1k}(\varphi, \psi) \dots a_{5k}(\varphi, \psi)$ ,  $b_{1k}(\varphi, \psi) \dots b_{5k}(\varphi, \psi)$  – функциональные коэффициенты разложения квазипериодической функции;

$c(\varphi, \psi)$  – постоянная составляющая суммарной солнечной радиации для местности с географической долготой  $\varphi$  и широтой  $\psi$ , МДж/м<sup>2</sup>;

$T_1 \dots T_5$  – временные пространственные факторные периоды.

Результаты расчета на ПЭВМ в виде таблиц коэффициентов (табл. 2.6–2.10) и графиков поступления солнечной радиации (рис. 2.6, 2.7) для июля представлены ниже.

**Таблица 2.6 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для общей модели динамики поступления солнечной радиации по годовичному циклу**

$a_{11}(\varphi, \psi)$	$2405,57+94881,95\cos(0,1745\varphi)+5229,08 \sin(0,1745\varphi)$
$b_{11}(\varphi, \psi)$	$5897,93+52313,06\cos(0,1745\varphi)+5262,14\sin(0,1745\varphi)$
$a_{12}(\varphi, \psi)$	$3201,64+17994,00\cos(0,1745\varphi)+2729,22\sin(0,1745\varphi)$
$b_{12}(\varphi, \psi)$	$7020,633-50574,47\cos(0,1745\varphi)-6022,04\sin(0,1745\varphi)$

**Таблица 2.7 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для общей модели динамики поступления солнечной радиации по юпитеровому циклу**

$a_{21}(\varphi, \psi)$	$5053,26-6614,02\cos(0,3491\varphi)\cos(0,6981\psi)$
-------------------------	--

**Таблица 2.8 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для общей модели динамики поступления солнечной радиации по марсовому циклу**

$b_{31}(\varphi, \psi)$	$6002,76+34259,60\cos(0,0175\varphi)+4752,90\sin(0,1745\varphi)$
-------------------------	--

**Таблица 2.9 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для общей модели динамики поступления солнечной радиации по одиннадцатилетнему циклу**

$a_{41}(\varphi, \psi)$	$22867,49+126525,49\cos(0,1745\varphi)+17840,81\sin(0,1745\varphi)$
$b_{41}(\varphi, \psi)$	$15694,91+98884,06\cos(0,1745\varphi)+12945,36\sin(0,1745\varphi)$

**Таблица 2.10 – Расчетные коэффициенты главных гармоник для общей модели динамики поступления солнечной радиации по центромассовому циклу**

$a_{51}(\varphi, \psi)$	$311084,65+1755849\cos(0,1745\varphi)+2492,12\sin(0,1745\varphi)$
-------------------------	---

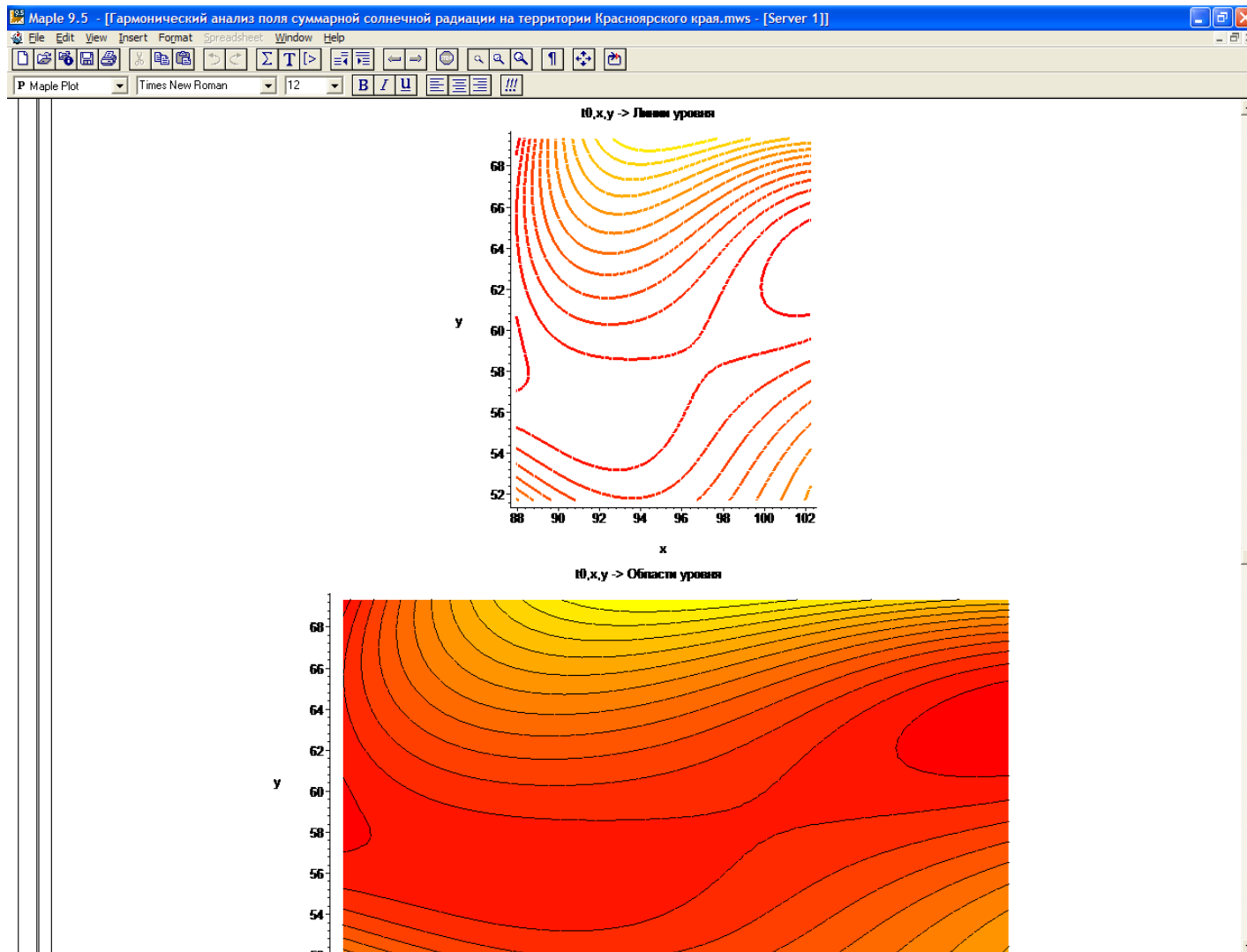


Рисунок 2.6 – Пример результата моделирования ежемесячного поступления суммарной солнечной радиации с привязкой к географическим координатам территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва

Таким образом, разработанная нами математическая модель позволяет:

- производить расчет  $\mathcal{E}_{\text{вал}}^{\Gamma}$  для заданной точки  $A(\varphi, \psi)$  и  $\mathcal{E}_{\text{вал}}^{\Gamma}(S)$  для заданной территории  $S$  (км<sup>2</sup>) с расчетным интервалом  $\Delta t_i$  (от одного месяца до 300 месяцев) в период с января 1980 года по декабрь 2005 года;

- представлять наглядно ежемесячное поступление суммарной солнечной радиации  $R_{\Sigma}$  (МДж/м<sup>2</sup>) в виде одной или нескольких (до 300) трехмерных изображений поверхностей с привязкой к географическим координатам территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва в период с января 1980 года по декабрь 2005 года.

$R_{\Sigma}$ , МДж/м<sup>2</sup>

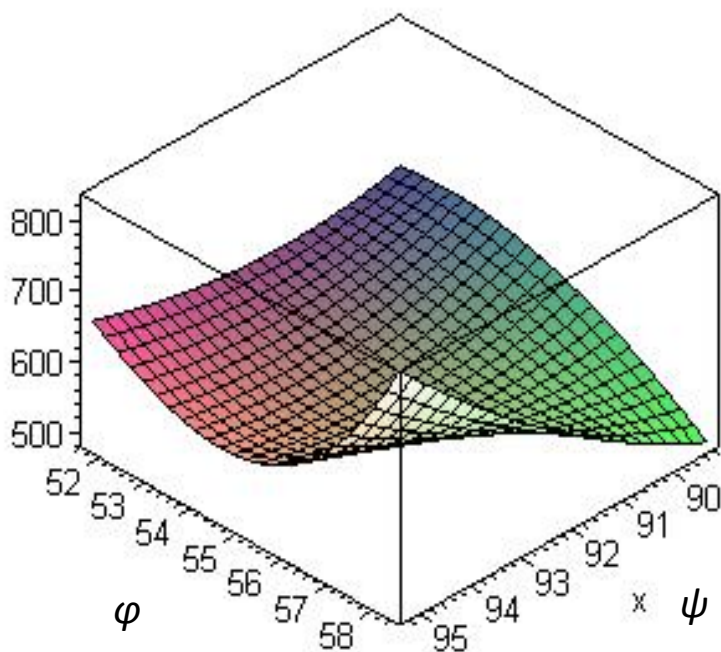


Рисунок 2.7 – Поступление суммарной солнечной радиации в июле 2002 г.

В результате проведенных в данной главе исследований установлено, что практически все разработанные в мире методы расчета ресурсов солнечной радиации на поверхности Земли принимают значение прихода СР на горизонтальную площадку в качестве количественной меры оценки ресурсов солнечной радиации как в точке  $A(\varphi, \psi)$ , так и для заданной территории  $S$  (км<sup>2</sup>). Далее получен-

ные данные для горизонтальной приемной площадки пересчитываются по эмпирическим формулам, предлагаемым разными авторами на произвольно ориентированную приемную площадку с тем или иным по уровню детализации учетом различных факторов, влияющих на приход солнечной радиации. В связи с этим особое значение приобретают методы расчета прихода солнечной радиации на горизонтальную приемную площадку, с помощью которых и определяют сегодня валовые ресурсы (потенциал) солнечной энергетики на Земле.

По базам данных, полученных из Среднесибирского УГМС ГУ «Красноярский ЦГМС-Р» Гидрометеорологического центра (г. Красноярск) на период с января 1980 года по декабрь 2005 года, установлено, что приход суммарной солнечной радиации на исследуемой территории изменяется в широких пределах, так, например, в течение 1982 года от 27 МДж/м<sup>2</sup> в декабре до 537 МДж/м<sup>2</sup> в июне.

В разработанной квазипериодической модели суммарной солнечной радиации среднеквадратическое отклонение от действительных значений не превышает 8,3 %. Модель определения суммарной солнечной радиации действительна для местностей, лежащих внутри поверхности Земли, очерченной географическими координатами актинометрических станций на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва: Енисейск  $\varphi = 58^{\circ}27'$  с.ш.,  $\psi = 92^{\circ}90'$  в.д.; Кызыл  $\varphi = 51^{\circ}43'$  с.ш.,  $\psi = 94^{\circ}30'$  в.д.; КАТЭК  $\varphi = 55^{\circ}32'$  с.ш.,  $\psi = 89^{\circ}12'$  в.д. Модель позволяет определять количество суммарной солнечной радиации, приходящей на земную поверхность при известных географических координатах местности за указанный период времени.

### **3 РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ССГВ СЕЛЬСКИХ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ, ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ**

#### **3.1 Особенности электропотребления систем горячего водоснабжения сельских бытовых потребителей**

Дифференцированные нормы электропотребления на горячее водоснабжение для сельских бытовых потребителей принимают в соответствии с утвержденной 27 декабря 2001 года (протокол № 41) МСХ России «Методикой определения потребности в средствах электроснабжения для социального развития села».

К сельским бытовым потребителям, согласно указанной методике, относят:

- жилой сектор;
- личное приусадебное хозяйство (ЛПХ);
- фермерские (крестьянские) хозяйства;
- сферу культурно-бытового обслуживания.

Расход электроэнергии в жилом секторе, ЛПХ и фермерских хозяйствах, в том числе и на горячее водоснабжение, зависит от ряда факторов, обусловленных:

- спецификой формирования сельских населенных пунктов;
- условиями их планировки и застройки;
- особенностями энергоснабжения (наличие или отсутствие сетевого газа, централизованного теплоснабжения, водоснабжения, канализации);
- формами и методами ведения ЛПХ;
- специализацией фермерских хозяйств и объемами их производства.

Для максимального учета влияющих факторов в методике приведены абсолютные и удельные показатели установленной мощности, число часов использования и объемы электропотребления для различных уровней электропотребления в жилом, общественном секторе, ЛПХ и фермерских хозяйствах, включая горячее водоснабжение.

Жилой сектор села рассмотрен в виде четырех моделей электропотребления.

Первая модель предполагает наиболее низкий уровень электрификации быта сельского населения (наличие 4–6 электробытовых

приборов). Как правило, это постройки старого типа с количеством проживающих в них сельских жителей 1–3 человека.

Вторая модель предполагает уровень электрификации, предусматривающий традиционный сельский дом, оснащенный основными электробытовыми машинами и приборами.

Третья модель включает уровень электрификации жилого сектора, предполагающий оснащение современными бытовыми машинами и приборами.

Четвертая модель предполагает уровень электрификации жилого сектора, включающий наряду с современными машинами и приборами напольную электроплиту.

При обеспечении бытовых нужд жилого сектора села горячей водой при всех уровнях электрификации быта предполагается использование кипятильника мощностью 0,6–1 кВт, расход электроэнергии при этом в год составляет 66–100 кВт·ч (табл. 3.1).

**Таблица 3.1 – Особенности ГВС бытового сектора села**

Водонагревательный прибор	$P_{уст}$ , кВт	$Ч_{исп}$ , ч	$W_{год}$ , кВт·ч
Первый уровень электрификации быта			
Кипятильник	0,6	110	66
Второй уровень электрификации быта			
Кипятильник	1,0	100	100
Третий уровень электрификации быта			
Кипятильник	1,0	100	100
Четвертый уровень электрификации быта			
Кипятильник	1,0	100	100

Сельские жилые дома коттеджной застройки с полной электрификацией тепловых процессов приняты, согласно методике, для площади помещений – 100, 200, 300 м<sup>2</sup>. Особенности их горячего водоснабжения отражены в таблице 3.2.

Личные приусадебные хозяйства различаются объемами производства, количеством и видами домашних животных и птицы, объемами используемой земли, наличием теплиц, количеством и мощностью используемого оборудования.



**Таблица 3.2 – Особенности ГВС сельских жилых домов коттеджной застройки**

Водонагревательный прибор	100 м <sup>2</sup>			200 м <sup>2</sup>			300 м <sup>2</sup>		
	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч
Электроводонагреватель	6,0	280	1680	6,0	300	1800	6,0	350	2100

По энергонасыщенности (обеспечению электрооборудованием) выделяют три типа (группы) ЛПХ:

1-й тип – с минимальным количеством машин и приборов – подворье. В ЛПХ содержатся в среднем: 1 корова, 2 свиньи, 5 кур.

2-й тип (наиболее распространенный) – в ЛПХ содержатся: 2 коровы, 1 теленок на откорме, 2–3 поросенка на откорме, 4–5 овец, 12–15 кур.

3-й тип развитого ЛПХ включает 3–5 коров, 3–5 телят, 8–10 свиней, до 30–50 голов птиц.

Энергопотребление на ГВС ЛПХ приведено в таблице 3.3.

**Таблица 3.3 – Особенности ГВС ЛПХ**

Водонагревательный прибор	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч
Первый тип ЛПХ			
Кипятильник	0,6	110	60
Второй тип ЛПХ			
Кипятильник	1,0	200	300
Третий тип ЛПХ			
Водонагреватель проточный	1,0	730	730

Фермерские хозяйства, как правило, являются специализированными, различных размеров и способов ведения производства.

Рассмотрены следующие типы фермерских хозяйств:

а) скотоводческие:

- молочного направления на 10, 15 и 30 коров;

- мясного направления (скот на выращивании и на откорме) на 15, 20 и 30 голов КРС;

б) свиноводческие:

- с законченным производственным циклом на 4, 6 и 8 свиноматок;

- репродукторные и откормочные с поголовьем поросят на выращивании и откорме 40, 60 и 80 голов.

Перечисленные типы хозяйств находятся, как правило, на значительном расстоянии от жилого помещения и часто располагаются в зданиях бывших небольших ферм.

Основными электропотребляющими процессами для фермерских хозяйств молочного направления являются доение и первичная обработка молока, кормоприготовление, водоснабжение и подогрев воды на технологические нужды, освещение и вентиляция помещений.

В таблице 3.4 приведены особенности ГВС фермерских хозяйств молочного направления.

**Таблица 3.4 – Особенности ГВС фермерских хозяйств молочного направления**

Водонагревательный прибор	Количество коров, гол.								
	10			15			30		
	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч
Электроводонагреватель ВЭП	1,25	700	875	1,25	900	1125	1,25	1100	1375
Доение, УПВ (10–50)	1,5	250	375	1,5	375	563	1,5	500	750

На свиноводческих фермах горячая вода в основном используется для кормоприготовления. В таблице 3.5 приведены особенности ГВС фермерских хозяйств свиноводческого направления.

**Таблица 3.5 – Особенности ГВС фермерских хозяйств свиноводческого направления**

Водонагревательный прибор	Количество свиноматок, гол.								
	4			6			8		
	Количество свиней на выращивании и откорме, гол.								
	40			60			80		
	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч	Р <sub>уст</sub> , кВт	Ч <sub>исп</sub> , ч	W <sub>год</sub> , кВт·ч
Электроводонагреватель ВЭП	1	800	800	1	1000	1000	1	1200	1200

Вышеприведенные удельные нормы электропотребления на ГВС различных бытовых потребителей на селе отражают фактическую (статистическую) специфику электропотребления и, как отмечено в методике, ниже расчетных значений электропотребления, принятых по НТП-АПК.

Специфика технологического проектирования СГВ отдельных объектов приведена в следующих нормативных документах:

- НТП-АПК 1.10.01.001-00. Нормы технологического проектирования ферм крупного скота крестьянских хозяйств.

- НТП-АПК 1.10.02.001-00. Нормы технологического проектирования свиноводческих ферм крестьянских хозяйств.

Поскольку при содержании овец и кур практически не требуется горячая вода, при наличии в ЛПХ или фермерском хозяйстве овец или кур, ею можно пренебречь.

Согласно приведенным в НТП-АПК нормам, для обеспечения различных технологических нужд ЛПХ и фермерских хозяйств разных направлений требуется горячая вода с разными температурными уровнями (для поения животных – 10–12°C, подмывания вымени коров – 40–45°C, приготовления кормов телятам – 40–65°C, бытовых нужд, мытья молочной посуды – 55–60°C, запаривания кормов – 100°C и т.д.).

Среднесуточные нормы потребления горячей воды на фермах крупного скота крестьянских хозяйств, согласно НТП-АПК 1.10.01.001-00, составляют:

- для молочных коров – 13 л (с температурой 55–65°C);
- для телят до 4 месяцев – 7 л (40–65°C);
- для телят от 4 до 6 месяцев, молодняка до 18 мес., нетелей – 2 л (40–65°C).

Среднесуточные нормы потребления горячей воды на свиноводческих фермах крестьянских хозяйств, согласно НТП-АПК 1.10.02.001-00, составляют:

- для свиноматок супоросных и холостых: 6 л – на приготовление кормов; 12 л – на поение;
- для свиноматок подсосных с приплодом: 20 л – на приготовление кормов; 20 л – на поение;
- для поросят-отъемышей: 6 л – на приготовление кормов; 1,5 л – на поение;
- для ремонтного молодняка и свиней на откорме: 6 л – на приготовление кормов; 4,5 л – на поение.

Горячая вода (100°C) или пар низкого давления используются для приготовления кормов (запаривания комбикорма), для поения всех видов свиней используется вода с температурой 10–16°C, для поросят-отъемышей с температурой 16–20°C.

Количество электроэнергии, потребляемое за сутки ЛПХ или фермерским хозяйством на приготовление горячей воды для каждого вида животных, в соответствии с НТП-АПК будет складываться из отдельного электропотребления на каждый вид технологической воды

$$W_{\text{ГВС}} = m \cdot c_m \cdot (T_k - T_n) \cdot n \cdot k_n, \quad (3.1)$$

где  $W_{\text{ГВС}}$  – расход электроэнергии на ГВС, кВт·ч;

$m$  – масса воды, кг;

$c_m$  – удельная теплоемкость воды (равна 4,19 Дж/(кг·К));

$T_n$  – начальная температура воды, °С (температура холодной воды принимается для зимних условий 5°C, а для летних условий 10°C);

$T_k$  – конечная температура воды в соответствии с НТП-АПК, °С;

$n$  – количество животных данного вида, гол.;

$k_n$  – коэффициент перевода из кДж в кВт·ч ( $k_n = 2,77 \cdot 10^{-4}$ ).

Таким образом, исходя из уровня электрификации быта жилого дома, характера ЛПХ или фермерского хозяйства, можно рассчитать требуемое количество горячей воды с соответствующим требуемым уровнем температуры.

## **3.2 Особенности горячего водоснабжения сельских жилых домов**

### ***3.2.1 Водопотребление сельских жилых домов***

Расчет потребности в горячей воде жителей сельского жилого дома является основой при подборе водонагревательного оборудования [2, 70, 97, 110, 116, 118]. При прогнозировании нужно всегда учитывать индивидуальные склонности и привычки потребителей. В таблицах 3.6 и 3.7 приведены типовые значения водоразборов (приблизительные) и расчетные потребности в горячей воде, применяемые для оценки горячего водоснабжения в Германии [2].

Анализ таблицы 3.6 показывает, что исходя из количества разовых расходов воды, потребляемых различными типами водоразборов (ванна, душ и т.д.), складывается суточный расход горячей воды, не-

обходимый для покрытия потребностей одного проживающего, а отсюда и полный суточный расход по сельскому жилому дому (коттеджу) в целом. Кроме этого, становится ясным, какой температуры вода используется в большинстве случаев. Также учитывается минимальный запас горячей воды, который должен быть обеспечен для потребителя при использовании конкретного водонагревателя.

**Таблица 3.6 – Отдельные виды водоразборов**

Тип водоразбора	Расход воды (в пересчете на одноразовое пользование), л	Температура расходной воды, °С	Минимальный запас горячей воды с температурой 60°С, л
Раковина для умывания	10–15	37	6–18
Ванна	150–180	40	90–108
Душ	30–50	37	16–27
Мойка на кухне	10–20	50	8–16

**Таблица 3.7 – Потребность сельского жилого дома в горячей воде в пересчете на одного человека, л/(сут·чел)**

Интенсивность потребления	Температура горячей воды		Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/(сут·чел)
	60°С	45°С	
Экономное	10–20	15–30	0,6–1,2
Среднее	20–40	30–60	1,2–2,4
Большое	40–80	60–120	2,4–4,8

Из таблицы 3.7 видно, что при расчете должна учитываться интенсивность водопотребления. Она может изменяться при переходе от одного потребителя к другому в четыре раза, в связи с этим удельный расход электроэнергии тоже увеличится в тех же пропорциях. Кроме того, в зависимости от температуры горячей воды ее расход также будет не одинаков, например: расход воды с температурой 45°С будет в 1,5 раза больше, чем воды с температурой 60°С.

Однако для российских потребителей значения норм расхода, как правило, несколько выше. Уровень водопотребления индивидуальных жилых домов (сельских жилых домов, коттеджей) зависит от внутреннего санитарно-технического оборудования жилого дома. В

зависимости от этого нормы расхода воды жителями принимаются по таблице 3.8 согласно СНиП 2.04.01-85.

При расчете суточной потребности в воде для горячего водоснабжения необходимо учитывать количество человек, проживающих в доме, и нормы расхода на одного жителя (табл. 3.8).

**Таблица 3.8 – Нормы расхода воды жителями жилых домов**

Водопотребитель	Удельное среднесуточное (за год) хозяйственно-питьевое водопотребление в населенных пунктах на одного жителя, л/сут
Индивидуальные или блокированные жилые дома:	
с водопроводом и канализацией без ванн	90–120
с газоснабжением	115–150
с водопроводом, канализацией и ваннами с водонагревателями, работающими на твердом топливе	140–180
с водопроводом, канализацией и ваннами с газовыми водонагревателями	170–190
с быстродействующими газовыми нагревателями и многоточечным водоразбором	190–250

*Примечание. Меньшие показатели принимаются для индивидуальных жилых домов (коттеджей), большие – для блокированного жилого дома с общей системой водоснабжения.*

### **3.2.2 Конструктивные особенности водонагревателей**

#### *3.2.2.1 Аккумуляционные водонагреватели*

Аккумуляционные водонагреватели (АВН) широко используются в городских квартирах, коттеджах и сельских жилых домах [25, 97]. Выбирая водонагреватель, нужно исходить из того, что прибора объемом 5–15 л достаточно лишь для мойки и умывальника. Водонагреватели емкостью 30–50 л можно использовать для душа. Если планируется пользоваться ванной, необходим бак объемом 80–150 л. Если же потребность в горячей воде еще больше, то целесообразно использовать напольный водонагреватель на 200–400 л и более.

При выборе водонагревателя в первую очередь необходимо определить потребность в горячей воде. Если речь идет об АВН, то необходимо руководствоваться нормами удельного среднесуточного водопотребления в расчете на одного человека (см. табл. 3.8).

Доля горячей воды с температурой 55°С в полном суточном объеме составляет 45–50 %.

Немаловажную роль при выборе играет мощность ТЭНов АВН, от которой зависит скорость нагрева воды. АВН небольших объемов (до 50 л) обычно имеют мощность 2 кВт и питаются от сети 220 В. Для водонагревателей больших объемов использование столь маленькой мощности нецелесообразно, так как вода в них будет нагреваться в течение продолжительного времени. Зная требуемое количество электроэнергии для нагрева суточного количества воды, можно рассчитать время нагрева. Задаваясь мощностью ТЭН или временем нагрева, рассчитывают мощность ТЭНов. Время нагрева можно рассчитать по формуле

$$\tau_{\text{наг}} = \frac{W_{\text{ГВС}}}{P_{\text{ТЭН}}} \cdot 60, \quad (3.2)$$

где  $\tau_{\text{наг}}$  – время нагрева, мин;

$P_{\text{ТЭН}}$  – мощность ТЭН, кВт (принимается из ряда стандартных мощностей ТЭНов).

Мощность ТЭН определяется по формуле

$$P_{\text{ТЭН}} = \frac{W_{\text{ГВС}}}{\tau_{\text{наг}}}. \quad (3.3)$$

### 3.2.2.2 Проточные водонагреватели

Если при выборе АВН необходимо руководствоваться в первую очередь объемом, то при выборе ПВН решающее значение имеет мощность. Естественно, что прибор, нагревающий воду в проточном режиме, должен быть мощнее, чем АВН, греющий тот же объем за гораздо более продолжительное время. Рассчитать необходимую мощность прибора можно по формуле

$$P_{\text{ГВС}} = q_0^h \cdot c_m \cdot (T_k - T_n), \quad (3.4)$$

где  $P_{ГВС}$  – расчетная мощность проточного водонагревателя, кВт;  
 $q_0^h$  – секундный расход горячей воды, л/с (для дома с ванной со смесителем – 0,18 л/с).

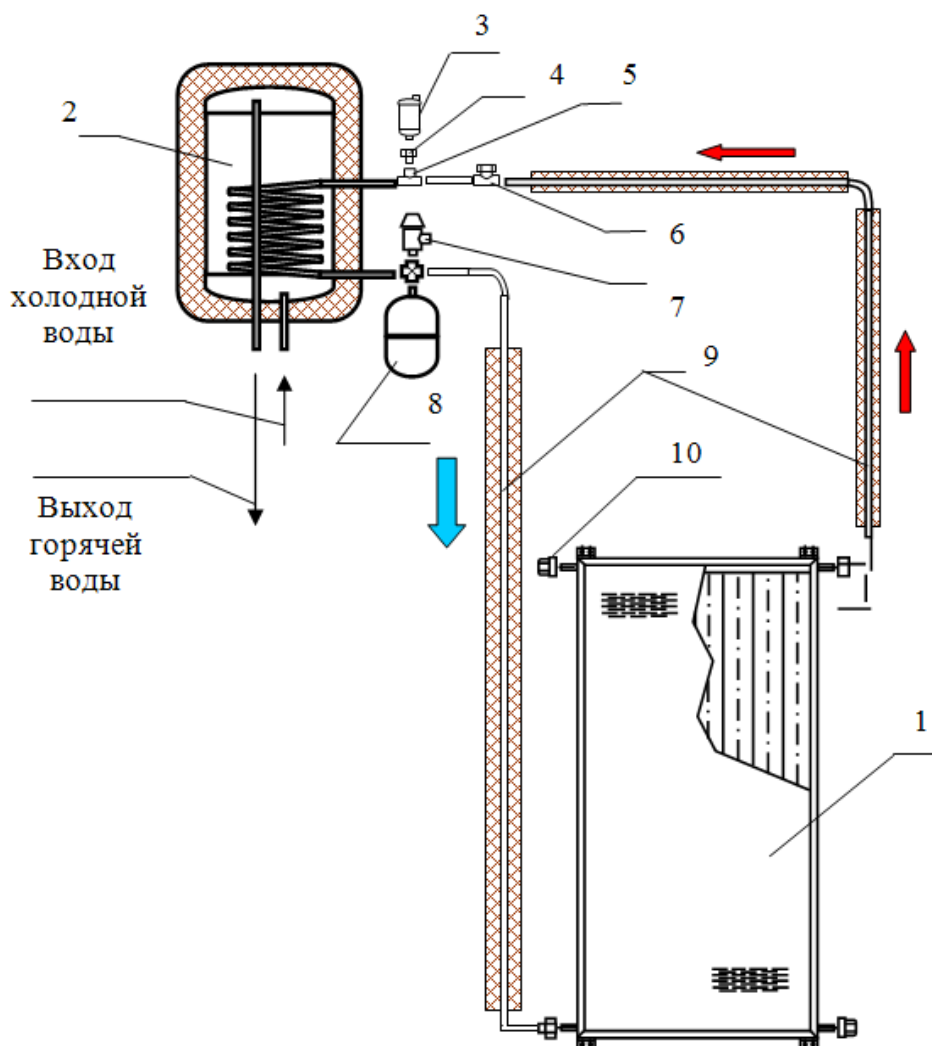
### 3.2.2.3 ССГВ на базе солнечного коллектора «Сокол»

Система солнечного горячего водоснабжения на базе СК «Сокол» представляет собой двухконтурную термосифонную систему, которая работает следующим образом. В системе (рис. 3.1) имеется отдельный замкнутый контур, состоящий из солнечного коллектора, трубопроводов и теплообменника в баке-аккумуляторе. Этот контур заправляется специальным (как правило, незамерзающим) теплоносителем либо водой. Солнечное излучение, проходя через стекло коллектора, поглощается приемной поверхностью и нагревает его металлическую поверхность и теплоноситель в ее каналах.

Солнечный коллектор «Сокол» представляет собой специальный теплообменник, преобразующий энергию солнечного излучения в тепловую энергию и передающий ее теплоносителю – жидкости, движущейся внутри каналов поглощающей панели (абсорбера) коллектора. Он является основным элементом систем солнечного теплоснабжения или ССГВ и в их составе используется для обеспечения горячей водой жилых зданий, сельскохозяйственных и коммунально-бытовых объектов.

При нагреве плотность теплоносителя снижается, и нагретая жидкость как более легкая фракция начинает всплывать в верхнюю точку СК и далее по трубопроводу поступает в расположенный выше уровня СК теплообменник бака-аккумулятора. Теплоноситель из солнечного коллектора поступает в верхнюю часть теплообменника, отдает тепло воде в баке и как более тяжелая фракция движется вниз к нижнему входу в СК, создавая постоянную циркуляцию теплоносителя при достаточной мощности СИ. Скорость и интенсивность циркуляции зависят от мощности солнечного излучения. Постепенно в течение светового дня происходит полный прогрев воды в баке, при этом отбор воды для использования производится из верхних, наиболее горячих слоев воды. За летний, солнечный день гелиоколлектор площадью 2 м<sup>2</sup> нагревает 80 л воды до температуры 50–70°С. Теплоносителем в коллекторном контуре является очищенная вода или незамерзающий антифриз.





*Рисунок 3.1 – Принципиальная схема солнечной системы горячего водоснабжения с естественной циркуляцией:*

*1 – солнечный коллектор «Сокол»; 2 – бак-аккумулятор Thertex-80 с теплообменником; 3 – воздухоотводчик автоматический; 4 – отсекающий клапан для воздухоотводчика; 5 – тройник; 6 – обратный клапан; 7 – клапан предохранительный (6 бар); 8 – бак расширительный мембранный; 9 – трубопроводы соединительные с теплоизоляцией; 10 – заглушка*

### **3.3 Разработка конструкций ССГВ**

#### ***3.3.1 Основные проблемы известных конструкций ССГВ***

В связи с широким внедрением в мире водонагревательных установок, использующих в качестве источника ВИЭ, встает вопрос об эффективном совместном использовании нескольких ВИЭ в одной

установке. Совместное использование энергии Солнца и ветра, при резервировании от электрической сети, для обеспечения нужд горячего водоснабжения сельских бытовых потребителей, коттеджей и сельских жилых домов, в настоящее время наиболее распространено. Однако предлагаемые конструкции комбинированных водонагревательных установок [57, 97] имеют существенные недостатки:

1. При заливке бака-аккумулятора холодной водой или при необходимости использования горячей воды в утреннее время, когда температура воды в баке-аккумуляторе минимальна, даже при максимальной интенсивности солнечной радиации, достаточной для нагрева воды до требуемой температуры, вода, нагретая от теплообменника и поднимающаяся в верхнюю часть бака-аккумулятора за счет конвекции, смешивается с холодной водой. Таким образом, вместе того, чтобы получить пусть немного, но горячей воды, потребитель получает много, но теплой воды.

2. При нагреве воды в баке-аккумуляторе от ТЭН картина аналогична вышеизложенному.

### ***3.3.2 ССГВ-конструкции КрасГАУ***

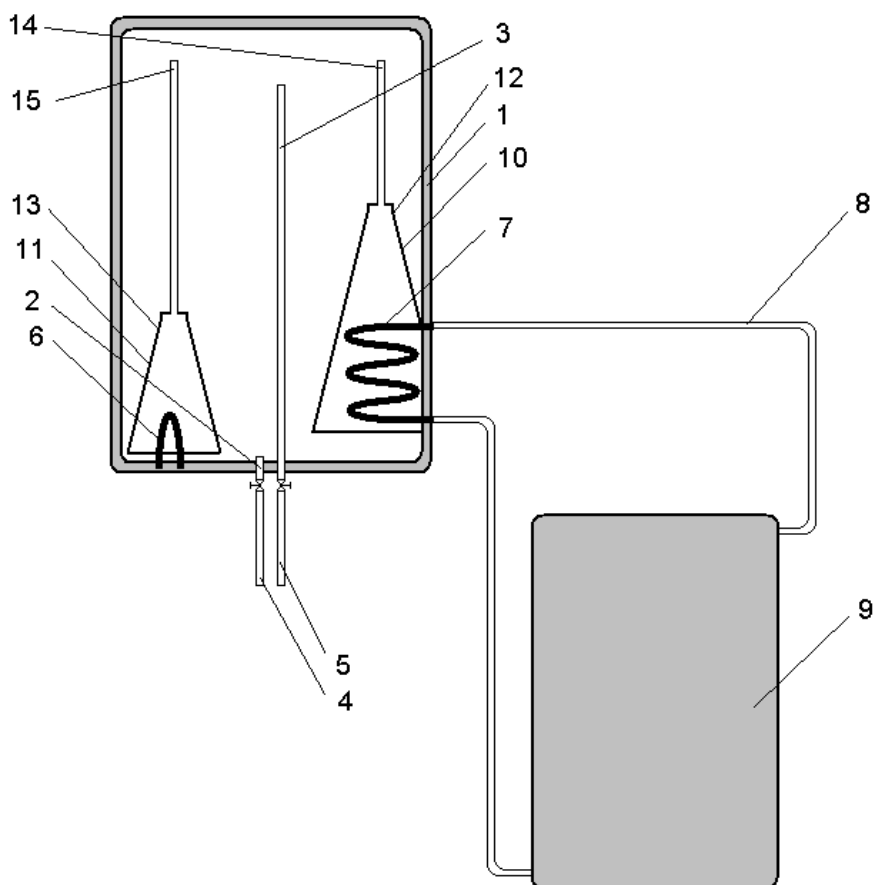
#### *3.3.2.1 ССГВ для комбинированного использования нескольких возобновляемых источников энергии*

Целью разработки предложенной нами конструкции ССГВ (патент РФ на изобретение №2382291 «Водонагревательная установка», рис. 3.2) [59] явилось повышение надежности горячего водоснабжения при совместном применении гелио-, ветроустановок и электрической энергии от энергетического ввода, а также эффективности преобразования солнечной энергии в тепловую. Водонагревательная установка работает следующим образом.

Холодная вода по трубопроводу холодной воды 4 через патрубок 2 поступает в бак-аккумулятор 1. Теплоноситель (антифриз, вода и т.п.), нагретый под действием солнечной радиации в солнечном коллекторе 9 за счет термосифонной циркуляции, поступает по соединительному трубопроводу 8 в теплообменник 7 и возвращается в солнечный коллектор 9. Теплообменник 7 нагревает объем воды, ограниченный первой обечайкой 10. Под действием конвекции подогретая вода через полый цилиндр 14 подается в верхнюю зону бака-аккумулятора 1. Поддержание требуемой температуры нагреваемой

воды, независимо от интенсивности ее нагрева солнечным коллектором 9, может осуществляться за счет использования биметаллической пластины (не показана), выполняющей роль терморегулятора жидкости и установленной в верхнем отверстии обечайки 10. По мере необходимости, при открытии вентиля горячей воды, горячая вода, забираемая из верхней зоны бака-аккумулятора патрубком 3 для забора горячей воды, подается потребителю.

Аналогично происходит нагрев воды во второй обечайке 11: группа ТЭН 6, подключенная к генератору ветроэлектрической станции, или группа ТЭН 6, подключенная к электрической сети энерговода объекта теплоснабжения, нагревает воду, которая подается через полый цилиндр 15 в верхнюю зону бака-аккумулятора.



*Рисунок 3.2 – Водонагревательная установка:*

*1 – бак-аккумулятор; 2 – патрубок для подачи холодной воды; 3 – патрубок для забора горячей воды; 4 – трубопровод холодной воды; 5 – трубопровод горячей воды; 6 – трубчатые электронагреватели; 7 – теплообменник; 8 – соединительный трубопровод; 9 – гелиоколлектор; 10, 11 – обечайка; 12, 13 – полые усеченные конусы; 14, 15 – полые цилиндры*

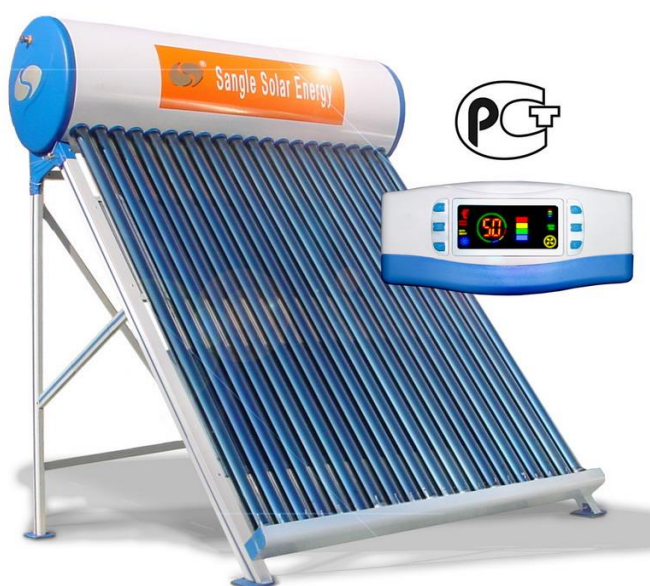
Поддержание требуемой температуры нагреваемой воды, независимо от интенсивности ее нагрева ТЭНами 6, может также осуществляться за счет использования биметаллической пластины (не показана), выполняющей роль терморегулятора жидкости и установленной в верхнем отверстии обечайки 11.

Предлагаемая водонагревательная установка нами технически реализована на базе ССГВ с использованием солнечного коллектора «Сокол» и бака-аккумулятора Thermex-80 с теплообменником.

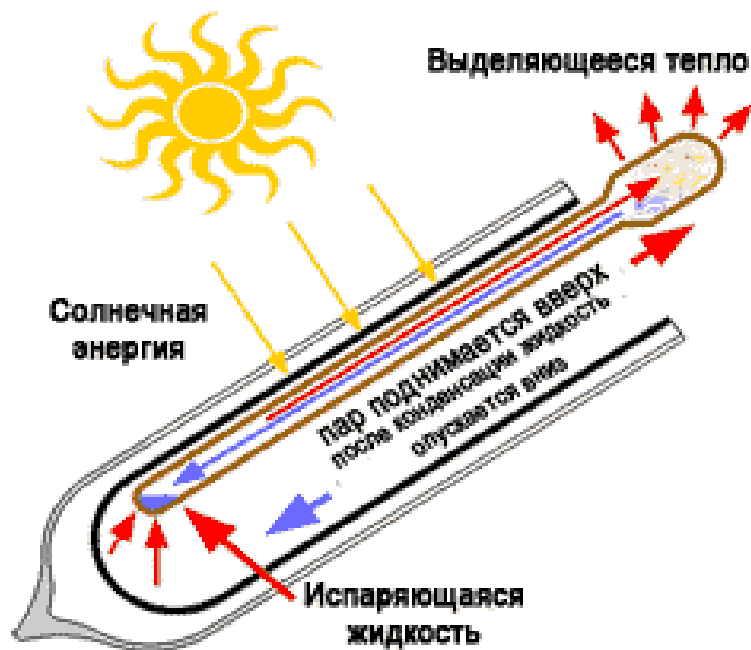
### *3.3.2.2 Система солнечного горячего водоснабжения с вакуумированным трубчатым солнечным коллектором*

Целью разработки предложенной нами конструкции ССГВ с вакуумированным трубчатым солнечным коллектором (патент на изобретение №2491482 «Система солнечного горячего водоснабжения» от 27.08.2013 г., авторы – Бастрон А.В., Судаев Е.М.) является повышение надежности горячего водоснабжения при совместном применении гелио-, ветроустановок и электрической энергии от энергетического ввода, а также эффективности преобразования солнечной и ветровой энергии в тепловую.

За основу может быть принята ССГВ компании «Sangle Solar Energy» (рис. 3.3), в которой вакуумированные трубки с теплопроводящим стержнем (рис. 3.4) образуют трубчатый вакуумированный солнечный коллектор или ее аналог ССГВ НМ-16х18/58 также производства КНР.

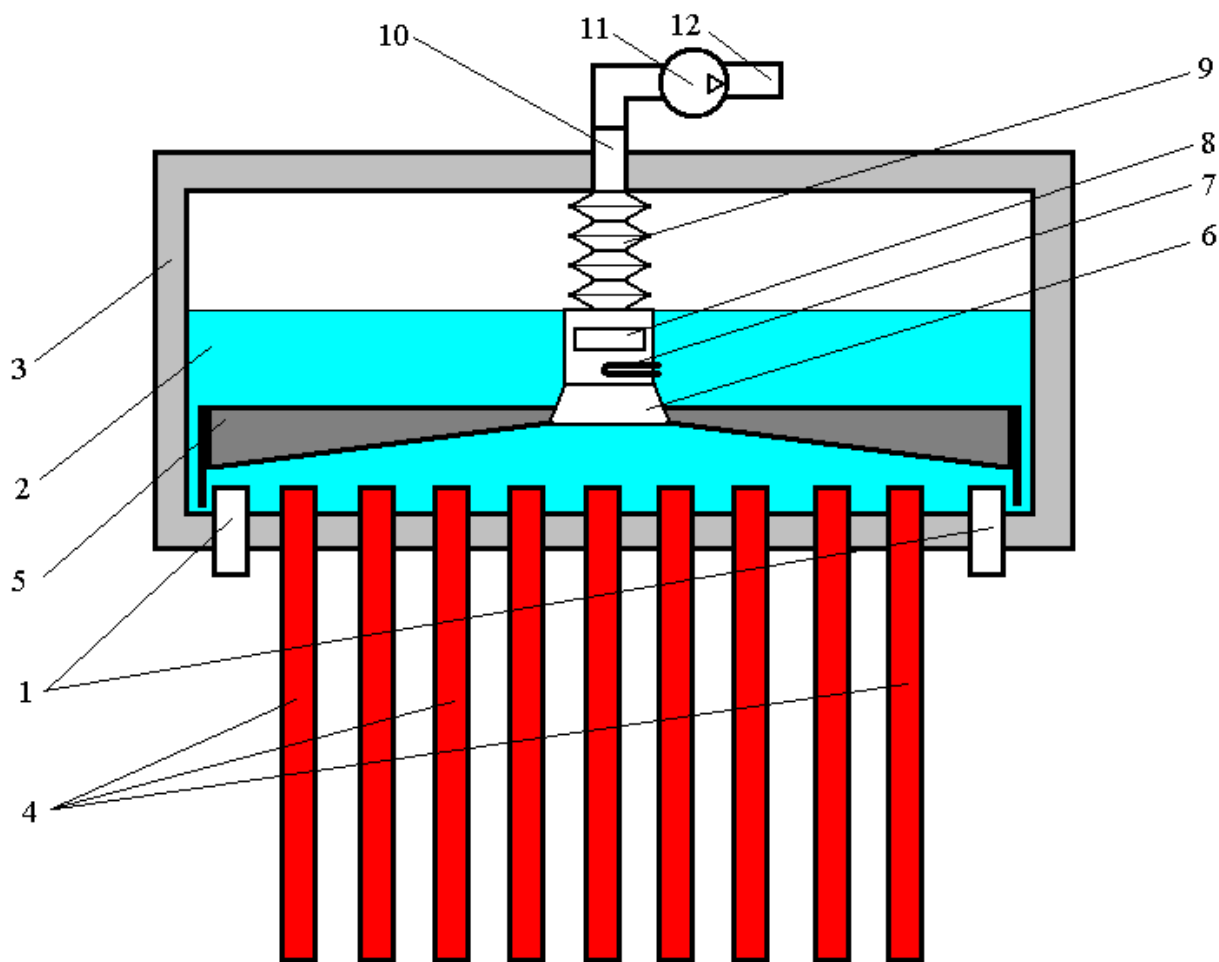


*Рисунок 3.3 – ССГВ компании «Sangle Solar Energy»*



*Рисунок 3.4 – Вакуумированная стеклянная трубка с теплопроводящим стержнем*

ССГВ-установка устроена следующим образом. Холодная вода по трубопроводу через патрубки 1 поступает в бак-аккумулятор 2 (рис. 3.5). Для снижения потерь тепловой энергии бак имеет термоизоляцию 3. Солнечная радиация, поступающая на поверхность стеклянной вакуумированной трубки с теплопроводящим стержнем 4, частично отражается от стекла, частично поглощается стеклом. Большая часть за счет цилиндрической формы стеклянной трубки фокусируется на поверхности селективного покрытия, расположенного на внешней поверхности теплопроводящего стержня, независимо от положения Солнца на горизонте. Часть солнечной энергии отражается от селективного покрытия и теряется через стекло и вакуум. Солнечная радиация, преобразованная в тепловую энергию, нагревает холодную воду в нижней части бака-аккумулятора 2. Бак снабжен устройством для сбора горячей воды, выполненным в виде плавающей платформы 5 (например, из пенопласта). Нижняя поверхность платформы 5 выполнена конусообразно, с отверстием посередине, в которое установлено водозаборное устройство 6. В нижней части водозаборного устройства установлен ТЭН 7. Над ТЭНом выполнено отверстие 8. Водозаборное устройство 6 соединено гофрированным шлангом 9 с патрубком горячей воды 10, соединенным через нагнетательный насос 11 с трубопроводом горячей воды 12.



*Рисунок 3.5 – Разрез ССГВ конструкции КрасГАУ*

Поскольку в ССГВ компании «Sangle Solar Energy» предусмотрено использование нагнетательного насоса, датчиков уровня и температуры, микропроцессорного устройства, то потребуется разработка нового алгоритма работы оборудования водонагревателя, который может быть реализован существующим микропроцессорным устройством. Рассмотрим основные моменты алгоритма работы предлагаемой конструкции водонагревателя.

В первоначальный момент (раннее утро), когда горячая вода израсходована, контроллером устанавливается минимальный уровень воды в баке путем открытия электромагнитного клапана (не показан) на трубопроводе холодной воды. Платформа 5 опирается на опоры, и холодная вода через два патрубка 1 (слева и справа), поступая в бак, омывает горячие концы теплопроводящих стержней вакуумированных трубок 4. Нагреваясь, горячая вода за счет конвекции поднимается вверх и через отверстие 8 в водозаборном устройстве 6 растекается в верхнем слое, обеспечивая постоянную конвекцию воды в водо-

нагревателе. По мере нагрева воды в баке 2 интенсивность нагрева теплопроводящими стержнями падает, тогда при заданной температуре, уровень воды открытием клапана повышают до следующей отметки. Платформа 5 всплывает. Плавучесть ее рассчитана таким образом, чтобы ТЭН 7 и отверстие 8 находились в воде. Потребитель открывает кран горячей воды, контроллером включается нагнетательный насос 11, верхний, наиболее горячий слой воды подается через отверстие 8 и гофрированный шланг 9 потребителю. По мере расхода горячей воды платформа 5 опускается. При достижении минимального уровня (платформа упирается опорами в дно бака) через электромагнитный клапан и патрубки 1 в бак-аккумулятор 2 вновь подается холодная вода. Если потребитель по-прежнему нуждается в горячей воде, а солнечной энергии недостаточно для интенсивного нагрева воды (температура воды ниже заданной), контроллер информирует потребителя и по его команде (или заблаговременному разрешению) включает ТЭН 7.

Установка ТЭН 7 на плавающей платформе 5 позволяет повысить эффективность нагрева воды за счет того, что ТЭН подогревает предварительно нагретую солнечной энергией воду. ТЭН может быть также подключен к ветроэлектрической станции соответствующей мощности.

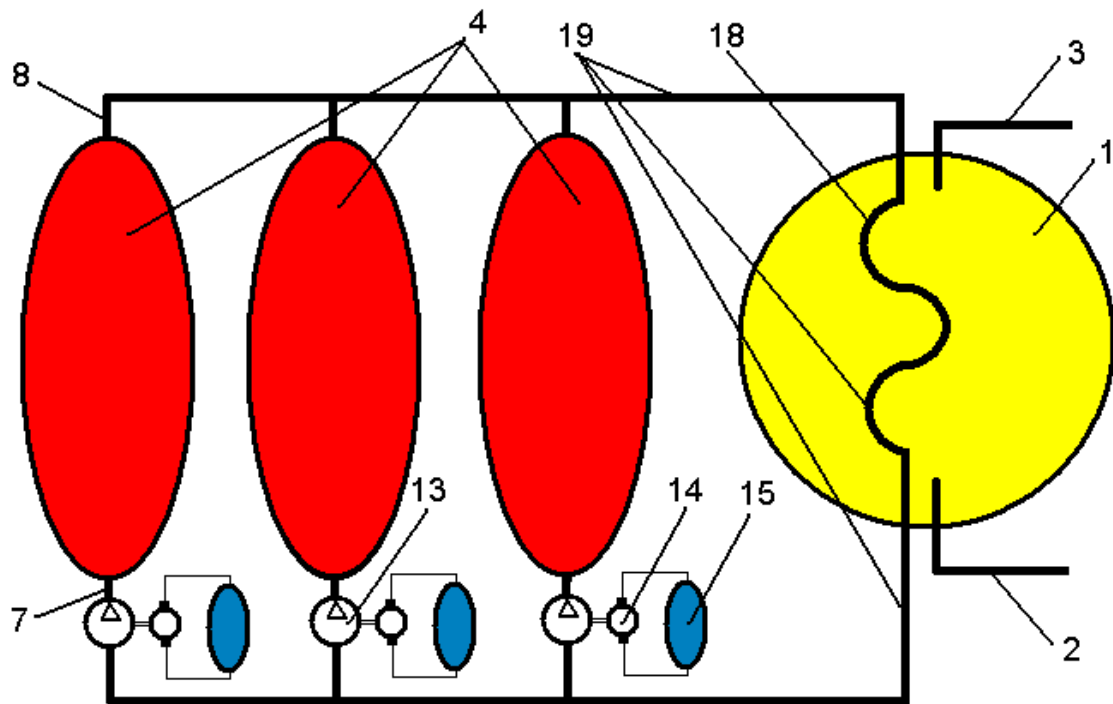
### *3.3.2.3 Двухконтурная система солнечного горячего водоснабжения*

Эффективность использования солнечной энергии ССГВ напрямую зависит от интенсивности потока поглощенной гелиоколлектором солнечной энергии, который в свою очередь зависит от пространственного положения гелиоколлектора и достигает максимума только тогда, когда солнечные лучи перпендикулярны плоскости коллектора.

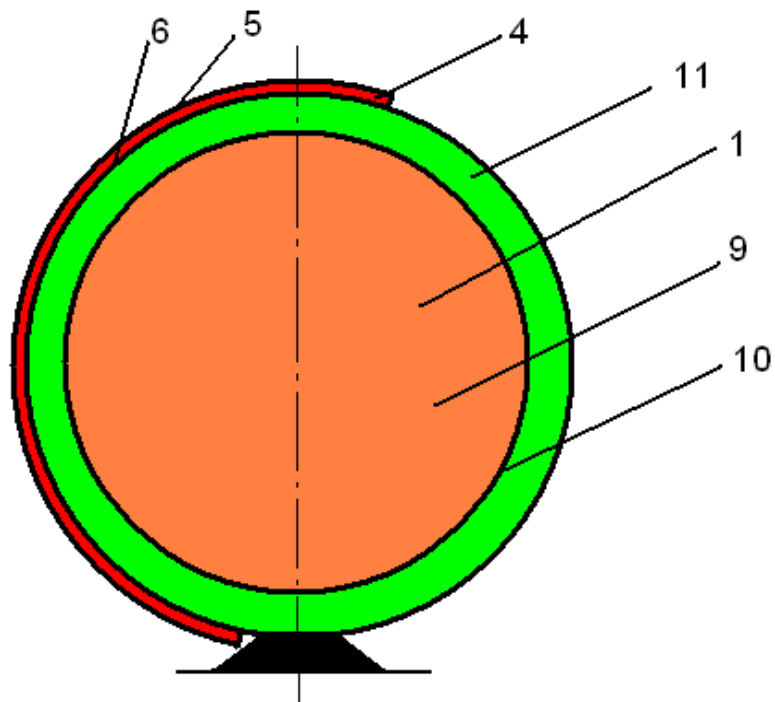
Целью разработки предложенной нами системы солнечного горячего водоснабжения является повышение эффективности использования солнечной энергии.

На рисунке 3.6 приведена принципиальная схема двухконтурной системы солнечного горячего водоснабжения (патент РФ на изобретение № 2319910 «Двухконтурная система солнечного горячего водоснабжения». Авторы Бастрон А.В., Судаев Е.М., Лемясов П.П. [58]). На рисунке 3.7 представлен разрез солнечной водонагревательной

установки. На рисунке 3.8 показаны солнечные коллекторы в виде сегментов сферы. На рисунке 3.9 показаны солнечные фотоэлектрические батареи с образованием отдельных сегментов сферы.

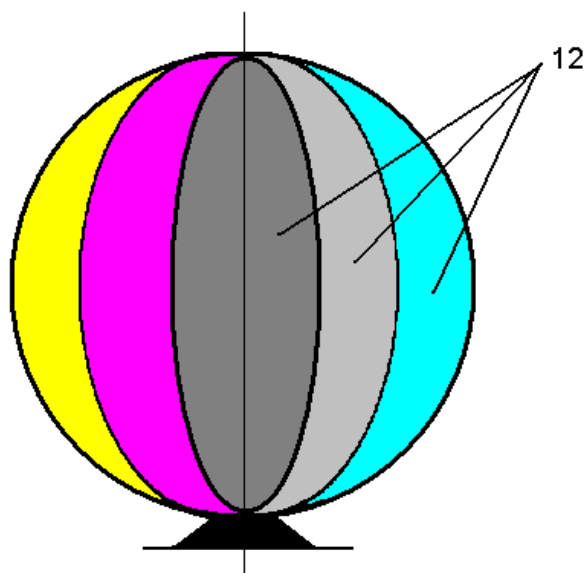


*Рисунок 3.6 – Двухконтурная система солнечного горячего водоснабжения*

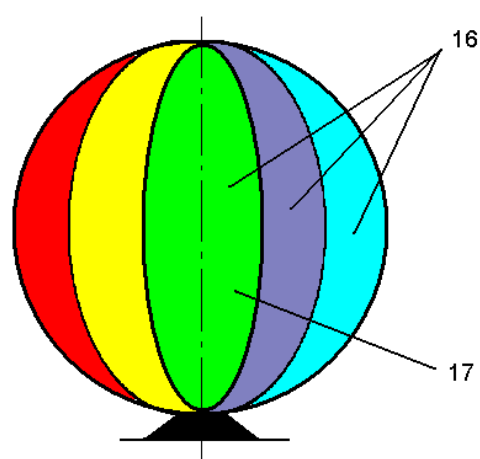


*Рисунок 3.7 – Разрез солнечной водонагревательной установки*





*Рисунок 3.8 – Солнечные коллекторы в виде сегментов сферы*



*Рисунок 3.9 – Солнечные фотоэлектрические батареи с образованием отдельных сегментов сферы*

На поверхность отдельных солнечных коллекторов 4, выполненных в виде сегментов сферы 12, как и на поверхность отдельных сегментов фотоэлектрических батарей 15, солнечная радиация поступает неравномерно, в зависимости от положения солнца над горизонтом. Предположим, что Солнце над горизонтом расположено так, что левый солнечный коллектор 4 (как показано на рис. 3.8) освещается солнцем полностью, средний коллектор 4 освещен частично, а правый коллектор 4 находится в тени. Аналогично будут освещены солнечные фотоэлектрические батареи 15.

Под действием солнечной прямой и рассеянной радиации, поступающей сквозь прозрачную изоляцию 5 на поверхность поглощающей панели 6, происходит нагрев поглощающей панели 6 и нагрев жидкости (например, воды или антифриза) в левом солнечном коллекторе 4. Аналогично под действием солнечной радиации левый сегмент 16 фотоэлектрических батарей 15 вырабатывает постоянный ток, который подается на электродвигатель 14 (например, двигатель постоянного тока независимого возбуждения), который вращает насос 13. Жидкость циркулирует по замкнутому контуру 19 через левый коллектор 4, отдавая через теплообменник 18 тепловую энергию жидкости, помещенной в баке-аккумуляторе 1. Необ-

ходимость использования в принципиальной схеме двухконтурной системы солнечного горячего водоснабжения насосов 13 связано с тем, что бак-аккумулятор 1 расположен по отношению к солнечным коллекторам 4 так, что естественная циркуляция в контуре не возникает. Поскольку на средний солнечный коллектор 4 поступает меньше солнечной радиации, чем на левый, требуется меньшая скорость циркуляции жидкости в контуре 19, чтобы температура теплоносителя из среднего коллектора 4 была равна температуре теплоносителя из левого коллектора 4, что достигается меньшей величиной выходного напряжения среднего сегмента 16 фотоэлектрических батарей 15.

Если интенсивность рассеянной солнечной радиации, поступающей на правый сегмент 16 фотоэлектрических батарей 15 недостаточна для выработки напряжения (прямой радиации нет, так как правый сегмент 16 находится в тени), необходимого для вращения двигателя 14 насоса 13 правого коллектора 4, то нет и циркуляции жидкости в контуре 19 через правый коллектор 4.

Таким образом, скорость циркуляции жидкости в контуре 19 по каждому солнечному коллектору 4 пропорциональна интенсивности солнечной радиации, а температура на выходе из отдельных коллекторов примерно одинакова, тем самым обеспечивается наивысший потенциал температуры в контуре 19, и теплообменник 18 нагревает воду в баке-аккумуляторе 1 на большую температуру. По мере расхода горячей воды из бака-аккумулятора 1 через патрубок 3 она восполняется холодной из патрубка 2.

Выполнение солнечных коллекторов 4 в виде сегментов сферы повышает эффективность использования солнечной энергии, так как солнечные лучи всегда перпендикулярны поверхности сферы и фокусируются за счет сферической прозрачной изоляции 5 на поверхности поглощающей панели 6.

Таким образом, нами разработаны три оригинальные конструкции водонагревателей, сочетающих в себе функции проточного и аккумуляционного водонагревателя. При этом потребителю почти мгновенно, при небольшом или среднем расходе воды, поступает горячая вода, независимо от интенсивности и продолжительности солнечного сияния или скорости ветра.

### **3.4 Обоснование параметров и моделирование режимов работы ССГВ**

Экспериментальные исследования ССГВ позволяют оценить лишь потенциальные возможности их применения в конкретных климатических условиях и не позволяют в полном объеме исследовать влияние различных факторов на их энергетические характеристики. Для учета большого числа факторов, влияющих на работу рассматриваемых установок, широко используются математические модели, реализованные на ЭВМ [116, 119].

Особенностью ССГВ является то, что эффективность их применения существенно зависит от тех показателей, которые закладываются на стадии проектирования. Так, например, выбор площади СК сверх оптимального значения может привести к неполному использованию потребителем энергии, вырабатываемой ССГВ. Вследствие чего стоимость тепловой энергии, получаемой от такой установки, может оказаться выше, чем от традиционного источника. Из вышесказанного следует, что правильный выбор параметров ССГВ является важной задачей при их массовом проектировании, решение которой возможно только на основе математического моделирования [116, 119].

#### ***3.4.1 Моделирование параметров внешней среды***

Из всех параметров внешней среды основное влияние на энергетические характеристики ССГВ оказывают такие параметры, как интенсивность солнечной радиации и температура окружающего воздуха.

При определении теплопроизводительности ССГВ за расчетный период (месяц, год или сезон) необходимо знать количество тепловой энергии, которое может быть получено от нее в отдельные сутки этого периода. В связи с этим возникает задача по определению значений параметров внешней среды в отдельные часовые интервалы суток.

##### ***3.4.1.1 Моделирование интенсивности солнечной радиации и потока солнечной радиации за данные сутки***

Для моделирования поступления СР в разрезе суток по методике, предложенной МЭИ [27, 28], разработана подпрограмма «Модель изменения мощности потока и потока СР за сутки», исходными данными для которой являются:

- географические координаты ( $\varphi$  и  $\psi$  – широта и долгота станции в градусах) и высота над уровнем моря  $h$ , рассматриваемой точки  $A$ , м;

- номер суток с начала года  $n$ , о.е.;

- фактическое местное декретное время  $t$ , ч;

- декретный полдень данного часового пояса («летнее» и «зимнее» время), совпадающий со средней долготой данной зоны  $t_{c.c}$ , ч;

- максимальное значение СР в течение суток  $R_h^{max}$ , Вт/м<sup>2</sup>.

Результатом проводимого моделирования являются:

- зависимость изменения мощности потока СР  $R_h(t)$  в течение суток;

- поток солнечной радиации за данные сутки  $\mathcal{E}_h$ , кВт·ч/(м<sup>2</sup>/сут).

Расчет изменения мощности потока солнечной радиации в течение суток в точке  $A$  с координатами ( $\varphi, \psi$ ) –  $R_h(t)$ , Вт/м<sup>2</sup> и потока солнечной радиации за данные сутки –  $\mathcal{E}_h(t)$ , МДж/м<sup>2</sup>, при известных: номере дня в течение года  $n$  и максимальных значениях  $R_h^{max}$ , Вт/м<sup>2</sup>, целесообразно вести согласно методике, предложенной в [28]. Изменение солнечной радиации в сутках происходит по синусоиде

$$R_h(t) = R_h^{max} \sin\left(\frac{\pi t'}{T_c}\right) = R_h^{max} \sin\lambda, \quad (3.5)$$

где  $t'$  – время после восхода солнца  $0 \leq t' \leq T_c$ , определяемое с учетом принятой модели изменения солнечной радиации в сутках, ч;

$\lambda$  – в радианах ( $0 \leq \lambda \leq 3,14$ ).

Продолжительность солнечного дня в данные сутки в точке  $A$  –  $T_c$  (ч) рассчитывается по формуле

$$T_c = \frac{2}{15} (\arccos(-tg\varphi tg\delta)), \quad (3.6)$$

где  $\delta$  – склонение Солнца.

Склонение Солнца  $\delta$  в данные сутки  $n$  определяется по формуле Купера

$$\delta = \delta_0 \sin(360^\circ(284 + n)/365), \quad (3.7)$$

где  $\delta_0 = +23^{\circ}27' = 23,45$  для северного полушария;  
 $n$  – номер суток с начала года.

Часовой угол Солнца  $\omega$  в точке  $A(\varphi, \psi)$  в рассматриваемый момент местного времени суток  $t$  определяется по формуле

$$\omega = 15 \text{ }^{\circ}/\text{ч} (t - t_{c.c.}) + (\psi - \psi_{\text{зона } i}), \quad (3.8)$$

где  $t$  – фактическое местное декретное время, ч;  
 $t_{c.c.}$  – декретный полдень данного часового пояса («летнее» и «зимнее» время), совпадающий со средней долготой данной зоны, ч;  
 $\psi$  – фактическая долгота точки  $A$ .

Наличие зависимости  $R_h(t)$  в течение суток позволяет определить и значение потока солнечной радиации за данные сутки  $\mathcal{E}_h$ , кВт·ч/(м<sup>2</sup>/сут), двумя способами: численным интегрированием  $R_h(t)$  по  $t$  или аналитически по формуле

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_h &= \int_{T_{\text{сут}}} R_h(t) dt \approx \int_{T_{\text{сут}}} R_h^{\text{max}} \sin\left(\frac{\pi t'}{T_c}\right) dt \approx \\ &\approx \left(\frac{2T_c}{\pi}\right) R_h^{\text{max}} \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Для расчета  $\mathcal{E}_h$ , МДж/м<sup>2</sup>, выражение (3.9) примет вид

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_h &= \int_{T_{\text{сут}}} R_h(t) dt \approx 3,57 \cdot 10^{-3} \int_{T_{\text{сут}}} R_h^{\text{max}} \sin\left(\frac{\pi t'}{T_c}\right) dt \approx \left(\frac{2T_c}{\pi}\right) R_h^{\text{max}} \cdot \\ &\cdot 3,57 \cdot 10^{-3}. \end{aligned} \quad (3.10)$$

Результаты расчетов для среднего дня месяца: января, апреля, июля и октября – по станции Солянка (Красноярск) представлены на рисунке 3.10.

Результаты расчета потока солнечной радиации за сутки по месяцам года по станции Солянка (Красноярск) (при безоблачном небе) представлены в таблице 3.9.

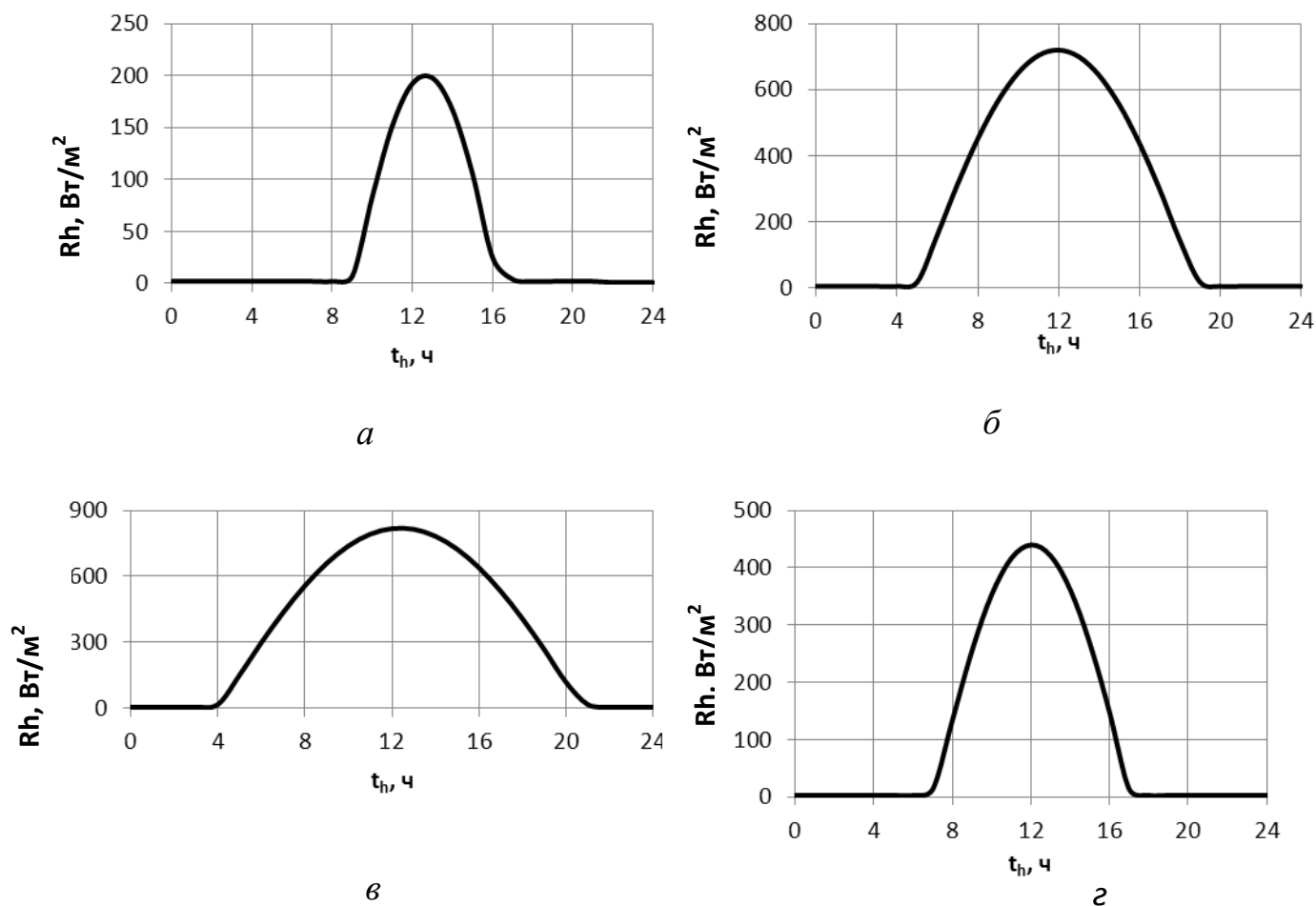


Рисунок 3.10 – Изменение солнечной радиации в течение суток: а – в январе; б – в апреле; в – в июле; г – в октябре

Таблица 3.9 – Поток солнечной радиации за сутки  $\mathcal{E}_h$ , кВт·ч/(м<sup>2</sup>·сут) и МДж/(м<sup>2</sup>·сут)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
кВт·ч/(м <sup>2</sup> ·сут)	0,93	2,24	4,15	6,37	8,68	9,36	8,76	7,10	4,84	2,83	1,26	0,73
МДж/(м <sup>2</sup> ·сут)	3,34	8,04	14,94	22,93	31,25	33,69	31,53	25,56	17,42	10,19	4,54	2,63

Интегральная кривая поступления солнечной радиации на горизонтальную поверхность для среднего дня марта в безоблачный день, приведенная на рисунке 3.11, показывает, как в течение суток может «накапливаться», например в ССГВ, суммарная солнечная радиация  $R_{\Sigma c}(t)$ .

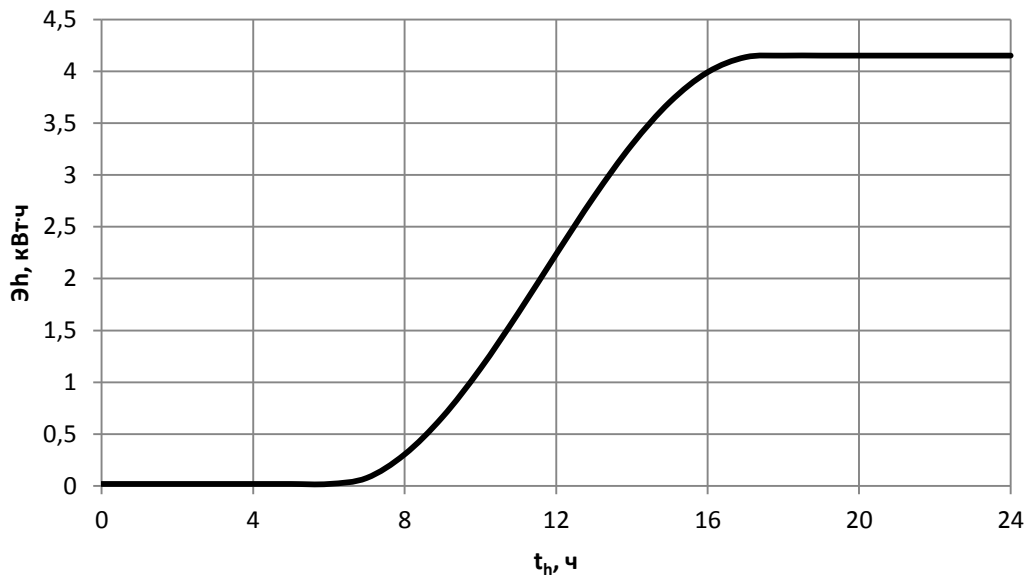


Рисунок 3.11 – Интегральная кривая поступления солнечной радиации на горизонтальную поверхность по станции Солянка (Красноярск) для среднего дня марта в безоблачный день

### 3.4.1.2 Моделирование температуры окружающего воздуха

Температура окружающего воздуха оказывает существенное влияние на выработку тепловой энергии, производимой ССГВ, и должна использоваться в дальнейших расчетах так же, как и суммарная солнечная радиация, поступающая на гелиоколлектор, с учетом географических координат местности.

Для построения математической модели среднемесячной температуры нами использованы многолетние данные (с 1980 по 2005 г.) Среднесибирского УГМС ГУ «Красноярский ЦГМС-Р» Гидрометеорологического центра (г. Красноярск). Среднемесячные значения температуры по 56 метеостанциям и метеопостам Красноярского края являются исходными массивами информации для программ расчета параметров уравнений, описывающих температурные поля с учетом географических координат интересующей местности. Модель среднемесячной температуры выполнена в среде Maple 11.0 [83].

Температура окружающего воздуха,  $T_o$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , в момент времени  $t$  в точке с координатами  $(\varphi_A; \psi_A)$  описывается рядом Фурье, представленным уравнением

$$T_{o(\varphi_A; \psi_A)}(t) = c(\varphi_A; \psi_A) + \left[ \sum_{k=1}^{n_1} (a_{1k}(\varphi_A; \psi_A) \cos(\frac{2\pi kt}{\tau}) + b_{1k}(\varphi_A; \psi_A) \sin(\frac{2\pi kt}{\tau})) \right], \quad (3.11)$$

где  $\varphi_A$  – географическая долгота местности;  
 $\psi_A$  – географическая широта местности;  
 $a_{1k}, b_{1k}$  – коэффициенты разложения квазипериодической функции;  
 $k$  – индекс суммирования;  
 $c$  – постоянная составляющая температуры для местности с географической долготой  $\varphi_A$  и широтой  $\psi_A$ , °С;  
 $\tau$  – годовой цикл;  
 $t$  – время.

Таким образом, разработанная нами математическая модель позволяет:

- производить расчет температуры наружного воздуха  $T_o$ , °С, для заданной точки  $A(\varphi, \psi)$  с расчетным интервалом  $\Delta t_i$  (от одного месяца до 300 месяцев) в период с января 1980 года по декабрь 2005 года;
- представлять наглядно среднемесячную температуру наружного воздуха в виде одной или нескольких (до 300) трехмерных изображений поверхностей с привязкой к географическим координатам территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва в период с января 1980 года по декабрь 2005 года.

Для моделирования режимов работы ССГВ разработана программа «ССГВ», исходными данными для которой являются:

- географические координаты ( $\varphi$  и  $\psi$  – широта и долгота станции, в градусах) и высота над уровнем моря  $h$ , м, точки  $A$ , в которой устанавливается ССГВ;
- нормы потребления горячей воды в жилых и общественных зданиях в зависимости от вида установки горячего водоснабжения;
- количественный и качественный состав потребителей горячей воды;
- температура холодной воды, поступающей в ССГВ  $T_{xв}$ , °С;
- тип ССГВ и ее технические характеристики:
  - проточная (аккумуляционная, аккумуляционно-проточная);
- тип СК и его технические характеристики:
  - площадь СК  $A_{ск}$ , м<sup>2</sup>;
  - угол наклона СК к югу  $\beta$ , град;
  - удельная теплоемкость СК  $C_{np}$ , КДж/м<sup>2</sup> · °С;
  - приведенный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора  $U_L$ , Вт/(м · °С);



- оптический КПД СК  $(\overline{\alpha\tau})$ , о.е.;
- коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора  $U_L$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С);
- коэффициент эффективности переноса тепловой энергии от СК к теплоносителю  $f_{\text{э}}$ , о.е.;
- коэффициент, учитывающий затенение (запыление, загрязнение) СК  $K_3$ , о.е.

Результатами моделирования являются:

- суточный график температуры горячей воды в ССГВ  $T_{\text{гв}}$ , °С, при изменении угла наклона СК к югу  $\beta$ ;
- оптимальный угол наклона СК (месячный, сезонный, годовой);
- суточная (месячная, годовая и за заданный период) выработка тепловой энергии ССГВ;
- коэффициент замещения  $K_{\text{зам}}$ , о.е.

Моделирование среднемесячного потока СР на наклонную поверхность СК целесообразно проводить по методу Лю и Джордана [86]. Метод предназначен для расчета суточного прихода солнечной радиации на наклонную площадку, ориентированную в юго-восточном, южном и юго-западном направлении.

Предполагается, что суммарная солнечная радиация состоит из прямой  $\mathcal{E}_{\text{пр}}$ , диффузной  $\mathcal{E}_{\text{д}}$  и отраженной  $\mathcal{E}_{\text{отр}}$  составляющих, и расчет  $\mathcal{E}_{\beta}$  производится по формуле

$$\mathcal{E}_{\beta} = K_{\Sigma} \mathcal{E}_{\Gamma} = \mathcal{E}_{\text{пр}\beta} + \mathcal{E}_{\text{д}\beta} + \mathcal{E}_{\text{отр}\beta}, \quad (3.12)$$

где  $\mathcal{E}_{\beta}$  – приход суммарной радиации на наклонную с углом  $\beta$  площадку;

$K_{\Sigma}$  – отношение среднемесячных дневных приходов суммарной радиации на наклонную и горизонтальные поверхности, рассчитываемое по формуле

$$K_{\Sigma} = [(1 - \mathcal{E}_{\text{д}}/\mathcal{E}_{\Gamma}) K_{\text{пр}} + (\mathcal{E}_{\text{д}}/\mathcal{E}_{\Gamma}) (1 + \cos\beta)/2] + [\rho(1 - \cos\beta)/2], \quad (3.13)$$

где  $\rho$  – отражательная способность Земли (альбедо), изменяющаяся от 0,2 до 0,7 в зависимости от продолжительности снежного покрова.

Отношение  $\mathcal{E}_{\text{д}}/\mathcal{E}_{\Gamma} = K_{\text{д}}$  может быть найдено для заданных значений  $K_0$  (прозрачности атмосферы) для каждого месяца года. Значение  $K_{\text{пр}}$ , равное отношению среднемесячных приходов прямой СР на

наклонную и горизонтальные площадки, определяется по формуле Клейна

$$K_{\text{пр}} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right) \omega'_s \sin \varphi \sin \delta}, \quad (3.14)$$

где  $\omega_s$  – часовой угол захода Солнца на горизонтальной площадке, град, задаваемый выражением

$$\omega_s = \arccos(-\operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \delta), \quad (3.15)$$

$\omega'_s$  – часовой угол захода Солнца на наклонной площадке, град

$$\omega'_s = \min[\omega_s \arccos(-\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \operatorname{tg} \delta)], \quad (3.16)$$

$\delta$  – склонение Солнца, град

$$\delta = 23,45^\circ \sin[360^\circ(284+n)/365], \quad (3.17)$$

где  $n$  – порядковый номер дня года (начиная с  $n=1$ , соответствующего 1 января каждого года), о.е.

Полученные с использованием баз данных по актинометрическим станциям Норильск, Туруханск, Тура, Ванавара, Енисейск, Солянка, Шумиха, Хакасская, Кызыл, Назарово, КАТЭК месячные значения СР на горизонтальную приемную площадку прямой и рассеянной (диффузной) солнечной радиации послужили исходными данными для расчета отношения среднемесячных дневных приходов суммарной радиации на наклонную и горизонтальные поверхности по указанным актинометрическим станциям. Далее исследование проводилось аналогично моделированию поля солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва (глава 2). Результаты моделирования среднемесячного потока СР на наклонную поверхность СК, размещенного вблизи актинометрической станции Солянка (г. Красноярск), близки по значениям, полученным д-ром техн. наук С.К. Шерьязовым для Южного Урала [116].

Исследование влияние угла наклона СК ССГВ, находящейся на 54–56 параллели, на приход СР за расчетный период показало, что максимальный приход СР за год можно ожидать при угле наклона СК 40–50 град, а с мая по сентябрь – при 25 град [116].

Для СК предлагаемой нами сферической формы справедливо выражение

$$R_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n R_{\Sigma i}, \quad (3.18)$$

где  $R_{\Sigma i}$  – мощность потока суммарной солнечной радиации на поверхности  $i$ -го сегмента сферического коллектора, Вт/м<sup>2</sup>;

$i$  – количество сегментов сферического СК, на которые падает солнечная радиация.

### **3.4.2 Моделирование тепловых процессов, протекающих при работе ССГВ**

Изучение литературы, посвященной использованию солнечной энергии в системах солнечного горячего водоснабжения [1, 2, 4, 5, 14, 20, 30, 41, 46, 116–120], позволило установить, что в ССГВ протекают два основных тепловых процесса – разогрев солнечных коллекторов до рабочей температуры и нагрев воды в баке-аккумуляторе. Наиболее целостное математическое описание тепловых процессов, протекающих при работе ССГВ, предложено д-ром техн. наук С.К. Шерьязовым и канд. техн. наук Р.А. Ахметжановым (Челябинский государственный агроинженерный университет) [7]. Для дальнейших расчетов примем ее за основу.

Нагрев воды в обечайке бака-аккумулятора ССГВ, выполненной согласно патенту РФ на изобретение №2382291 «Водонагревательная установка» (см. рис. 3.2), без учета тепловых потерь, описывается дифференциальным уравнением вида

$$\frac{dT_{06}^{ГВ}}{dt} = \frac{3,6 \cdot [F_R' \cdot A_{СК} \cdot [R^{\beta}(t) \cdot (\overline{\alpha\tau}) \cdot k_3 - U_L \cdot (T_{06}^{ГВ} - T_0)]]}{c_B \cdot M_{06}}, \quad (3.19)$$

где  $F_R'$  – коэффициент отвода тепла от теплообменника к воде в обечайке бака-аккумулятора ССГВ;

$A_{СК}$  – площадь солнечного коллектора, м<sup>2</sup>;

$R^{\beta}(t)$  – суммарная солнечная радиация в плоскости солнечного коллектора, Вт/м<sup>2</sup>;

$(\overline{\alpha\tau})$  – оптический КПД СК, о.е.;

$k_3$  – коэффициент, учитывающий затенение (запыление, загрязнение) СК, о.е.;

$U_L$  – приведенный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);

$T_{об}^{ГВ}$  – температура горячей воды в обечайке, °C;

$T_0$  – начальная температура воды в баке, °C;

$c_B$  – удельная теплоемкость воды ( $c_B = 4,19 \frac{кДж}{кг \cdot ^\circ C}$ );

$M_{об}$  – масса воды в обечайке бака-аккумулятора, кг;

$t$  – время, ч.

### 3.4.3 Моделирование теплопроизводительности ССГВ

Теплопроизводительность  $Q_{СК}$  и коэффициент полезного действия  $\eta_{СК}$  являются основными показателями, через которые выражаются основные технические характеристики СК и ССГВ в целом. Теплопроизводительность СК зависит от его конструктивных особенностей, уровня СР и температуры окружающей среды.

Уравнение Хоттеля-Уиллера-Блиса, как показали исследования С.К. Шерязова [116], наиболее полно учитывает приведенные факторы при определении теплопроизводительности СК

$$Q_{СК} = A_{СК} F_R \left[ R^\beta (\overline{\tau\alpha}) - U_L (T_{ср} - T_0) \right], \quad (3.20)$$

где  $A_{СК}$  – площадь солнечного коллектора, м<sup>2</sup>;

$F_R$  – коэффициент эффективности переноса тепла от поглощающей пластины коллектора к теплоносителю;

$R^\beta$  – суммарная солнечная радиация в плоскости солнечного коллектора, Вт/м<sup>2</sup>;

$(\overline{\tau\alpha})$  – приведенная поглощательная способность СК;

$U_L$  – коэффициент тепловых потерь, Вт/м<sup>2</sup>·°C;

$T_{ср}$ ,  $T_0$  – соответственно средняя температура теплоносителя в СК и температура окружающей среды.

В таблице 3.10 приведены характеристики для нескольких типов СК. Рассматриваемые параметры являются показателями конструкции и зависят от совершенства устройства СК.

Приведенная поглотительная способность  $(\overline{\tau\alpha})$  характеризует оптический КПД солнечного коллектора. Результаты исследования [116] показывают, что для конкретного устройства их значение можно принимать как постоянную величину.

В [37, 65] приведены результаты сравнительного анализа конструкций современных солнечных коллекторов зарубежных и отечественных производителей. Анализ показал, что «типичные» СК имеют следующие значения оптического КПД  $(\overline{\tau\alpha})$  и приведенного коэффициента тепловых потерь  $U_L$ : для плоских СК 0,7 и 3,41–3,84 и для вакуумированных трубчатых 0,76 и 1,4 соответственно.

**Таблица 3.10 – Оптические и теплотехнические характеристики солнечного коллектора [116]**

Солнечный коллектор	$U_L$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°С	$(\overline{\tau\alpha})$
Неселективный без остекления	15,0	0,95
Неселективный с одинарным остеклением	7,0	0,85
Неселективный с двойным остеклением	5,0	0,75
Селективный с одинарным остеклением	3,5	0,80
Вакуумированный стеклянный трубчатый коллектор	2,0	0,75

Для исследования условий использования ССГВ требуется моделировать режим ее работы с учетом климатических и эксплуатационных характеристик. При этом необходимо установить зависимости режима работы энергоустановки от энергетической характеристики СР.

Выполнение точного расчета теплопроизводительности ССГВ представляет определенные сложности в связи с наличием случайных колебаний климатических параметров и сложного характера взаимодействия между элементами ССГВ. Поэтому существуют упрощенные методы, основанные на обобщении результатов моделирования режима работы ССГВ [116].

Методы расчета систем гелиотеплоснабжения можно разделить на две большие группы: методы, основанные на использовании мгновенных значений исходных данных, и методы на основе усредненных или долговременных характеристик [116].

Модели на основе осредненных характеристик за более длительный период позволяют определить оптимизационные параметры и установить эффективные режимы работы ССГВ [116].

В существующих методах не учитывается полезное время работы ССГВ в течение дня. Ясно, что ССГВ в состоянии преобразовать всю поступающую энергию, однако не вся энергия может быть использована полезно. При этом сложно определить, какая часть солнечной энергии используется полезно, а какая – теряется в окружающей среде. Для этого необходимо учитывать режим потребления энергии и время работы ССГВ в течение дня.

Модель, определяющая теплопроизводительность ССГВ на основе долговременной характеристики, должна учитывать временной фактор. На основе уравнения Хоттеля-Уиллера-Блиса С.К. Шерьязовым предложено теплопроизводительность ССГВ представлять в дифференциальной форме

$$dQ_{\text{ССГВ}} = F_R A_{\text{ск}} \left\{ \int_{\tau_1}^{\tau_2} [R_{\beta}(\overline{\tau\alpha}) - U_L (T_{\text{сп}} - T_0)] d\tau \right\}, \quad (3.21)$$

где  $\tau_1$ - $\tau_2$  – продолжительность работы установки в течение дня.

Для определения теплопроизводительности ССГВ следует воспользоваться суточным графиком поступления солнечной радиации на наклонную поверхность.

Моделирование в программе «ССГВ» суточного графика температуры горячей воды в баке-аккумуляторе ССГВ  $T_{\text{гв}}$ , °С, с вакуумированным СК при изменении объема воды показало (рис. 3.12), что предложенная конструкция ССГВ с регулируемым уровнем даже при объеме воды в баке 20 % обеспечит без доводчика требуемую СНиП температуру горячей воды, равную 60°С.

Использование теплопроводящего стержня в вакуумированной трубке с эффектом «тепловой трубы» в конструкции ССГВ с вакуумированным СК позволяет практически безынерционно преобразовывать СР в тепловую энергию нагретой в баке-аккумуляторе воды, что повышает эффективность использования СР в утренние часы, когда потребность в горячей воде минимальна.

При исследовании важно было установить зависимость регулируемого объема воды от времени суток при заданной температуре теплоносителя. На рисунке 3.13 приведена зависимость массы горячей воды с температурой 60°С от времени суток. Кривая получена при температуре холодной воды, равной 15°С, для середины марта (ясный день). Результаты исследования показывают, что в часы наиболее активного

поступления СР (с 8 до 16 ч) объем нагреваемой воды растет также интенсивно, и за 8 часов масса нагретой воды увеличивается в 10 раз.

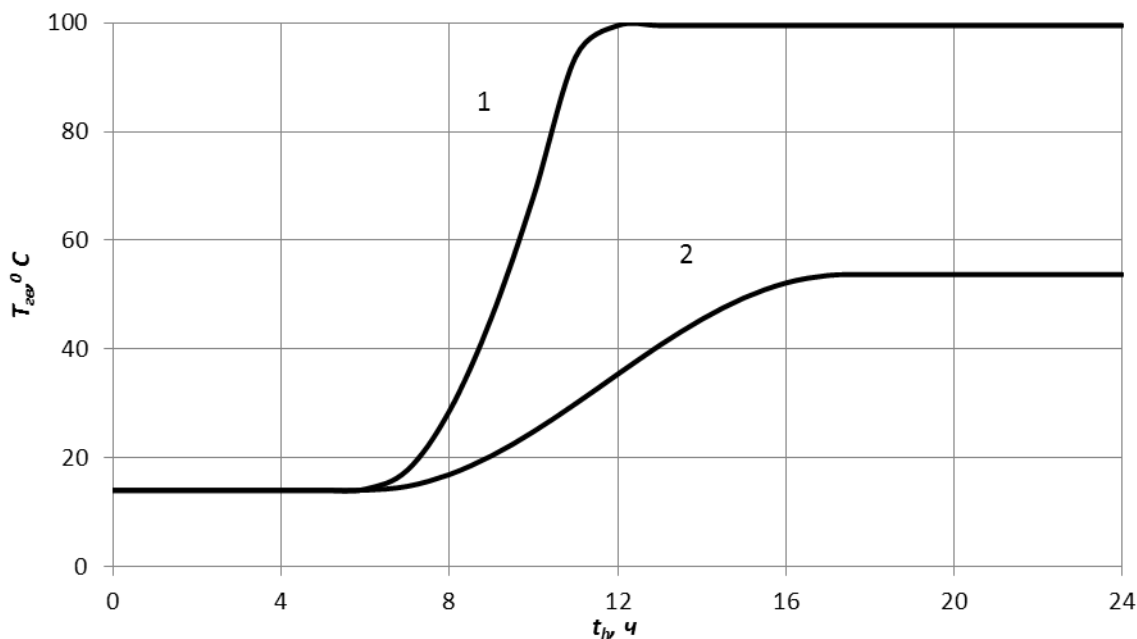


Рисунок 3.12 – Теоретические кривые температуры нагрева воды в середине марта (ясный день) при полном баке-аккумуляторе ССГВ (угол наклона СК к югу  $\beta = 45$ ): 1 – 25 л (20 % от объема бака); 2 – 127 л (полный бак)

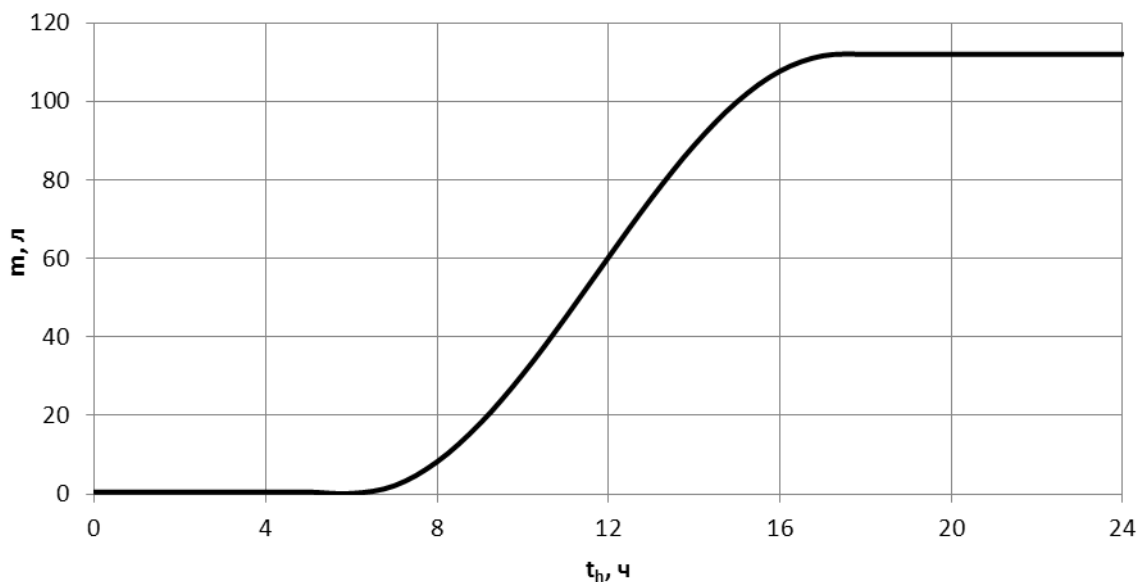


Рисунок 3.13 – Теоретическая кривая изменения массы горячей воды с температурой  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температура холодной воды –  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в середине марта (ясный день)

### 3.4.4 Моделирование режимов работы ССГВ

Для выбора ССГВ с конкретными техническими характеристиками для конкретного места ее установки при известном характере потребления горячей воды необходимо провести моделирование ее режимов работы. При моделировании варьируются типы ССГВ, численность жителей, нормы расхода горячей воды на человека в сутки в зависимости от типа системы ГВС в доме. Дальнейшие экономические расчеты выполняют для различных значений тарифов на энергоносители (существующие и прогнозируемые).

В качестве примера рассмотрим выбор ССГВ, предлагаемых для горячего водоснабжения индивидуальных жилых ООО «СВС-Красноярск» [90].

Для горячего водоснабжения семьи из четырех человек, проживающей в сельском жилом доме в пригороде Красноярска (Емельяновский район, Березовский район, Сухобузимский район), имеющем ЛПХ третьего типа (5 дойных коров, 5 телят, 8 свиней на откорме и 50 птиц) могут быть использованы солнечные водонагреватели китайского производства: НМ-16х18/58, НМ-16х21/58, НМ-20х21/58, НМ-20х21/58, НМ-36х21/58, которые отличаются между собой количеством вакуумированных трубок (эффективной площадью СК), объемом бака-аккумулятора и мощностью ТЭН. Таким образом, площадь СК может варьироваться от 2 до 4,8 м<sup>2</sup> при изменении бака-аккумулятора со 127 до 340 л (табл. 3.11).

Наиболее объективным энергетическим критерием эффективного использования СР в ССГВ в течение года является коэффициент замещения  $K_{зам}$ , который определяется выражением [37, 63]

$$K_{зам} = \frac{W_{ССГВ}}{W_{ГВС}} = \frac{W_{ССГВ}}{W_{ССГВ} + W_{ЭЭ}}, \quad (3.22)$$

где  $W_{ССГВ}$  – количество тепловой энергии, выработанной за месяц ССГВ, МДж (кВт·ч);

$W_{ГВС}$  – суммарная тепловая энергия, потраченная на приготовление горячей воды в течение месяца ССГВ, полученная за счет СР и источника электрической энергии, МДж (кВт·ч);

$W_{ЭЭ}$  – недостающее количество тепловой энергии, потребленное из электрической сети для нагрева воды ТЭНом, МДж (кВт·ч).



**Таблица 3.11 – Исходные данные по ССГВ для проведения моделирования**

Показатель	Тип установки			
	НМ-16x18/58	НМ-16x21/58	НМ-20x21/58	НМ-36x21/58
Эффективная площадь, м <sup>2</sup>	2	2,5	3,1	4,8
Объем бака, л	127	160	200	340
Мощность ТЭНа, кВт	1,5	1,5	1,5	3
Характеристика потребителя: - количество жителей, чел. - норма расхода, л/(сут.чел.) ЛПХ, л/сут	4 140 138	4 140 138	4 140 138	4 140 138
Месячная потребность в энергии для нагрева горячей воды, кВт·ч	495,7	495,7	495,7	495,7

Результаты моделирования количества тепловой энергии, вырабатываемой в течение года разными по производительности ССГВ сельских бытовых потребителей, и количества дополнительной электроэнергии, необходимой для энергообеспечения от внешнего источника электроснабжения, представлены в таблицах 3.12–3.15.

**Таблица 3.12 – Выработка тепловой энергии ССГВ на базе НМ-16x18/58**

Месяц	Суммарная солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup>	Выработка тепловой энергии ССГВ по месяцам, МДж/кВт·ч	Необходимое количество дополнительной энергии, кВт·ч
1	2	3	4
Январь	75	112,50/31,24	464,46
Февраль	163	244,50/67,90	427,80
Март	360	540,00/149,96	345,74
Апрель	469	703,50/195,36	300,34
Май	562	843,00/234,10	261,60
Июнь	654	981,00/272,42	223,28
Июль	628	942,00/261,59	234,11
Август	494	741,00/205,78	289,92
Сентябрь	302	453,00/125,80	369,90

1	2	3	4
Октябрь	180	270,00/74,98	420,72
Ноябрь	84	126,00/34,99	460,71
Декабрь	50	75,00/20,83	474,87
Всего за год	4021	6031,5/1674,95	4273,45

Таблица 3.13 – **Выработка тепловой энергии ССГВ на базе НМ-16х21/58**

Месяц	Суммарная солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup>	Выработка тепловой энергии ССГВ по месяцам, МДж/кВт.ч	Необходимое количество дополнительной энергии, кВт.ч
Январь	75	140,63/39,05	456,65
Февраль	163	305,63/84,87	410,83
Март	360	675,00/187,45	308,25
Апрель	469	879,38/244,20	251,50
Май	562	1053,75/292,63	203,07
Июнь	654	1226,25/340,53	155,17
Июль	628	1177,50/326,99	168,71
Август	494	926,25/257,22	238,48
Сентябрь	302	566,25/157,25	338,45
Октябрь	180	337,50/93,72	401,98
Ноябрь	84	157,50/43,74	451,96
Декабрь	50	93,75/26,03	469,67
Всего за год	4021	7539,38/2093,68	3854,72

Таблица 3.14 – **Выработка тепловой энергии ССГВ на базе НМ-20х21/58**

Месяц	Суммарная солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup>	Выработка тепловой энергии ССГВ по месяцам, Дж/кВт.ч	Необходимое количество дополнительной энергии, кВт.ч
1	2	3	4
Январь	75	174,38/48,42	447,28
Февраль	163	378,98/105,24	390,46
Март	360	837,00/232,43	263,27

1	2	3	4
Апрель	469	1090,43/302,81	192,89
Май	562	1306,65/362,86	132,84
Июнь	654	1520,55/422,26	73,44
Июль	628	1460,10/405,47	90,23
Август	494	1148,55/318,95	176,75
Сентябрь	302	702,15/194,99	300,71
Октябрь	180	418,50/166,22	379,48
Ноябрь	84	195,30/54,23	441,47
Декабрь	50	116,25/32,28	463,42
Всего за год	4021	9348,83/2596,17	3352,23

Таблица 3.15 – Выработка тепловой энергии ССГВ на базе НМ-36х21/58

Месяц	Суммарная солнечная радиация, МДж/м <sup>2</sup>	Выработка тепловой энергии ССГВ по месяцам, Дж/кВт·ч	Необходимое количество дополнительной энергии, кВт·ч
Январь	75	270,00/74,98	420,72
Февраль	163	586,80/162,95	332,75
Март	360	1296,00/359,90	135,80
Апрель	469	1688,40/468,87	26,83
Май	562	2023,20/561,84	-
Июнь	654	2354,40/653,82	-
Июль	628	2260,80/627,82	-
Август	494	1778,40/493,86	1,84
Сентябрь	302	1087,20/301,92	193,78
Октябрь	180	648,00/179,95	315,75
Ноябрь	84	302,40/83,98	411,72
Декабрь	50	180,00/49,99	445,71
Всего за год	4021	14475,60/4019,87	1928,53

Как показало моделирование, коэффициент замещения  $K_{\text{зам}}$  (рис. 3.14) изменяется не только в течение года, но и в зависимости от типа (производительности) ССГВ. В нашем случае для ГВС сельских бытовых потребителей (сельского жилого дома с ЛПХ) рациональным следует считать использование ССГВ на базе НМ-20х21/58 (рис. 3.14, кривая 3), так как в июне  $K_{\text{зам}} < 1$ .

Использование следующего типоразмера ССГВ на базе НМ-36x21/58 приведет к производству излишков горячей воды ( $K_{зам} > 1$ ) (рис. 3.14, кривая 4) в мае, июне, июле. В данном случае либо необходимо найти сезонное применение горячей воде (подогрев воды в бассейне, летний душ и т.д.), либо, как показывает опыт ООО «СВС-Красноярск», придется сливать кипящую горячую воду в канализацию.

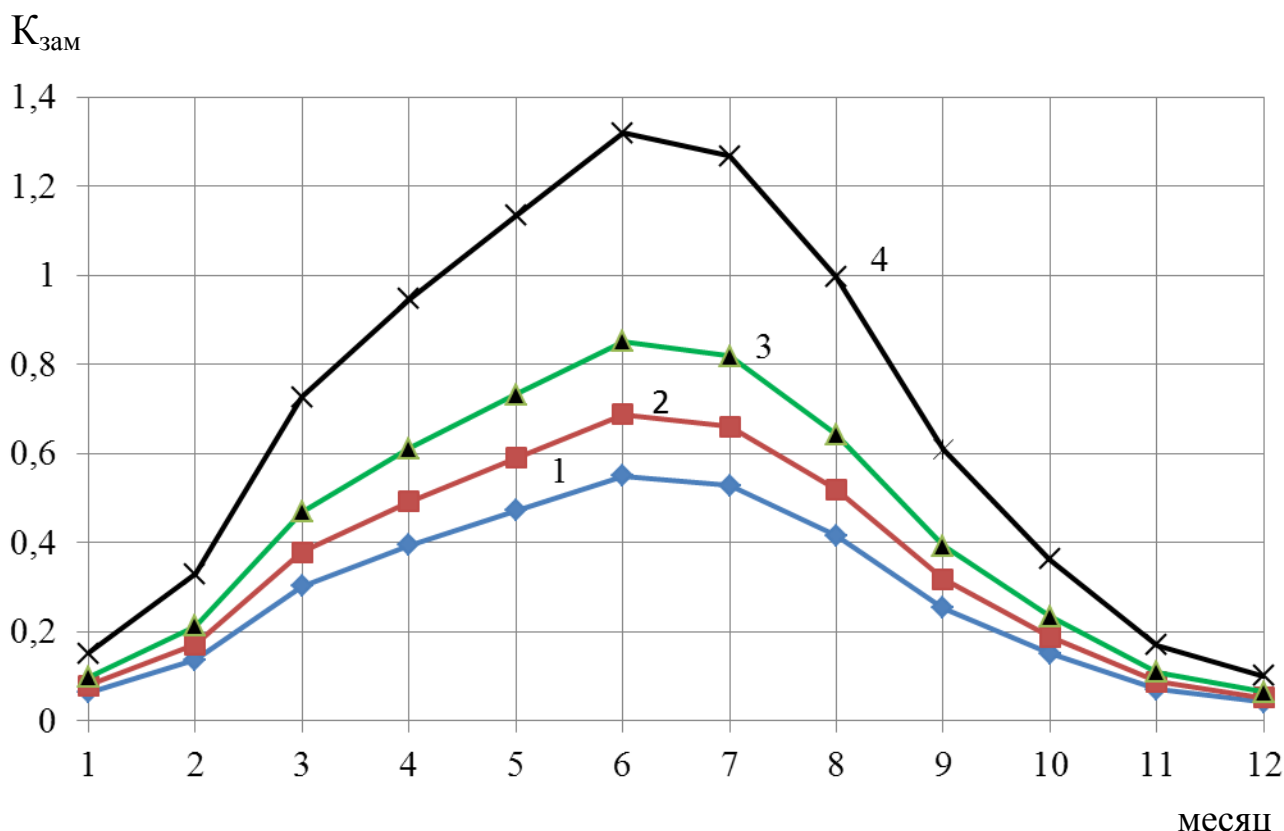


Рисунок 3.14 – Изменение коэффициента замещения  $K_{зам}$  в течение года в зависимости от типа ССГВ: 1 – НМ-16x18/58; 2 – НМ-16x21/58; 3 – НМ-20x21/58; 4 – НМ-36x21/58

Электропотребление СГВ сельских бытовых потребителей складывается из специфического уровня электрификации быта, наличия ЛПХ или фермерского хозяйства. Для ГВС требуется вода с уровнем от 12 до 100°С.

Предложенные конструкции ССГВ позволяют повысить эффективность использования солнечного излучения: в первой оригинальной конструкции, защищенной патентом РФ на изобретение РФ № 2319910 «Двухконтурная система солнечного горячего водоснабжения», – за счет оригинальной, состоящей в виде сегментов сферы,

сферической конструкции гелиоколлектора; во второй оригинальной конструкции – за счет использования обечайки вокруг теплообменника для концентрации горячей воды в баке-аккумуляторе ССГВ, в третьей – за счет того, что бак-аккумулятор ССГВ (с вакуумированными тепловыми трубками, образующими трубчатый солнечный коллектор) снабжен устройством для сбора горячей воды, выполненным в виде плавающей платформы, при этом нижняя поверхность платформы выполнена конусообразно, с отверстием посередине, в которое установлено водозаборное устройство, что позволяет повысить эффективность нагрева воды.

Разработанные конструкции водонагревателей сочетают в себе функции проточного и аккумуляционного водонагревателя и позволяют использовать в качестве источника солнечную радиацию, ветровую энергию и электрическую энергию (доводчик-дублер), при этом почти мгновенно, при небольшом или среднем расходе воды, потребителю поступает горячая вода, независимо от интенсивности и продолжительности солнечного сияния или скорости ветра.

Поток солнечной радиации за сутки  $\mathcal{E}_h$ , кВт·ч/(м<sup>2</sup>·сут), или МДж/(м<sup>2</sup>·сут), в течение года в городе Красноярске изменяется от 0,73 (2,63) в декабре до 9,36 (33,69) в июне.

Как показало моделирование ССГВ сельских бытовых потребителей (сельский жилой дом с 4 жильцами и ЛПХ 3-го типа), коэффициент замещения  $K_{\text{зам}}$  изменяется не только в течение года, но и в зависимости от производительности ССГВ. Рациональным следует считать использование ССГВ на базе НМ-20х21/58. Использование следующего типоразмера ССГВ на базе НМ-36х21/58 приведет к производству излишков горячей воды ( $K_{\text{зам}} > 1$ ).

Разработанные математические модели позволили установить зависимость регулируемого объема воды в баке-аккумуляторе ССГВ от времени суток при заданной температуре теплоносителя. Результаты исследования показывают, что в часы наиболее активного поступления СР (с 8 до 16 ч) объем нагреваемой воды растет также интенсивно, и за 8 часов масса нагретой воды увеличивается в 10 раз.

## 4 РАБОТА СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ

### 4.1 Экспериментальные исследования ССГВ на базе гелиоколлектора «СОКОЛ»

С целью проверки результатов теоретических исследований по расчету интенсивности потока солнечной радиации, падающей на СК, и равновесной температуры теплоносителя в солнечном коллекторе, а также исследований по выработке тепловой энергии ССГВ на базе типового СК в течение заданного времени была проведена серия экспериментов. Для подтверждения или опровержения результатов расчетов, проведенных на ПЭВМ и представленных в главе 3, была исследована ССГВ с солнечным коллектором «СОКОЛ».

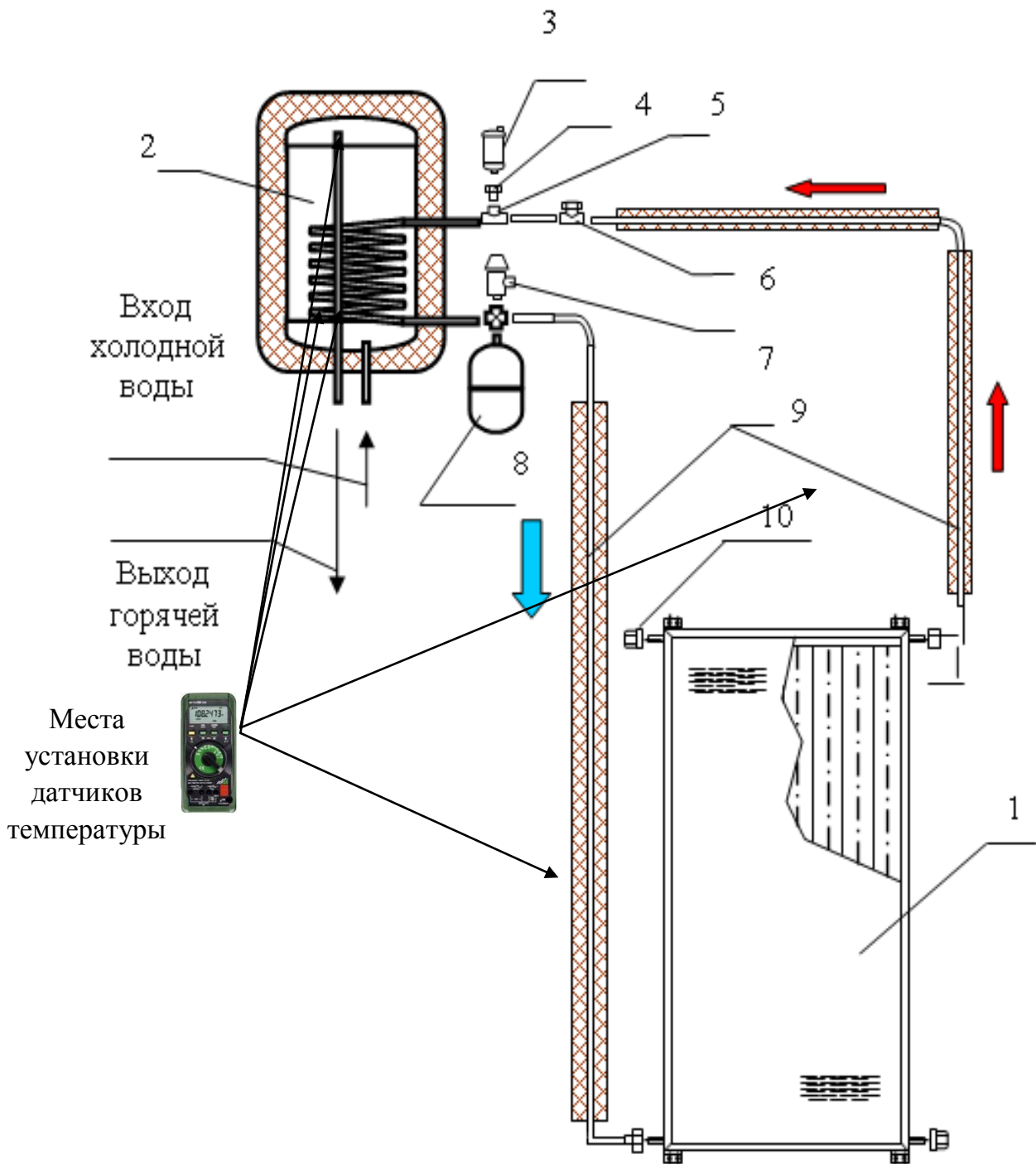
В качестве оборудования для измерения температуры был выбран 61/2 разрядный прецизионный TRMS-мультиметр с возможностью измерения температуры и регистратором данных METRA Hit 30M со следующими характеристиками при измерении температуры:

- точность: 0,006 % (термопара);
- разрешение: термопара ... 0,1°C.

В качестве датчиков температуры использовались точечные щупы 80PK-80PK-1, датчик температуры типа К общего назначения с диапазоном измерений от минус 40 до 260°C (рис. 4.1).

В июле-августе 2007 года нами был проведен ряд испытаний гелиоколлектора «СОКОЛ» в составе ССГВ в пригороде г. Красноярска (рис. 4.2). Цель эксперимента заключалась в определении возможности и целесообразности практического использования ССГВ для удовлетворения потребностей в горячей воде загородного дома в климатических условиях г. Красноярска. Установка была смонтирована на плоской поверхности с углом наклона 43° по отношению к горизонту и ориентирована в южном направлении. В качестве теплоносителя использовалась вода. В составе установки использовался бак-аккумулятор емкостью 80 литров для сохранения тепловой энергии, полученной от гелиоколлектора, и передачи ее теплоносителю.

Замеры проводились с 8-00 до 20-00 ч, с периодичностью измерений 1 час, в течение 13 дней при различных метеоусловиях (отсутствие облачности, переменная облачность, дождь). Результаты замеров сведены в таблице 4.1.



*Рисунок 4.1 – Принципиальная схема ССГВ с естественной циркуляцией с местами установки датчиков температуры:*

*1 – солнечный коллектор «Сокол»; 2 – бак-аккумулятор Thermax-80 с теплообменником; 3 – воздухоотводчик автоматический; 4 – отсекающий клапан для воздухоотводчика; 5 – тройник; 6 – обратный клапан; 7 – клапан предохранительный (6 бар); 8 – бак расширительный мембранный; 9 – трубопроводы соединительные с теплоизоляцией; 10 – заглушка*



*Рисунок 4.2 – Система солнечного горячего водоснабжения на базе гелиоколлектора «Сокол» в садоводстве «Нива» Красноярского государственного аграрного университета*

Контрольные точки установки датчиков температуры были выбраны исходя из предполагаемой минимальной и максимальной температуры теплоносителя в гелиоколлекторе: соответственно крайние верхняя и нижняя точки гелиоколлектора – на входе в бак-аккумулятор и его выходе, а также в средней точке внутри бака-аккумулятора.

Так, в период с 15-30 до 16-50 ч в безоблачный период при температуре окружающего воздуха  $29^{\circ}\text{C}$  и начальной температуре воды в гелиоколлекторе  $17^{\circ}\text{C}$  получены результаты, представленные на рисунке 4.3. Как видно из графика, в течение сорока минут теплоноситель в гелиоколлекторе прогревается с 17 до  $58^{\circ}\text{C}$ . В течение дня температура воды в баке-аккумуляторе возрастает и ко времени захода солнца достигает отметки в  $65\text{--}70^{\circ}\text{C}$  (рис. 4.4).



Таблица 4.1 – Результаты экспериментальных исследований

Показатель	День эксперимента (по порядку)												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Начальная температура теплоносителя ССГВ, °С	15	17	15	15	14	16	17	17	14	14	16	16	15
Конечная температура теплоносителя ССГВ, °С	58	55	71	57	62	68	64	30	46	40	52	30	26
Время нагрева, ч	6	8	7	7	6	6	8	4	6	6	7	4	4
Выработка энергии, МДж	7,206	6,368	9,218	7,039	8,044	8,715	7,877	2,178	5,363	4,357	6,033	2,346	1,676

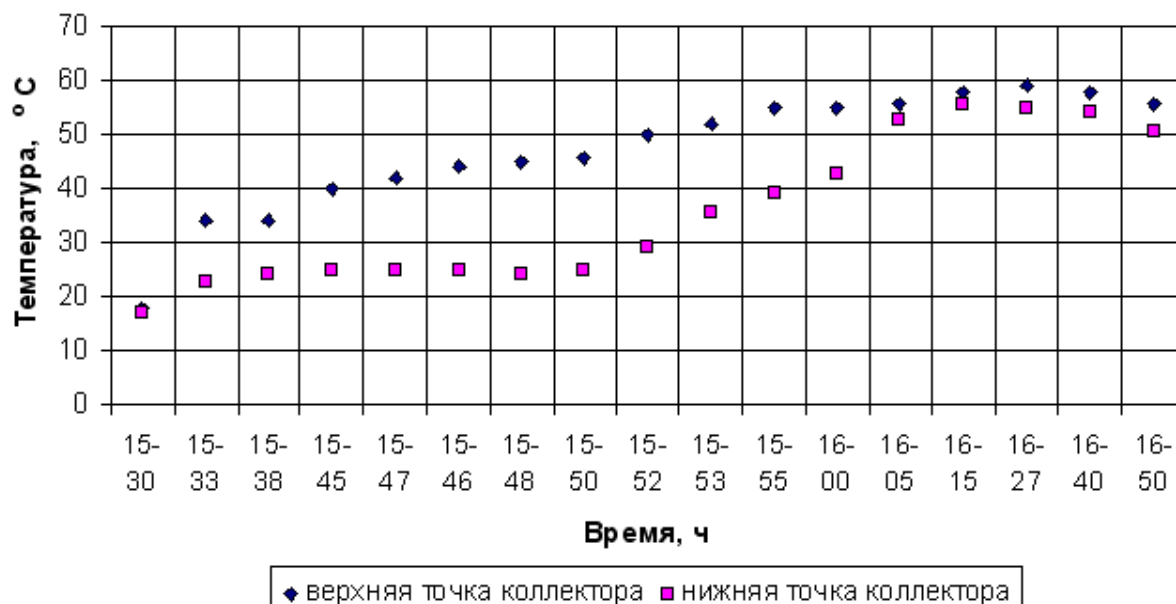


Рисунок 4.3 – Кривая разгона гелиоколлектора «СОКОЛ»

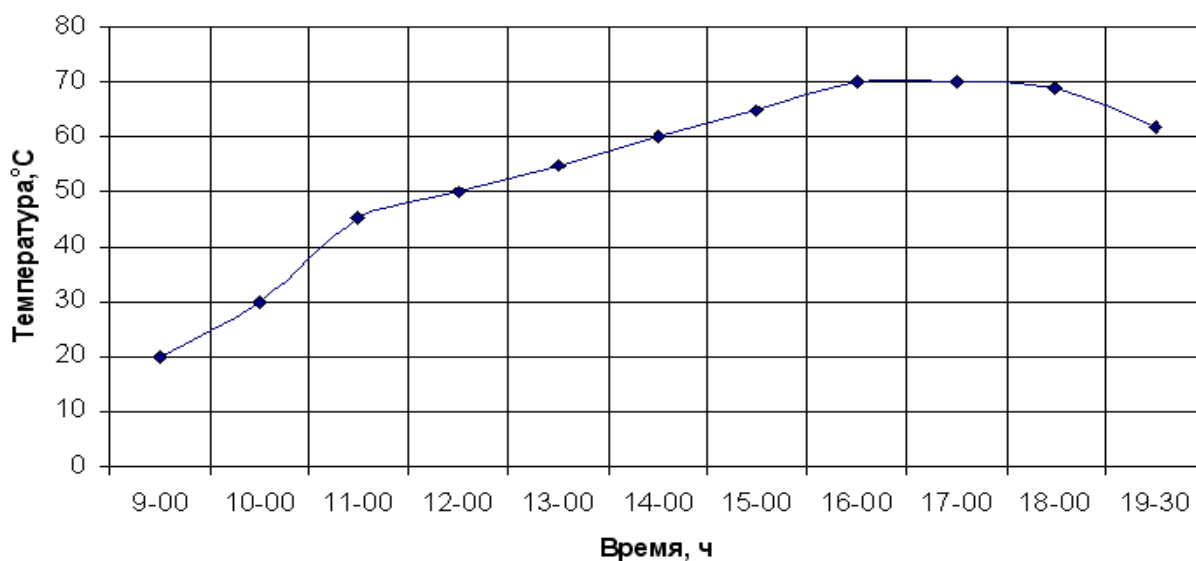


Рисунок 4.4 – Динамика нагрева теплоносителя в баке-аккумуляторе

Полученные расчетным путем (используя технические характеристики гелиоколлектора «СОКОЛ», глава 3) экспериментально равновесные температуры теплоносителя в гелиоколлекторе составили соответственно 61,8 и 56°С. Расчетная температура оказалась выше полученной экспериментально в первую очередь за счет того, что трудно точно рассчитать коэффициент тепловых потерь коллектора и коэффициент эффективности поглощающей панели при даже незначительном изменении скорости ветра во время эксперимента. В результате расчета поступления солнечной радиации для заданных координат местности в районе станции «Снежница» Красноярской железной дороги методом подстановки их в разработанную квазипериодическую модель суммарной солнечной радиации в июле 2007 г. (рис. 4.5) установлено, что на горизонтальную поверхность поступило 614 МДж/м<sup>2</sup> суммарной солнечной радиации.

Зная количество солнечной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность, по методике, описанной в главе 3, становится возможным определить количество и температуру воды, нагретой в ССГВ.

В задачу следующего эксперимента входило исследование влияния конструкции ССГВ, согласно патенту РФ на изобретение № 2382291 [59] (см. рис. 3.2), на температуру в верхней зоне бака-аккумулятора ССГВ, откуда ведется разбор горячей воды потребите-

лями. Эксперимент проводился по методике, аналогичной той, что предложена в [46] д-ром техн.наук Л.В. Куликовой и канд.техн.наук Ю.А. Меновщиковым, суть которой заключается в том, что бак-аккумулятор разбит на три зоны: нижнюю, среднюю и верхнюю. При дальнейших расчетах, например, производимой ССГВ тепловой энергии принимается средняя температура на известный объем (слой) воды.

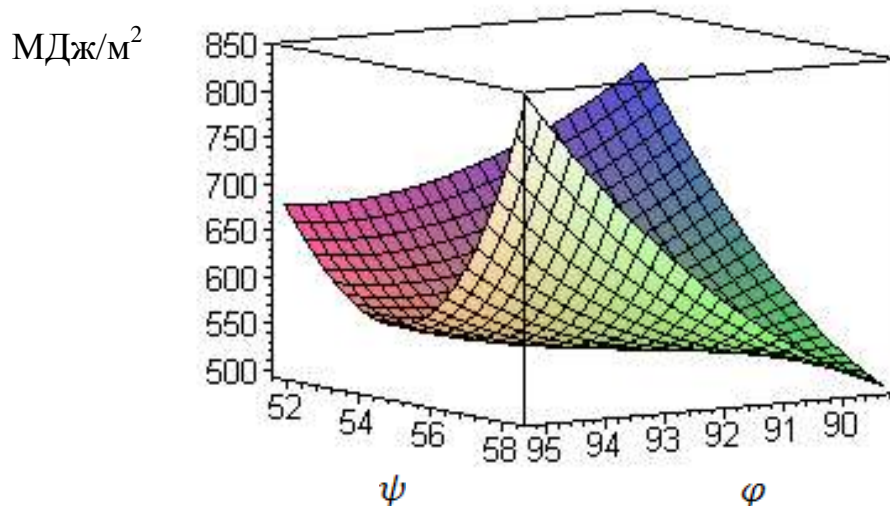


Рисунок 4.5 – Поступление суммарной солнечной радиации в июле 2007 г.

Датчики температуры были установлены соответственно (рис. 4.6):

- вверху бака-аккумулятора, где установлен патрубок для забора горячей воды (первая зона);
- в средней зоне бака на уровне теплообменника (вторая зона);
- в нижней зоне бака-аккумулятора, где установлен патрубок для подвода холодной воды (третья зона);
- в обечайке, в которой установлен теплообменник (четвертая зона).

Результаты экспериментальных исследований традиционной ССГВ на базе гелиоколлектора «Сокол» и ССГВ, согласно патенту РФ на изобретение № 2382291, приведены в таблицах 4.2, 4.3.

Таким образом, в результате эксперимента установлено, что градиент температуры воды в баке-аккумуляторе за счет использования оригинальной конструкции ССГВ возрастает, что способствует накоплению воды с более высокой температурой в верхнем слое (от 3,0 до 5,6°С).

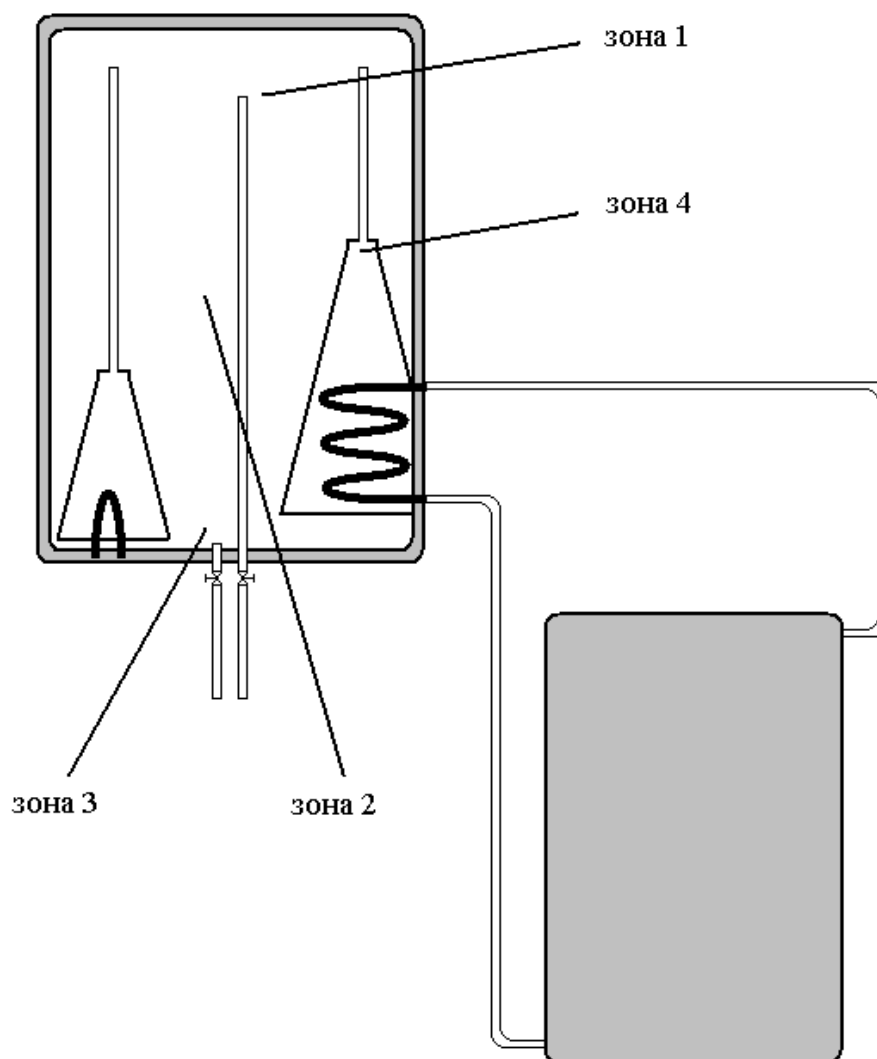


Рисунок 4.6 – Места установки датчиков температуры

Более высокий градиент температуры может быть достигнут при использовании биметаллической пластины на верхнем отверстии обечайки.

Таблица 4.2 – Результаты экспериментальных исследований традиционной ССГВ

Время суток, ч	Температура воды в баке-аккумуляторе по зонам, °С		
	1	2	3
1	2	3	4
9-00	19,8	19,8	19,8
10-00	29,9	28,1	23,9
11-00	42,0	36,4	31,7

1	2	3	4
12-00	51,1	40,8	35
13-00	57,8	48,1	39,3
14-00	65,2	52,8	42,7
15-00	70,2	58,1	47,9
16-00	68,5	60,4	50
17-00	65,4	57,8	50,2
18-00	62,8	56,0	49,2
19-00	59,9	54,8	47,6
20-00	58,1	52,2	46,2
21-00	56,1	49,6	44,2

**Таблица 4.3 – Результаты экспериментальных исследований ССГВ согласно патенту РФ на изобретение № 2382291**

Время суток, ч	Температура воды в баке-аккумуляторе по зонам, °С			
	1	2	3	4
9-00	19,6	19,6	19,6	19,6
10-00	32,9	29,5	22,7	37,0
11-00	46,2	38,2	30,1	52,3
12-00	56,2	42,8	33,3	63,9
13-00	63,6	50,5	37,3	75,8
14-00	71,7	55,4	40,6	82,3
15-00	75,8	61,0	45,5	74,0
16-00	73,3	63,4	47,5	68,2
17-00	70,0	60,7	47,7	62,8
18-00	67,2	58,8	46,7	59,9
19-00	64,1	57,5	45,2	57,8
20-00	62,2	54,8	43,9	53,9
21-00	60,0	52,1	42,0	51,8

#### **4.2 Экспериментальные исследования ССГВ на базе трубчатого вакуумированного солнечного коллектора**

В феврале 2010 года ООО «СВС-Красноярск» приобрело и смонтировало на крыше здания по адресу пр. Свободный, 75 ССГВ НМ-16х18/58 производства КНР с солнечным коллектором в виде 16 вакуумированных трубок (рис. 4.7). Водонагреватель имеет уни-

версальную подставку для установки на плоской поверхности или скате крыши с возможностью регулировки угла наклона. Для подогрева воды при недостаточном уровне солнечной радиации он оснащается трубчатым электронагревателем (ТЭНом) мощностью 1,5 киловатта. Компактная модель оснащена 16 трубками 1800x58 мм и имеет объем бака 127 литров. Также в комплект поставки водонагревателя входят: система автоматического управления KTZ011, смеситель с душевой головкой и клапанная арматура. Технические характеристики солнечного водонагревателя приведены в таблице 4.4.



*Рисунок 4.7 – Солнечный водонагреватель НМ-16x18/58*

В марте 2011 года нами произведены натурные производственные испытания этой системы солнечного горячего водоснабжения. Испытания проводились 4 (рис. 4.8), 14 (рис. 4.9) и 15 марта (рис. 4.10) 2011 г.

Количество тепловой энергии, полученной при нагреве воды СК в ССГВ  $W_{ССГВ}$ , кДж, определяют по формуле

$$W_{ССГВ} = m \cdot c_m \cdot (T_k - T_n), \quad (4.1)$$

где  $m$  – масса воды, кг;

$c_m$  – удельная теплоемкость воды (равна 4,19 Дж/(кг·К));

$T_n, T_k$  – начальная и конечная температура воды в баке ССГВ, °С.

Таблица 4.4 – Технические характеристики ССГВ НМ-16x18/58

Параметр	Величина
Диаметр вакуумированных трубок, мм	58
Длина вакуумированных трубок, мм	1800
Число вакуумированных трубок, шт.	16
Эффективная площадь, м <sup>2</sup>	2
Объем бака, л	127
Мощность электронагревательного элемента, кВт	1,5
Вес в сборе, кг	56
Материал подставки	Оцинкованная сталь
Материал бака	Нержавеющая сталь SUS304

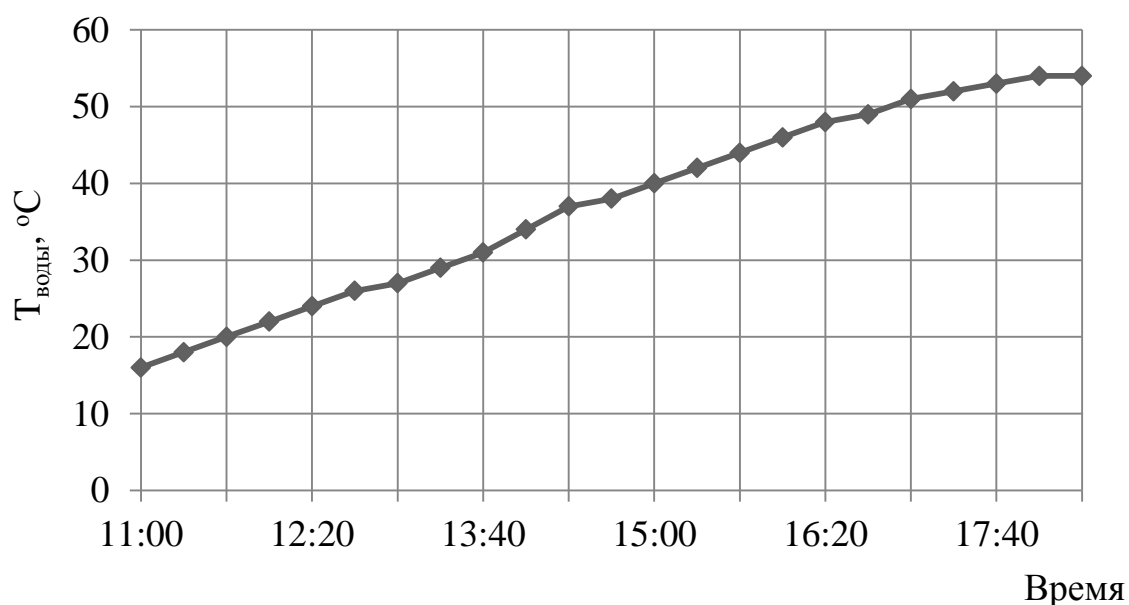
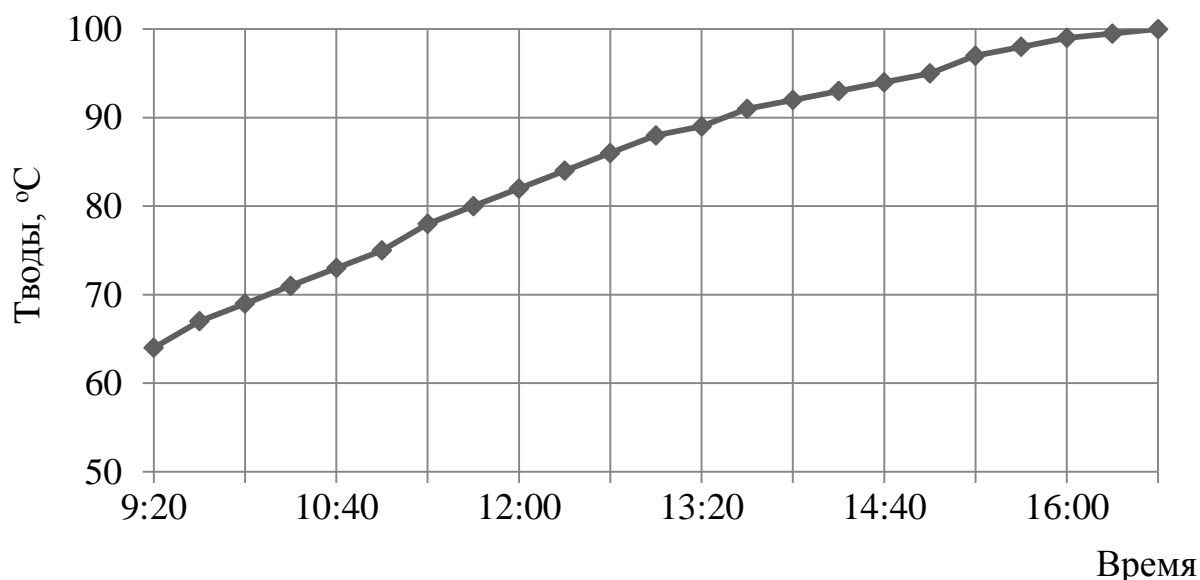
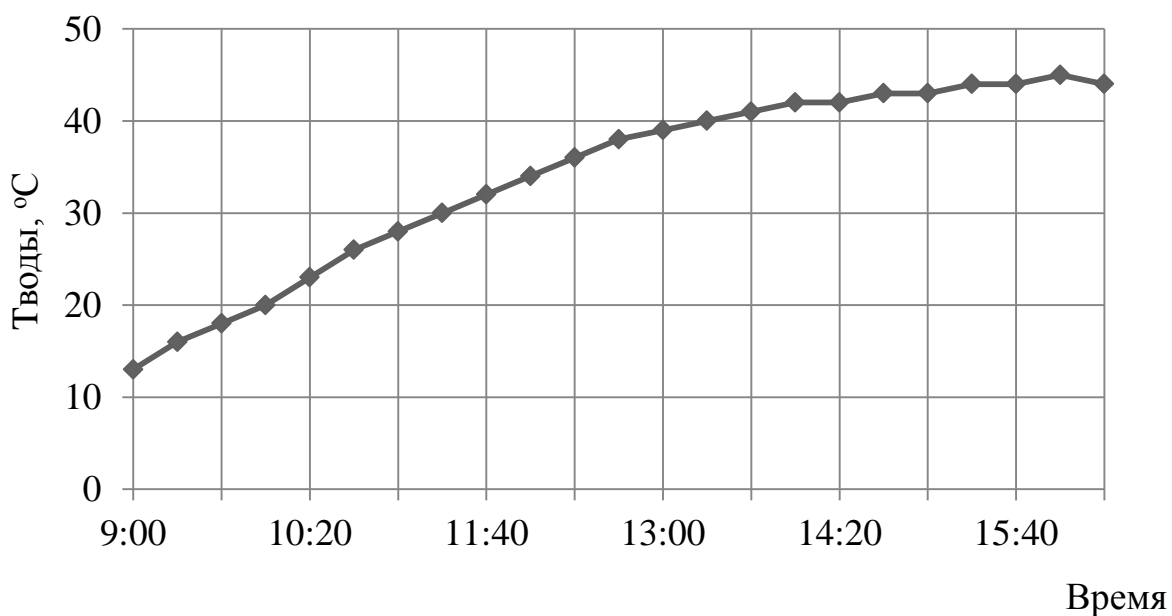


Рисунок 4.8 – Кривая температуры нагрева воды в баке-аккумуляторе (100 %-я наполняемость бака водой, предварительно горячая вода слита) солнечного водонагревателя НМ-16x18/58 (04 марта 2011 г., наружная температура во время измерений изменялась от -9 до -5 °C, ясно)



*Рисунок 4.9 – Кривая температуры нагрева воды в баке-аккумуляторе (100 %-я наполняемость бака водой, подогревается предварительно нагретая накануне вода) солнечного водонагревателя НМ-16х18/58 (14 марта 2011 г., наружная температура во время измерений изменялась от -4 до +4 °С, ясно)*



*Рисунок 4.10 – Кривая температуры нагрева воды в баке-аккумуляторе (20 %-я наполняемость бака водой) солнечного водонагревателя НМ-16х18/58 (15 марта 2011 г., наружная температура во время измерений изменялась от -4 до +4 °С, весь день пасмурно)*



Расчетные значения потока солнечной радиации за сутки в марте месяце приняты согласно таблице 3.9.

Коэффициент полезного действия системы солнечного горячего водоснабжения в целом определяют по выражению

$$\eta_{\text{ССГВ факт}} = W_{\text{ССГВ}} / \Delta h. \quad (4.2)$$

Как показали результаты расчетов, фактический коэффициент полезного действия ССГВ составил: вариант 1 (рис. 4.8) – 0,67; вариант 2 (рис. 4.9) – 0,64; вариант 6 (рис. 4.10) – 0,11.

Таким образом, проведенные в июле-августе 2007 года испытания гелиоколлектора «СОКОЛ» в составе ССГВ, смонтированного под углом наклона  $43^\circ$  по отношению к горизонту и ориентированного в южном направлении в пригороде Красноярска с отклонением менее 5%, подтвердили расчетные значения равновесной температуры гелиоколлектора и выработки тепловой энергии.

В ходе экспериментальных исследований установлено, что температура воды в баке-аккумуляторе ССГВ на базе гелиоколлектора «Сокол» в течение дня в летний период возрастает на  $11\text{--}56^\circ\text{C}$  в зависимости от погодных условий.

В ходе эксперимента установлено, что градиент температуры воды в баке-аккумуляторе водонагревательной установки, выполненной согласно патенту РФ на изобретение №2382291, в котором водонагревательная установка снабжена обечайкой, выполненной в виде усеченного конуса с установленным в нем теплообменником, соединенным с гелиоколлектором, возрастает, что способствует накоплению воды с более высокой температурой в верхнем слое (на  $3,0\text{--}5,6^\circ\text{C}$  выше, чем при традиционной конструкции ССГВ).

В ходе эксперимента установлено, что коэффициент полезного действия ССГВ с трубчатым вакуумированным коллектором в ясные солнечные дни в марте в условиях города Красноярска составил  $0,64\text{--}0,67$ .

## 5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКИХ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

### 5.1 Общие вопросы экономической оценки использования ВИЭ

Для эффективного горячего водоснабжения сельского жилого дома необходимо обосновать оптимальную структуру системы горячего водоснабжения, обеспечивающую минимальную стоимость тепловой энергии у потребителя. Использование возобновляемого источника энергии характеризуется большей экономической эффективностью и конкурентоспособностью по сравнению с традиционной системой горячего водоснабжения. Поскольку возобновляемая энергия используется совместно с традиционным источником, эффективность системы солнечного горячего водоснабжения характеризуется стоимостью энергии, получаемой от совместного использования солнечной энергии и традиционного источника энергии (электрической энергии, угля, газа, дров и т.п.).

Для эффективного горячего водоснабжения потребителя необходимо минимизировать все возможные затраты. При этом, согласно целевой функции, стоимость тепловой энергии, вырабатываемой системой горячего водоснабжения, должна быть минимальной. Важно определить оптимальную долю потребной энергии, которую может замещать возобновляемый источник.

Доля потребной энергии, замещаемой возобновляемым источником, зависит от стоимости потребляемой энергии от возобновляемых ( $C_v$ ) и традиционных ( $C_m$ ) источников. В свою очередь, целесообразность использования возобновляемой энергии зависит от стоимости энергии, получаемой традиционным путем [9, 20, 24, 39, 47, 74, 76, 79, 116, 123, 126]

$$C_v \leq C_m. \quad (5.1)$$

Цены на энергоносители зависят от наличия энергоносителя в данной местности. Поэтому условия использования ВИЭ зависят как от местных климатических условий, так и от социально-экономических условий развития региона.

Экономический эффект в системе солнечного горячего водоснабжения с резервированием от традиционного источника энергоснабжения ожидается за счет снижения стоимости энергии [116]

$$\text{ЭК} = I_{\text{год.внеш.}} - I_{\text{год}}^{\text{ССГВ}}, \quad (5.2)$$

где ЭК – величина годового экономического эффекта, руб.;

$I_{\text{год.внеш.}}$  – затраты на энергоснабжение от внешнего источника, руб.;

$I_{\text{год}}^{\text{ССГВ}}$  – затраты при использовании системы солнечного горячего водоснабжения с резервированием от традиционного источника энергоснабжения, руб.

Для достижения ожидаемого экономического эффекта необходимо, чтобы дополнительные капиталовложения в ССГВ окупались в установленные сроки. Тогда в качестве экономической характеристики следует рассматривать и срок окупаемости дополнительных капиталовложений на использование ВИЭ

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{ССГВ}}}{\text{ЭК}}, \quad (5.3)$$

где  $K_{\text{ССГВ}}$  – капиталовложения в ССГВ, руб.

Экономический эффект подсистемы ВИЭ может быть определен как выручка от сэкономленного топлива или как экономия в оплате за теплоноситель за год работы ССГВ, за вычетом издержек на их эксплуатацию.

Экономический эффект зависит от вида ССГВ и площади солнечных коллекторов (СК).

## 5.2 Определение технико-экономических показателей ССГВ

Установки горячего водоснабжения сельских жилых домов с использованием солнечной энергии не претендуют на полное замещение энергозатрат на горячее водоснабжение, поэтому, как правило, применяются совместно с установками на традиционном топливе. Несмотря на множество методик оценки эффективного использования солнечной энергии, до сих пор отсутствует единый подход к определению эффективности таких систем.

Для системы комбинированного горячего водоснабжения необходимо определить стоимость энергии, вырабатываемой ССГВ. Она зависит от эксплуатационных затрат на установку горячего водоснабжения, которые складываются в основном из отчислений на реновацию, текущий ремонт и обслуживание

$$I_{ССГВ} = I_{ам.} + I_{тр.обсл.} + I_{зн.} + I_{сн.} + I_{пр.}, \quad (5.4)$$

где  $I_{ам.}$  – амортизационные отчисления на реновацию, руб.;

$I_{тр.обсл.}$  – затраты на текущий ремонт и обслуживание, руб.;

$I_{зн.}$  – составляющая затрат на заработную плату, руб.;

$I_{сн.}$  – составляющая затрат на энергию на собственные нужды, руб.;

$I_{пр.}$  – прочие затраты, необходимые на содержание обслуживающего персонала, охрану труда, технику безопасности и прочее, руб.

В действительности, затраты на использование солнечной энергии будут меньше. Во-первых, можно не учитывать затраты на заработную плату. Во-вторых, при использовании солнечной энергии снижается экологический ущерб, наносимый традиционными источниками. Учет экологического ущерба ведет к снижению затрат на энергоснабжение потребителей. Удельный экологический ущерб приведен в таблице 5.1.

**Таблица 5.1 – Удельный экологический ущерб от использования органического топлива [42]**

Теплогенерирующая установка	Ущерб окружающей среде, руб/кВт.ч
Котельная на угле	3,94
Котельная на мазуте	1,5
Котельная на дровах	1,07

Амортизационные отчисления на реновацию обычно выражают в процентах от суммарных капиталовложений и в общем случае определяют по формуле

$$I_{ам} = \alpha_{ам} \cdot K_{ССГВ}, \quad (5.5)$$

где  $\alpha_{ам}$  – норма амортизации, %.

Долю амортизационных отчислений на реновацию определяют исходя из срока службы энергоустановок. При отсутствии точных данных срок службы для ССГВ рекомендуется принимать 15–20 лет.

Затраты на текущий ремонт определяются

$$I_{тр.обсл.} = \alpha_{тр} \cdot K_{ССГВ}, \quad (5.6)$$

где  $\alpha_{тр}$  – доля отчислений на текущий ремонт. Эти затраты возможно рассчитывать как  $I_{тр} = (0,20...0,25)I_{ам}$ .

Капиталовложения  $K_{ССГВ}$  на использование солнечной энергии в общем случае складываются из затрат на приобретение оборудования и строительно-монтажные работы. Для ССГВ капиталовложения можно определить по формуле

$$K_{ССГВ} = K_{стр} + K_{сн} + K_{ск} + K_{б} + K_{тр} + K_{куп}, \quad (5.7)$$

где  $K_{стр}$  – стоимость строительно-монтажных работ, руб.;

$K_{сн}$  – стоимость сантехнических работ, руб.;

$K_{ск}$  – стоимость солнечных коллекторов, руб.;

$K_{б}$  – стоимость баков-аккумуляторов и теплообменников, руб.;

$K_{тр}$  – транспортные расходы, руб.;

$K_{куп}$  – стоимость контрольно-измерительных приборов, руб.

В таблице 5.2 представлена структура затрат на ССГВ, предназначенную для горячего водоснабжения жилых домов, которые говорят о значительных резервах снижения капитальных затрат на стадии проектирования ССГВ.

**Таблица 5.2–Структура затрат на систему солнечного горячего водоснабжения, % [42]**

Строительные работы	Сантехнические работы	Солнечные коллекторы	Баки-аккумуляторы, теплообменники	Контрольно-измерительная аппаратура
30–40	5–7	30–50	15–18	1–3

Для проведения сравнительных расчетов величину  $K_{ССГВ}$  удобнее всего выразить через удельную стоимость солнечных коллекторов

$$K_{ССГВ} = K_{уд} \cdot A_{ск} \cdot \gamma_{ГВ}, \quad (5.8)$$

где  $K_{уд}$  – удельная стоимость солнечного коллектора, руб/м<sup>2</sup>;  
 $A_{ск}$  – площадь солнечных коллекторов, м<sup>2</sup>;  
 $\gamma_{ГУ}$  – коэффициент, учитывающий стоимость строительно-монтажных работ и дополнительного оборудования ССГВ ( $\gamma_{ГУ} = 1,6$  для ГУ с баком из обычной стали,  $\gamma_{ГУ} = 2$  для ССГВ с баком из нержавеющей стали).

### 5.3 Методика расчета себестоимости производства тепловой энергии от ССГВ для горячего водоснабжения сельского жилого дома

Расчет количества тепловой энергии, вырабатываемой ССГВ по месяцам года, ведется по формуле

$$T = Q_{мес} \cdot A_{ск} \cdot \eta, \quad (5.9)$$

где  $T$  – количество тепловой энергии, МДж;  
 $Q_{мес}$  – суммарная радиация, МДж/м<sup>2</sup>;  
 $A_{ск}$  – площадь солнечных коллекторов, м<sup>2</sup>;  
 $\eta$  – коэффициент полезного действия ССГВ.

Эквивалентное количество замещаемой ССГВ энергии рассчитывается по формуле

$$\mathcal{E}_{ССГВ} = T \cdot \kappa_{пер}, \quad (5.10)$$

где  $\kappa_{пер}$  – коэффициент перевода (1 ГДж = 277,7 кВт·ч).

Годовая потребность сельского жилого дома в электрической энергии на горячее водоснабжение определяется исходя из количества человек, проживающих в нем, и норм расхода на одного человека.

Дополнительная потребность в электроэнергии на горячее водоснабжение определяется

$$\mathcal{E}_{дон} = \mathcal{E}_{ном} - \mathcal{E}_{ССГВ}, \quad (5.11)$$

где  $\mathcal{E}_{ном}$  – годовая потребность в электроэнергии на горячее водоснабжение, кВт·ч.

Капиталовложения в ССГВ определяются как

$$K_{ССГВ} = K_{об} + K_m + K_{проч.}, \quad (5.12)$$

где  $K_{об}$  – стоимость оборудования ССГВ;

$K_m$  – затраты на монтаж;

$K_{проч.}$  – прочие затраты, связанные с приобретением ССГВ ( $K_m = 0,2 K_{об}$ ,  $K_{пр} = 0,1 K_{об}$ ).

Годовые затраты на эксплуатацию ССГВ определяются по формуле

$$I_{ССГВ} = I_{ам} + I_{т.р.обсл.} + I_{проч.}, \quad (5.13)$$

где  $I_{ам}$  – амортизационные отчисления, руб/год;

$I_{т.р.обсл.}$  – затраты на текущий ремонт и техническое обслуживание ССГВ.

$$I_{ам} = \frac{\alpha_{ам} \cdot K_{ССГВ}}{100}; I_{т.р.обсл.} = 0,2 I_{ам}, \quad (5.14)$$

где  $\alpha_{ам}$  – норма амортизации, %.

$$\alpha_{ам} = \frac{1}{T_{сл}} 100, \quad (5.15)$$

где  $T_{сл}$  – срок службы ССГВ.  $T_{сл} = 15$  лет,  $\alpha_{ам} = 6,7\%$ .

Себестоимость тепловой энергии, получаемой от ССГВ

$$C = \frac{I_{ССГВ}}{\mathcal{E}_{ССГВ}}, \quad (5.16)$$

где  $C$  – себестоимость тепловой энергии, руб/кВт·ч;

$\mathcal{E}_{ССГВ}$  – годовая выработка тепловой энергии ССГВ, кВт·ч.

Затраты на дополнительное приобретение электроэнергии по месяцам

$$I_{доп.мес.} = \mathcal{E}_{доп.} \cdot Tar., \quad (5.17)$$

где  $\mathcal{E}_{доп.}$  – дополнительная потребность в электроэнергии, кВт·ч;

$Tar$  – тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч.

Годовые затраты по сельскому жилому дому на горячее водоснабжение при комбинированной системе

$$I_{\text{год}}^{\text{ССГВ}} = C_{\text{ССГВ}} \cdot \mathcal{E}_{\text{ССГВ}} + \text{Tar} \cdot \mathcal{E}_{\text{доп}} \quad (5.18)$$

где  $\text{Tar}$  – действующий тариф на электроэнергию, руб/кВт·ч.

Годовые затраты по сельскому жилому дому на горячее водоснабжение от внешнего источника

$$I_{\text{год.внеш.}} = \text{Tar} \cdot \mathcal{E}_{\text{год}}. \quad (5.19)$$

Годовая экономия затрат на теплоснабжение при различных значениях тарифа на электроэнергию

$$\mathcal{ЭК} = I_{\text{год.внеш.}} - I_{\text{год}}^{\text{ССГВ}}. \quad (5.20)$$

Срок окупаемости затрат на ССГВ сельского жилого дома

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{ССГВ}}}{\mathcal{ЭК}}. \quad (5.21)$$

**Таблица 5.3– Себестоимость производства тепловой энергии ССГВ и сроков окупаемости единовременных затрат при различных значениях тарифов**

Показатель	Усл. обозначения	НМ-16x18/58	НМ-16x21/58	НМ-20x21/58	НМ-36x21/58
1	2	3	4	5	6
Суммарная потребность в тепловой энергии, кВт·ч	$\mathcal{E}_{\text{год}}$	5948,4	5948,4	5948,4	5948,4
в т.ч. выработка ССГВ	$\mathcal{E}_{\text{ССГВ}}$	1674,95	2093,68	2596,17	4019,87
Дополнительная потребность в электроэнергии, кВт·ч	$\mathcal{E}_{\text{доп}}$	4273,45	3854,72	3352,23	1928,53
Себестоимость тепловой энергии, вырабатываемой ССГВ, руб/кВт·ч	$C$	1,68	1,91	1,87	2,14



Окончание табл. 5.3

1	2	3	4	5	6
Затраты по сельскому жилому дому на комбинированное горячее водоснабжение, при тарифе, руб.: 1,48 руб/кВт.ч	И <sub>ССГВ</sub>	9138,62	9703,92	9816,14	11456,75
2 руб/кВт.ч		11360,82	11708,37	11559,30	12459,58
3 руб/кВт.ч		15634,27	15563,08	14911,53	14388,11
5 руб/кВт.ч		24181,17	23272,52	21615,99	18245,16
Затраты по сельскому жилому дому на централизованное горячее водоснабжение, при тарифе, руб.: 1,48 руб/кВт.ч	И <sub>внеш.</sub>	8803,63	8803,63	8803,63	8803,63
2 руб/кВт.ч		11896,8	11896,8	11896,8	11896,8
3 руб/кВт.ч		17845,2	17845,2	17845,2	17845,2
5 руб/кВт.ч		29742	29742	29742	29742
Годовая экономия затрат при тарифе, руб.: 1,48 руб/кВт.ч	ЭК	-	-	-	-
2 руб/кВт.ч		535,98	188,43	337,50	-
3 руб/кВт.ч		2210,93	2282,12	2933,67	3457,09
5 руб/кВт.ч		5560,83	6469,48	8126,01	11496,84
Суммарные капиталовложения, руб.	К <sub>ССГВ</sub>	31200	44200	53820	95290
Срок окупаемости при тарифе, лет: 1,48 руб/кВт.ч	T <sub>ок</sub>	-	-	-	-
2 руб/кВт.ч		58,21	234,57	159,47	-
3 руб/кВт.ч		14,11	19,37	18,35	27,56
5 руб/кВт.ч		5,61	6,83	6,62	8,29

Таблица 5.4– Основные экономические показатели ССГВ

Показатель	Усл. обозначения	НМ-16x18/58	НМ-16x21/58	НМ-20x21/58	НМ-36x21/58
Цена ССГВ, тыс. руб.	Коб	24	34	41,4	73,3
Затраты на монтаж, тыс. руб.	Км	4,8	6,8	8,28	14,66
Прочие затраты, тыс. руб.	Кпр	2,4	3,4	4,14	7,33
Суммарные капиталовложения, тыс. руб.	К <sub>ССГВ</sub>	31,2	44,2	53,82	95,29
Срок службы, лет	Тсл	15	15	15	15
Норма амортизации, %	αам	6,7	6,7	6,7	6,7
Затраты на амортизацию, тыс. руб/год	Иам	2,09	2,96	3,61	6,38
Затраты на ремонт и обслуживание, тыс. руб/год	Ит.р.обсл.	0,42	0,59	0,72	1,28
Прочие затраты, тыс. руб/год	Ипроч.	0,31	0,44	0,54	0,95
Годовые эксплуатационные расходы по ССГВ, тыс. руб.	И <sub>ССГВ</sub>	2,82	4,00	4,87	8,61
Годовая выработка тепловой энергии ССГВ, кВт.ч	Э <sub>ССГВ</sub>	1674,95	2093,68	2596,17	4019,87
Себестоимость тепловой энергии, вырабатываемой ССГВ, руб/кВт.ч	С	1,68	1,91	1,87	2,14

Результаты моделирования, выполненного для четырех ССГВ с вакуумированными СК, различающимися эффективной площадью СК, объемом бака и, соответственно, количеством получаемой тепловой энергии, а также различными значениями тарифов на электроэнергию показали:

1. При существующей величине тарифа на электроэнергию для населения, проживающего в сельских населенных пунктах Красноярского края (1,06 руб/кВт·ч – по социальной норме и 1,86 руб/кВт·ч – сверх социальной нормы), Республики Хакасия (0,923 руб/кВт·ч) и Республики Тыва (1,53 руб/кВт·ч), использование ССГВ для горячего водоснабжения сельских бытовых потребителей с централизованным электроснабжением не оправдано.

2. В перспективе, при прогнозируемом росте тарифов на электроэнергию, система комбинированного ГВС дает определенный экономический эффект, значение которого зависит от типа ССГВ. Величина годового экономического эффекта будет зависеть не только от тарифа на электроэнергию от внешнего источника, но и от затрат на эксплуатацию ССГВ, которые в свою очередь зависят от ее стоимости. С учетом тенденции снижения стоимости ССГВ и увеличения тарифов в перспективе комбинированное ГВС сельских жилых домов будет конкурентоспособно по сравнению с электроводонагревателями.

3. Себестоимость производства тепловой энергии ССГВ лежит в пределах 1,5–1,9 руб/кВт·ч, что при использовании автономных систем электроснабжения, удаленных от электрических сетей сельских бытовых потребителей, обеспечит приемлемые сроки окупаемости затрат на создание системы комбинированного горячего водоснабжения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании системного анализа конструкций ССГВ установлено, что существующие ССГВ нерационально преобразуют солнечную радиацию в тепловую энергию горячей воды. Перспективным направлением решения данной проблемы является повышение потребительских свойств ССГВ за счет нагрева воды в утренние часы до более высокой температуры, а также путем учета пространственно-временного изменения солнечной радиации и других природно-климатических факторов при проектировании и использовании ССГВ на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва.

Разработанная в среде Maple квазипериодическая модель поля суммарной солнечной радиации (по базам данных 11 актинометрических станций Красноярского края, республик Хакасия и Тыва за период с января 1980 г. по декабрь 2005 г.) со среднеквадратическим отклонением от действительных значений, не превышающим 8,3 %, позволяет определять количество суммарной солнечной радиации, приходящей на земную поверхность при известных географических координатах местности за интересующий период времени для местностей, лежащих внутри поверхности земли, очерченной географическими координатами актинометрических станций на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва: Енисейск –  $\varphi = 58^{\circ}27'$  с.ш.,  $\psi = 92^{\circ}90'$  в.д.; Кызыл –  $\varphi = 51^{\circ}43'$  с.ш.,  $\psi = 94^{\circ}30'$  в.д.; КАТЭК –  $\varphi = 55^{\circ}32'$  с.ш.,  $\psi = 89^{\circ}12'$  в.д.

Разработанная модель режимов работы ССГВ, базирующаяся на моделях поля солнечной радиации и температуры воздуха, позволяет с инженерной точностью, при известных технических характеристиках ССГВ и заданных географических координатах ее места установки, рассчитать суточный график температуры горячей воды при изменении угла наклона СК, суточную (месячную, годовую и за заданный период) выработку тепловой энергии ССГВ, а также коэффициент замещения.

Моделирование в подпрограмме «ССГВ» суточного графика температуры горячей воды в баке-аккумуляторе ССГВ с вакуумированным СК при изменении объема воды показало, что предложенная конструкция ССГВ с регулируемым уровнем требуемую температуру горячей воды  $60^{\circ}\text{C}$  обеспечит за два часа в марте месяце при 20 %-м объеме воды в баке-аккумуляторе, тогда как полный бак воды нагреется всего до  $23^{\circ}\text{C}$ , а в течение дня до  $55^{\circ}\text{C}$ .

Предложенные конструкции ССГВ позволяют повысить эффективность использования солнечной энергии: в первой оригинальной конструкции – за счет использования обечайки вокруг теплообменника для концентрации горячей воды в баке-аккумуляторе ССГВ; во второй – за счет того, что в ССГВ с вакуумированным СК бак-аккумулятор снабжен устройством для сбора горячей воды, выполненным в виде плавающей платформы, при этом нижняя поверхность платформы выполнена конусообразно, с отверстием посередине, в которое установлено водозаборное устройство; в третьей конструкции – за счет оригинальной, состоящей в виде сегментов сферы сферической конструкции СК; что позволяет повысить эффективность нагрева воды. Разработанные конструкции ССГВ сочетают в себе функции проточного и аккумуляционного водонагревателя и позволяют использовать в качестве источника СР ветровую энергию и электрическую энергию (доводчик-дублер), при этом при небольшом расходе воды потребителю поступает горячая вода независимо от интенсивности и продолжительности солнечного сияния.

Проведенные в июле-августе 2007 г. испытания гелиоколлектора «СОКОЛ» в составе ССГВ, смонтированного под углом наклона  $43^\circ$  по отношению к горизонту и ориентированного в южном направлении в пригороде Красноярска с отклонением менее 5%, подтвердили расчетные значения равновесной температуры гелиоколлектора и выработки тепловой энергии. В ходе экспериментальных исследований установлено, что градиент температуры воды в баке-аккумуляторе, в котором водонагревательная установка снабжена обечайкой, выполненной в виде усеченного конуса с установленным в нем теплообменником, соединенным с гелиоколлектором, возрастает, что способствует накоплению воды с более высокой температурой в верхнем слое (на  $3,0\text{--}5,6^\circ\text{C}$  выше, чем при традиционной конструкции ССГВ). Как показало сравнение результатов моделирования режимов работы предлагаемой конструкции ССГВ с вакуумированным СК с экспериментальными данными, расхождение результатов не превышает инженерной точности – 10 %. Экономия электрической энергии СГВ за счет более полного приближения графика выработки горячей воды к графику ее потребления составляет 11–13 %.

Установлено, что при существующей величине тарифов на электроэнергию для сельских жителей в Красноярском крае, республиках Хакасия и Тыва использование систем солнечного горячего водоснаб-

жения сельских бытовых потребителей при централизованном электроснабжении экономически не оправдано. Себестоимость производства тепловой энергии ССГВ лежит в пределах 1,5–1,9 руб/кВт·ч, что при использовании автономных систем электроснабжения, удаленных от электрических сетей сельских бытовых потребителей, обеспечит приемлемые сроки окупаемости затрат на создание системы комбинированного горячего водоснабжения. Установлено, что наиболее перспективным является использование ССГВ для горячего водоснабжения сельских бытовых потребителей Республики Тыва, где тариф на электрическую энергию для сельского населения сравнялся с себестоимостью производства тепловой энергии ССГВ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авезов, Р.Р.* Системы солнечного тепло- и хладоснабжения [Текст] / под ред. *Э.В. Сарнацкого* и *С.А. Чистовича*. – М.: Стройиздат, 1990. – 328 с.
2. *Авезов, Р.Р.* Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения [Текст] / *Р.Р. Авезов, А.Ю. Орлов*. – Ташкент: Фан, 1988. – 288 с.
3. Автономные энергоустановки на возобновляемых источниках энергии [Электронный ресурс] // АВОК. Библиотека научных статей. – URL: <http://www.abok.ru> (дата обращения: 15.08.2014).
4. *Амерханов, Р.А.* Вопросы теории и инновационных решений при использовании гелиоэнергетических систем [Текст] / *Р.А. Амерханов, В.А. Бутузов, К.А. Гарькавый*. – М.: Энергоатомиздат, 2009. – 504 с.
5. *Амерханов, Р.А.* Оптимизация сельскохозяйственных энергетических установок с использованием возобновляемых видов энергии [Текст] / *Р.А. Амерханов*. – М.: КолосС, 2003. – 532 с.
6. Атлас ветрового и солнечного климатов России [Текст] / под ред. *М.М. Борисенко, В.В. Стадник*. – СПб., 1997. – 173 с.
7. *Ахметжанов, Р.А.* Повышение эффективности использования солнечной и ветровой энергии для теплоснабжения сельскохозяйственных потребителей: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / *Р.А. Ахметжанов*. – Челябинск, 2005. – 159 с.
8. *Барашкова, Е.П.* Восстановление среднего месячного дневного хода суммарной радиации по средней месячной сумме за один или несколько часовых интервалов [Текст] / *Е.П. Барашкова* // Тр. ГГО. – 1985. – Вып. 488. – С. 90–105.
9. *Безруких, П.П.* Зачем России возобновляемые источники энергии? [Текст] / *П.П. Безруких* // Энергия: экономика, техника, экология. – 2002. – № 10. – С. 2–8.
10. *Безруких, П.П.* Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России [Текст] / *П.П. Безруких*. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.
11. *Безруких, П.П.* Научно-техническое и методологическое обоснование ресурсов и направлений использования возобновляемых источников энергии: дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / *П.П. Безруких*. – М., 2003. – 290 с.

12. *Безруких, П.П.* Возобновляемая энергетика: стратегия, ресурсы, технологии [Текст] / *П.П. Безруких, Д.С. Стребков.* – М.: Изд-во ГНУ ВИЭСХ, 2005. –128 с.

13. *Безруких, П.П.* Нетрадиционная возобновляемая энергетика в мире и России. Состояние, проблемы, перспективы [Текст]/ *П.П. Безруких, Д.С. Стребков* //Энергетическая политика. –2001. – № 3. – С. 3–13.

14. *Бекман, У.А.* Расчет системы солнечного теплоснабжения [Текст] / *У.А. Бекман, С. Клейн, Дж.А. Даффи.* – М.: Энергоиздат, 1982. – 79 с.

15. *Берлянд, Т.Г.* Климатические исследования режима солнечной радиации для использования их в гелиотехнических целях [Текст] / *Т.Г. Берлянд* // Тр. ГГО. –1980. –Вып.427. –С. 3–55.

16. *Берлянд, Т.Г.* Распределение солнечной радиации на континентах [Текст] / *Т.Г. Берлянд.*– Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 227 с.

17. *Большев, Л.Н.* Таблицы математической статистики [Текст]/ *Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов.* – М.: ВЦ АН СССР, 1965. – 464 с.

18. *Бронштейн, И.Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / *И.Н. Бронштейн, К.А Семендяев.* – М.: Наука, 1986. – 544 с.

19. *Брукс, К.* Применение статистических методов в метеорологии [Текст] / *К. Брукс, Н. Карузертс.* – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – 416 с.

20. *Бутузов, В.А.* Анализ энергетических и экономических показателей гелиоустановок горячего водоснабжения [Текст] / *В.А. Бутузов* // Промышленная энергетика. – 2001. – № 10.– С. 54–61.

21. *Бушуев, В.В.* Новая энергетическая политика России – основа развития малой и нетрадиционной энергетики [Текст] / *В.В. Бушуев* // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1997. – № 4. –С. 3–4.

22. Вакуумный трубчатый гелиоколлектор Vitosol 300-T высокой эффективности [Электронный ресурс]// Солнечные коллекторы Viessmann. –URL: <http://domteplo.ru/Solar-Systeme-viessmann.htm> (дата обращения: 12.10.2014).

23. *Валов, М.И.* Разработка инженерной методики расчета систем гелиотеплоснабжения на основе усредненных климатических данных: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / *М.И. Валов.* – М., 1984. –173 с.

24. *Валов, М.И.* Оценка стоимости солнечного коллектора для систем гелиотеплоснабжения и пути ее снижения [Текст] / *М.И. Ва-*



лов, В.А. Асташенко, Б.Н. Зимин // Гелиотехника. – 1984. – № 3. – С. 65–69.

25. Валов, М.И. Использование солнечной энергии в системах теплоснабжения [Текст] / М.И. Валов, И.Б. Казанджан. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 140 с.

26. Виссарионов, В.И. Методы расчета ресурсов возобновляемых источников энергии: учеб. пособие [Текст] / В.И. Виссарионов, А.А. Бурмистров, Г.В. Дерюгина. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 144 с.

27. Виссарионов, В.И. Расчет ресурсов солнечной энергетики [Текст] / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, С.В. Кривенкова. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – 60 с.

28. Виссарионов, В.И. Солнечная энергетика: учеб. пособие для вузов [Текст] / В.И. Виссарионов, Г.В. Дерюгина, В.А. Кузнецова. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 276 с.

29. Грачева, Л.И. Применение нетрадиционных источников энергии в Крыму [Текст] / Л.И. Грачева, М.И. Городов, С.В. Чеботарь // Основные направления развития сельскохозяйственного производства Крыма в период перехода к рынку / Крым. с.-х. ин-т. – Киев, 1991. – С. 208–217.

30. Даффи, Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии [Текст] / Дж.А. Даффи, У.А. Бекман. – М.: Мир, 1977. – 420 с.

31. Дьяков, А.Ф. Состояние и перспективы развития нетрадиционной энергетики в России [Текст] / А.Ф. Дьяков // Известия АН. Энергетика. – 2002. – № 4. – С. 13–29.

32. Исаев, А.А. Статистика в метеорологии и климатологии [Текст] / А.А.Исаев. – М.: Изд-во МГУ, 1988. – 248 с.

33. Как выбрать тип коллектора для системы теплоснабжения? [Электронный ресурс]// Rkraft: Электроэнергия. Тепловая энергия. – URL: <http://alt.rkraft.ru/solnechnye-kollektory.html> (дата обращения: 27.10.2014).

34. Климат Абакана [Текст]/ под ред. А.С. Герасимовой. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 152 с.

35. Климат Красноярска [Текст]/ под ред. Ц.А. Швер и А.С. Герасимовой. –Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 232 с.

36. Кобышева, Н.В. Климатологическая обработка метеорологической информации [Текст] / Н.В. Кобышева, Г.Я. Наровлянский. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 295 с.

37. *Коломиец, Ю.Г.* Исследование эффективности преобразования энергии солнечного излучения в низкопотенциальное тепло в различных климатических условиях: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / *Ю.Г. Коломиец.* – М., 2009. – 174 с.

38. *Кондратьев, К.А.* Актинометрия [Текст] / *К.А. Кондратьев.* – Л.: Гидрометеиздат, 1967. – 506 с.

39. *Коршунов, А.П.* Методические основы технико-экономической оценки невозобновляемых источников энергии [Текст] / *А.П. Коршунов* // Техника в сельском хозяйстве. – 1994. – № 1. – С. 5–9.

40. Краткое сравнение вакуумных и плоских гелиоколлекторов [Электронный ресурс] // Solar: Солнечное тепло. Гелиосистемы. Солнечные коллекторы. – URL: [http://solar.atmosfera.ua/ru/articles/flatvsvacuum\\_collectors/](http://solar.atmosfera.ua/ru/articles/flatvsvacuum_collectors/) (дата обращения: 27.10.2010).

41. *Лемасов, Б.И.* Экспериментальные исследования совместной работы ветро- и гелиоустановок [Текст] / *Б.И. Лемасов, И.Г. Савченко, А.Н. Смирнов* // Гелиотехника. – 1978. – №2. – С. 46–50.

42. *Лукутин, Б.В.* Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении [Текст] / *Б.В. Лукутин, О.А. Суржикова, Е.Б. Шандарова.* – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 231 с.

43. *Львовский, Е.Н.* Статистические методы построения эмпирических формул [Текст] / *Е.Н. Львовский.* – М.: Высшая школа, 1988. – 239 с.

44. *Мак-Вейг, Д.* Применение солнечной энергии [Текст] / *Д. Мак-Вейг.* – М.: Энергоиздат, 1981. – 216 с.

45. Международные классификации [Электронный ресурс] // Изобретения. – URL: <http://www.fips.ru> (дата обращения: 15.08.2014).

46. *Меновщиков, Ю.А.* Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие [Текст] / *Ю.А. Меновщиков, Л.В. Куликова;* Алт. гос. техн. ун-т. – Новосибирск, 2007. – 356 с.

47. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [Текст]. – М.: Изд-во ВНИИЭСХ, 1998. – 219 с.

48. *Митрапольский, А.К.* Техника статистических вычислений [Текст] / *А.К. Митрапольский.* – М.: Наука, 1971. – 576 с.

49. *Михеев, М.А.* Основы теплопередачи [Текст] / *М.А. Михеев, И.М. Михеева.* – М.: Энергия, 1973. – 319 с.

50. *Мовсунов, Э.А.* К определению повторяемости суточных сумм прямой радиации по зонам Азербайджана [Текст] / *Э.А. Мовсунов, В.И. Есьман* // Гелиотехника.– 1966. – № 3. –С. 53–56.

51. Моделирование научно-технологических программ развития АПК [Электронный ресурс] / *Н.В. Цугленок* [и др.]; под общ. ред. *Н.В. Цугленка*. – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2010. – 827 с. (Зарегистрировано ФГУП НТЦ «Информрегистр» 13.11.2010, № государственной регистрации 0321002340).

52. *Мышко, Ю.Л.* Тепловые и гидравлические характеристики систем солнечного горячего водоснабжения в условиях умеренного климата: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / *Ю.Л. Мышко*. – М., 1984. – 152 с.

53. Научно-прикладной справочник по климату СССР [Текст]. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1–6 / Госком. СССР по гидрометеорологии. – М.: Гидрометеиздат, 1990. – Вып.9. – 557 с.

54. Некоторые типы солнечных водонагревателей с вакуумными трубками [Электронный ресурс] // Водонагреватели (Китай). –URL: [http://openchina.ru/products/vodonagrevateli\\_na\\_solnechnoj\\_energii](http://openchina.ru/products/vodonagrevateli_na_solnechnoj_energii) (дата обращения: 12.10.2014).

55. *Никифоров, В.А.* Математические модели для проектирования гелиосистем теплоснабжения зданий [Текст] / *В.А. Никифоров*// Гелиотехника. – 1987. – № 2. –С. 52–55.

56. *Орлов, В.Л.* Использование гелиоветроэнергетических установок для энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей Челябинской области: дис. ...канд. техн. наук [Текст] / *В.Л. Орлов*. – Челябинск, 1993. – 227 с.

57. Патент РФ на изобретение № 2228492. Устройство для горячего водоснабжения [Текст] / *С.К. Шерьязов, Р.А. Ахметжанов*// БИ. – 2004. – № 13.

58. Патент РФ на изобретение № 2319910. Двухконтурная система солнечного горячего водоснабжения [Текст] / *А.В. Бастрон, Е.М. Судаев, П.П. Лемясов* // БИ. – 2008. – № 8.

59. Патент РФ на изобретение № 2382291. Водонагревательная установка [Текст] / *А.В. Бастрон* // БИ.– 2010. – №5.

60. *Пивоварова, З.И.* Радиационные характеристики климата СССР [Текст] / *З.И. Пивоварова*. – Л.: Гидрометеиздат, 1977. – 335 с.

61. *Пивоварова, З.И.* Климатические характеристики солнечной радиации как источника энергии на территории СССР [Текст] / *З.И. Пивоварова, В.В. Стадник*. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 292 с.

62. *Пилюгина, В.В.* Применение солнечной и ветровой энергии в сельском хозяйстве [Текст] / *В.В. Пилюгина, В.А. Гурьянов.* – М., 1981. – 60 с.
63. *Попель, О.С.* Анализ показателей эффективности использования солнечных водонагревательных установок [Текст] / *О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец* // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2004. – №5. –С. 28–32.
64. *Попель, О.С.* Определение ресурсов энергии солнечного излучения по территории России [Текст] / *О.С. Попель, С.Е. Фрид, Ю.Г. Коломиец* // Энергия: экономика, техника, экология. – 2007. – №1. –С. 15–23.
65. *Попель, О.С.* Сравнительный анализ показателей конструкций солнечных коллекторов зарубежных и отечественных производителей [Текст] / *О.С. Попель, С.Е. Фрид, В.Н. Щеглов* // Теплоэнергетика. – 2006. – №3. –С. 11–16.
66. *Пястолов, А.А.* Гелиоустановка для летней доильной площадки [Текст] / *А.А. Пястолов, Л.А. Саплин, С.К. Шерьязов* // Достижения науки и техники АПК. – 1989. – № 7. –С. 48–49.
67. *Рабинович, М.Д.* Анализ методов представления климатической информации в расчетах теплового баланса [Текст] / *М.Д. Рабинович* // Современные методы проектирования инженерного оборудования. – Киев, 1973. – № 3. –С. 48–58.
68. *Рабинович, М.Д.* Исследование гелиосистем горячего водоснабжения на математических моделях [Текст] / *М.Д. Рабинович, А.Р. Ферт* // Гелиотехника.–1980. – № 2. –С. 39–46.
69. Руководство по первичной обработке материалов метеорологических наблюдений [Текст]. – Л.: Гидрометеиздат, 1957. – 298 с.
70. *Рыжов, А.П.* Определение фактического среднесуточного потребления горячей воды на одного жителя г. Красноярска [Текст] / *А.П. Рыжков, М.С. Пронин* // Энергоэффективность: достижения и перспективы: мат-лы V Всерос. науч.-практ. конф. –Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. –С. 22–25.
71. *Салиева, Р.Б.* Аналитические представления законов распределения энергетической структуры режима солнечной радиации [Текст] / *Р.Б. Салиева* // Гелиотехника. – 1978. – № 6. –С. 64–69.
72. *Салиева, Р.Б.* Опыт математического моделирования энергетической структуры режима солнечной радиации [Текст] / *Р.Б. Салиева* // Гелиотехника. – 1978. – № 3. –С. 62–72.

73. Салиева, Р.Б. Опыт построения гелиоэнергетического кадастра [Текст] / Р.Б. Салиева // Гелиотехника. – 1977. – № 3. –С. 56–65.

74. Саплин, Л.А. Исследование экономической эффективности гелиоветроэнергетических установок для горячего водоснабжения [Текст] / Л.А. Саплин, В.Л. Орлов // Повышение надежности электрооборудования в системах электроснабжения: межвуз. сб. / Алтайский ГТУ. –1992. – №1. –С. 192–197.

75. Саплин, Л.А. Косвенный метод оценки поступающей солнечной энергии [Текст] / Л.А. Саплин, С.К. Шерьязов // Проблемы энергообеспечения и энергосбережения в АПК Украины: тр. междунар. науч.-практ. конф. – Харьков: Изд-во ХГТУ, 2001. –С. 222–226.

76. Саплин, Л.А. Оценка эффективности использования комбинированных солнечных установок [Текст] / Л.А. Саплин, С.К. Шерьязов // Техника в сельском хозяйстве. – 1991. – № 2. –С. 25–26.

77. Саплин, Л.А. Уточненная методика оценки эмпирических характеристик с помощью кривых распределения Пирсона для Южного Урала [Текст] / Л.А. Саплин, В.Л. Орлов // Повышение эксплуатационной надежности электрооборудования в сельском хозяйстве: тр. / ЧИМЭСХ. – Челябинск, 1990. –С. 71–76.

78. Саплин, Л.А. Уточненная методика расчета солнечной энергии на примере Челябинской области [Текст] / Л.А. Саплин // Вестн. ЧГАУ. – 1998. –Т. 26. –С. 120–123.

79. Саплин, Л.А. Экономическое обоснование использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии в Челябинской области [Текст] / Л.А. Саплин // Ползуновский альманах: науч.-произв. журн. /Алтайский ГТУ. –1999. – №1. –С. 88–101.

80. Саплин, Л.А. Энергоснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников: дис. ... д-ра техн. наук [Текст] / Л.А. Саплин. – Челябинск, 1999. – 318 с.

81. Саплин, Л.А. Энергоснабжение сельскохозяйственных потребителей с использованием возобновляемых источников: учеб. пособие для вузов [Текст] / Л.А. Саплин, С.К. Шерьязов, О.С. Пташкина-Гирина. – Челябинск, 2000. – 203 с.

82. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2006611289. Квазипериодическая модель суммарной солнечной радиации [Текст] / А.А. Беляков, А.В. Бастрон, Е.М. Судаев и др. –Зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 17.04.2006 г.

83. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2009612202. Квазипериодическая модель поля средней температуры воздуха [Текст] / *А.А. Беляков, А.В. Бастрон, Е.М. Судаев* и др. –Зарегистрирована в Реестре программ для ЭВМ 29.04.2009 г.

84. *Сивков, С.И.* Закономерность распределения суточных сумм солнечной радиации по отдельным часовым промежуткам [Текст] / *С.И. Сивков* // Тр.ГГО. –1968. –Вып. 223. –С. 125–131.

85. Солнечная энергия дешевет [Электронный ресурс] // Солнечная энергетика. –URL: <http://www.renewable.com.ua> (дата обращения: 08.08.2014).

86. Солнечный водонагреватель – простая система [Электронный ресурс] // Солнечные водонагреватели. – URL: <http://sun.duk.ru/teplo.html> (дата обращения: 12.10.2014).

87. Солнечный водонагреватель НМ-16x18/58 [Электронный ресурс] // Солнечные водонагреватели. –URL: <http://svs-solar.ru/solnechnye-vodonagrevateli> (дата обращения: 12.10.2014).

88. Солнечный дом [Электронный ресурс] // Солнечные коллекторы и их устройство.–URL: <http://www.new-h.ru> (дата обращения: 15.08.2011).

89. Солнечный коллектор всесезонный на трубках типа HeatPipe 1800x58 мм (30 шт.) [Электронный ресурс] // Компания «Гиперион» – только горячие технологии. –URL: <http://giperion.khv.ru> (дата обращения: 07.10.2014).

90. Солнечный коллектор с накопительным баком без давления [Электронный ресурс] // СВС Красноярск. Энергосберегающие технологии. Альтернативные источники энергии. –URL: <http://econom24.ru/category/solnechnaya-energiya-2/vodonagrevateli> (дата обращения: 15.01.2012).

91. Солнце [Электронный ресурс] // Независимая энергия для независимых людей. –URL: <http://www.altenergo.lv/ru/solnce> (дата обращения: 27.10.2010).

92. Справочник по климату СССР [Текст].– Л.: Гидрометеоиздат, 1966. –Вып. 9. – Ч.1. – 298 с.

93. Справочник по климату СССР [Текст].– Л.: Гидрометеоиздат, 1965. –Вып. 9. – Ч. 2. – 362 с.

94. *Стребков, Д.С.* Концепция и пути развития энергетики сельского хозяйства [Текст] / *Д.С. Стребков* // Техника в сельском хозяйстве. – 1995.– № 6. –С. 2–4.

95. *Стребков, Д.С.* Развитие фотоэлектричества в России [Текст] / *Д.С. Стребков, А.Б. Пинов* // Возобновляемая энергия.– 2001. – № 1. –С. 6–7.

96. Строительный портал. Новости [Электронный ресурс] // В Японии придумали сферические солнечные батареи. –URL: <http://www.stroimdom.com.ua/news/> (дата обращения: 11.12.2011).

97. *Судаев, Е.М.* Горячее водоснабжение коммунально-бытовых потребителей на селе с использованием солнечных водонагревательных установок в климатических условиях Красноярского края [Текст] / *Е.М. Судаев, А.В. Бастрон* // Электроэнергетика в сельском хозяйстве: мат-лы Междунар. науч-практ. конф.(26–30 июня 2009 г., Респ. Алтай, Чемал. р-н, база НГТУ Эрлагол) / Россельхозакадемия. Сиб. регион.отд-ние. –Новосибирск, 2009. –С. 189–196.

98. *Судаев, Е.М.* Исследование и производственные испытания в условиях Красноярска солнечных водонагревательных установок с вакуумированными коллекторами [Текст] / *Е.М. Судаев, А.В. Бастрон* // Ползуновский вестник. – 2011. – №2/2. –С. 221–225.

99. *Судаев, Е.М.* Математическое моделирование потенциала солнечной энергии на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва [Текст] / *Е.М. Судаев, А.В. Бастрон, А.А. Беляков*// Энергоэффективность систем жизнеобеспечения города: мат-лы VI Всерос. науч.-практ. конф.– Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. –С. 296–300.

100. *Судаев, Е.М.* Моделирование поля солнечной радиации на территории Красноярского края, республик Хакасия и Тыва [Текст] / *Е.М. Судаев, А.В. Бастрон, А.А. Беляков* // Машинно-технологическое, энергетическое и сервисное обслуживание сельхозтоваропроизводителей Сибири: мат-лы Междунар. науч-практ. конф., посвящ.100-летию со дня рождения академика ВАСХНИЛ *А.И. Селиванова*(9–11 июня 2008 г., Краснообск) / Россельхозакадемия. Сиб. отд-ние. ГНУ СибИМЭ. –Новосибирск, 2008. –С. 258–264.

101. *Судаев, Е.М.* Особенности использования солнечных водонагревательных установок в климатических условиях Красноярского края [Текст] / *Е.М. Судаев, А.В. Бастрон* // Энергетика и энергосбережение: прил. к «Вестнику КрасГАУ». – Красноярск: Изд-во КрасГАУ, 2005. – С. 205–209.

102. *Судаев, Е.М.* Система горячего водоснабжения коттеджа с использованием гелиоколлектора «Сокол» в климатических условиях

г. Красноярска [Текст] / *Е.М. Судаев, А.В. Бастрон* // Энергоэффективность: достижения и перспективы: мат-лы V Всерос. науч.-практ. конф. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. – С. 67–71.

103. *Судаев, Е.М.* Теоретические модели поля солнечной радиации и результаты исследований солнечного водонагревателя в климатических условиях Красноярского края [Текст] / *Е.М. Судаев, А.В. Бастрон, А.А. Беляков* // Вестник КрасГАУ. – 2008. – №4. – С. 245–254.

104. Схема расчета солнечных коллекторов [Электронный ресурс] // Солнечные коллекторы Sintsolar. – URL: <http://www.artclimat.com.ua/equipment/solar/1/> (дата обращения: 27.10.2014).

105. *Тарнижевский, Б.В.* Определение показателей работы солнечных установок в зависимости от характеристик радиационного режима [Текст] / *Б.В. Тарнижевский* // Теплоэнергетика. – 1960. – Вып. 2. – С. 18–26.

106. *Тарнижевский, Б.В.* Оценка эффективности применения солнечного теплоснабжения в России [Текст] / *Б.В. Тарнижевский* // Теплоэнергетика. – 1996. – №5. – С. 15–18.

107. *Трушевский, С.К.* Пластмассовый солнечный коллектор. Опыт разработки и внедрения в серийное производство [Текст] / *С.К. Трушевский, А.К. Суханов* // Автономная энергетика сегодня и завтра: сб. докл. Междунар. симп. Ч. 1. – СПб., 1993. – С. 58–59.

108. *Удалов, С.Н.* Возобновляемые источники энергии: учеб. [Текст] / *С.Н. Удалов*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 432 с.

109. *Усаковский, В.М.* Возобновляемые источники энергии [Текст] / *В.М. Усаковский*. – М.: Россельхозиздат, 1986. – 126 с.

110. Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования. ВСН 52-86 / Госгражданстрой. – М.: ГУП ЦПП, 1999. – 16 с.

111. *Федянин, В.Я.* Комбинированная автономная энергосистема с использованием ВИЭ для юга Западной Сибири [Текст] / *В.Я. Федянин* // Возобновляемая энергия. – 1998. – №4. – С. 42–44.

112. *Харченко, Н.В.* Индивидуальные солнечные установки [Текст] / *Н.В. Харченко*. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.

113. *Цугленок, Н.В.* Рациональное сочетание традиционных и возобновляемых источников энергии в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей [Текст] / *Н.В. Цугленок, С.К. Ше-*



*рьязов, А.В. Бастрон*; Краснояр. гос. аграр. ун-т. – Красноярск, 2012. – 360 с.

114. *Шафеев, А.И.* Численное моделирование систем солнечного теплоснабжения индивидуального жилого дома (вычислительная программа Solar. Сравнение с f-методом) [Текст] / *А.И. Шафеев* // Гелиотехника. – 1991. – № 5. – С. 61–65.

115. *Шафраник, Ю.К.* Новая энергетическая политика России [Текст] / под общ. ред. *Ю.К. Шафраника*. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 510 с.

116. *Шерьязов, С.К.* Возобновляемые источники в системе энергоснабжения сельскохозяйственных потребителей [Текст] / *С.К. Шерьязов*. – Челябинск, 2008. – 302 с.

117. *Шерьязов, С.К.* Гелиоветроэнергетическая установка для горячего водоснабжения [Текст] / *С.К. Шерьязов* // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 3-й Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 4. Нетрадиционные источники энергии. Вторичные энергоресурсы. Экология. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2003. – С. 107–109.

118. *Шерьязов, С.К.* Горячее водоснабжение сельскохозяйственного производства в условиях Южного Урала с использованием солнечной энергии: дис. ...канд. техн. наук [Текст] / *С.К. Шерьязов*. – Челябинск, 1990. – 229 с.

119. *Шерьязов, С.К.* Имитационная модель гелиоветроэнергетической установки теплоснабжения [Текст] / *С.К. Шерьязов, Р.А. Ахметжанов* // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 4-й Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 4. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2004. – С. 187–191.

120. *Шерьязов, С.К.* Использование возобновляемых источников энергии в сельском хозяйстве: учеб. пособие [Текст] / *С.К. Шерьязов, О.С. Пташкина-Гирина*. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2013. – 280 с.

121. *Шерьязов, С.К.* Исследование часовой суммы солнечной радиации в условиях Южного Урала [Текст] / *С.К. Шерьязов* // Мат-лы XLII науч.-техн. конф. ЧГАУ. Ч.3. – Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2003. – С. 209–213.

122. *Шерьязов, С.К.* К методике оптимизации угла наклона гелиоустановки [Текст] / *С.К. Шерьязов, Ф.С. Тищенко* // Возобновляе-

мые источники энергии: тр. второй Всерос. науч. молодежной школы. – М.: Изд-во МГУ, 2000. –С. 57–59.

123. *Шерьязов, С.К.* Методика определения основных энергопоказателей фермерских хозяйств [Текст] / *С.К. Шерьязов, Р.А. Ахметжанов* // ЧГАУ – 70 лет: тез. докл. науч.-техн. конф. – Челябинск: Изд-во ЧГАУ, 2000. – С. 236–238.

124. *Шерьязов, С.К.* Методические основы определения мощности гелио- и ветроэнергетических установок [Текст] / *С.К. Шерьязов* // Техника в сельском хозяйстве. – 2000. – №3. –С. 36–39.

125. *Шерьязов, С.К.* Моделирование дневной суммы солнечной радиации за время работы гелиоустановки [Текст] / *С.К. Шерьязов* // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: тр. 5-й Междунар. науч.-техн. конф. Ч. 4. Возобновляемые источники энергии. Местные энергоресурсы. Экология. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. –С. 68–73.

126. *Шерьязов, С.К.* Обоснование эффективной системы энергоснабжения с использованием возобновляемой энергии [Текст] / *С.К. Шерьязов* // Ползуновский вестник /АлтГТУ. – Барнаул, 2006. –Вып. 4, №2. –С. 434–439.

127. *Шерьязов, С.К.* Оптимальные значения основных параметров систем теплоснабжения, основанных на гелио- и ветроэнергетических установках [Текст] / *С.К. Шерьязов, Р.А. Ахметжанов* // Ползуновский вестник /АлтГТУ. – Барнаул, 2005. –Вып. 4. –С. 105–108.

128. *Шерьязов, С.К.* Оптимизация угла наклона гелиоустановки в условиях Южного Урала [Текст] / *С.К. Шерьязов, Ф.С. Тищенко* // Вестн. ЧГАУ. – 2001. –Т. 34. –С. 75–77.

129. *Шерьязов, С.К.* Совершенствование метода расчета теплоэнергетической системы, основанной на солнечной и ветровой энергии [Текст] / *С.К. Шерьязов, Р.А. Ахметжанов* // Вестн. ЧГАУ. – 2005. –Т.44. –С. 143–146.

130. Энергетическое оборудование для использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии / под ред. *В.И. Виссарионова*. – М.: Изд-во ВИЭН, 2004. – 448 с.

131. ENERYSUN [Электронный ресурс] // Использование вакуумных технологий для круглогодичного отопления и горячего водоснабжения. –URL: <http://www.essolar.ru> (дата обращения: 07.10.2014).

132. Sind Röhrenkollektoren besser als der focus-ar Flachkollektor? [Электронный ресурс] // Häufige Fragen unserer Kunden ... . – URL:

<http://www.sailer-solarsysteme.de/sonnenkollektor1.htm> (дата обращения: 27.09.2014).

133. Solar-Home Heating & Hot Water System at Gould Electronics [Электронный ресурс] // Gould Electronics. – URL: <http://www.gouldelectronics.co.uk/solar-energy.htm> (дата обращения: 27.09.2014).

134. Sunda Solar Water Heaters [Электронный ресурс] // Beijing Sunda Solar Energy Tehnology Co., Ltd. – URL: [http://sundasolar.com/product\\_waterheaters.html](http://sundasolar.com/product_waterheaters.html) (дата обращения: 12.09.2014).

135. NASA Surface meteorology and Solar Energy – Choices [Электронный ресурс] // NASA. ATMOSPHERIC DATA CENTER. – URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=&lat=56.540359&lon=89.306801&submit=Submit> (дата обращения: 12.09.2014).

*Научное издание*

**ГОРЯЧЕЕ ВОДОСНАБЖЕНИЕ  
СЕЛЬСКИХ БЫТОВЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ КРАСНОЯРСКОГО  
КРАЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ**

*Бастрон Андрей Владимирович  
Михеева Наталья Борисовна  
Судаев Евгений Михайлович*

Редактор *Т.М. Мاستрич*

Санитарно-эпидемиологическое заключение № 24.49.04.953.П. 000381.09.03 от 25.09.2003 г.

Подписано в печать 11.01.2016. Формат 60×84/16. Бумага тип. № 1.

Печать - ризограф. Усл. печ. л. 8,25 п.л. Тираж 500 экз. Заказ № 8

Редакционно-издательский центр Красноярского государственного аграрного университета  
660017, Красноярск, ул. Ленина, 117