

На правах рукописи

Э

—

СЛЕСАРЕНКО Илья Вячеславович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ
С СОЛНЕЧНЫМИ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ**
(на примере Дальневосточного региона)

**Специальность: 05.23.03 – теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» (г. Владивосток).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Гульков Александр Нефедович
Официальные оппоненты: **Стенников Валерий Алексеевич**
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ, заместитель
директора по науке, ФГБУН «Институт
систем энергетики им. Л.А. Мелентьева»
Сибирского отделения Российской академии
наук, г. Иркутск

Фрид Семен Ефимович
кандидат технических наук, заведующий ла-
бораторией возобновляемых источников
энергии, ФГБУН «Объединенный институт
высоких температур» Российской академии
наук, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное
учреждение высшего образования «Санкт-
Петербургский национальный исследова-
тельский университет информационных
технологий, механики и оптики», г. Санкт-
Петербург

Защита диссертации состоится 27 декабря 2016 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.06** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Пухкал Виктор Алексеевич

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Активное использование возобновляемых источников энергии относится к одному из главных направлений развития современной энергетики. Насущная необходимость решения этого вопроса является инженерной, экономической, и экологической задачей.

Плотность потока солнечного излучения в Приморском крае, на юге Хабаровского края и в пределах Сахалинской области является достаточной для применения солнечных водонагревательных установок (СВНУ), что подтверждается данными метеонаблюдений в течение последних 20 лет. Длительность солнечного излучения на Дальнем Востоке составляет около 1700–2000 часов в год, поэтому значительная часть региона является благоприятной для развития солнечной энергетики.

Реализация комплексного подхода к созданию гелиоустановок, энергетический потенциал которых используется в совокупности с известными способами теплоснабжения (включая тепловые насосы и аккумуляторы теплоты), показала, что существует техническая возможность нагрева воды в СВНУ для ГВС потребителей независимо от нестабильности генерации солнечной энергии.

Задача разработки энергоэффективных решений для применения СВНУ при замещении ГВС и части отопительной нагрузки промышленных, социальных и жилых объектов поставлена в ряде Программ энергосбережения субъектов Дальневосточного региона. Работа соответствует перечню технологий РФ, утвержденных Указом Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. № 899 («Технологии новых и возобновляемых источников энергии, включая водородную энергетику»).

Степень разработанности темы исследования. Вопросам использования солнечных водонагревательных установок в системах теплоснабжения уделено внимание в работах Аббасова П.А., Анисимова С.М., Валова М.И., Виссарионова В.И., Безруких П.П., Бутузова В.А., Гулькова А.Н., Ильина А.К., Ковалева О.П., Коломиец Ю.Г., Кондратьева К.Я, Матвеева А.В, Митиной И.В., Тарнижевского Б.В., Тютюнникова А.И., Пивоваровой З.И., Полушкина В.И., Попеля О.С., Сиворакши В.Е., Слесаренко В.В., Стенникова В.А., Судаева Е.М., Фрида С.Е., Штым А.С., Харченко И.В., и др.

Цель исследования заключается в теоретическом и практическом обосновании комплексного использования гелиоустановок, тепловых насосов и аккумуляторов теплоты, современных средств автоматизации для совершенствования и повышения энергоэффективности существующих и проектируемых систем централизованного и локального теплоснабжения на социальных и промышленных объектах.

Задачи исследования:

- определить основные направления использования гелиоустановок при конструировании систем теплоснабжения для социальных и промышленных объектов с учетом климатических особенностей Дальневосточного региона;
- выполнить оценку современных тенденций развития систем солнечного теплоснабжения и обосновать технико-экономические преимущества использо-

вания солнечной энергии, теплоты из низкотемпературных источников и систем длительного аккумулирования тепловой энергии для ГВС и отопления;

– предложить новый подход к формированию структуры комбинированной системы теплоснабжения, сформулировать основные принципы создания комбинированных гелиоустановок для обеспечения большой заводской готовности основных узлов СВНУ, сокращения сроков монтажа и снижения капитальных затрат;

– выполнить поверочные расчеты и испытания солнечных коллекторов различного типа, и определить их показатели в режимах тепловой генерации;

– в процессе экспериментальных и теоретических исследований выполнить оптимизацию технологической схемы СВНУ, определить диапазоны основных технических характеристик, позволяющие с достаточной достоверностью переносить результаты гидравлических и тепловых расчетов гелиосистем на натурные объекты;

– апробировать автоматизированную систему управления технологическим процессом экспериментальной СВНУ при включении реверсивного теплового насоса и аккумуляторов теплоты в структуру системы теплоснабжения.

Объект исследования – комбинированные системы теплоснабжения, включающие солнечные водонагревательные установки, тепловые насосы и аккумуляторы теплоты, с автоматизированной системой управления технологическим процессом.

Предмет исследования – технологические решения в области применения СВНУ для целей теплоснабжения.

Научная новизна исследования:

1. Установлены зависимости потенциала солнечной энергии (плотности теплового потока суммарной солнечной радиации) от характера облачности и расчетного месторасположения объектов (на примере Приморского края) и угла наклона коллектора по отношению к солнцу, обеспечивающие уточнение данных актинометрических наблюдений и применяемые для расчетов систем теплоснабжения, оснащенных солнечными водонагревательными установками.

2. Разработан обобщающий показатель (комплексная энергетическая характеристика солнечного коллектора), определяемый как отношение количества тепловой энергии, фактически выработанной коллектором за день к количеству всей поступающей солнечной радиации в плоскость коллектора. Комплексная энергетическая характеристика солнечного коллектора позволяет проводить оценку эффективности применения солнечных коллекторов различных типов.

3. Разработаны математические модели элементов комбинированной системы теплоснабжения в составе СВНУ, теплового насоса и аккумуляторов теплоты, позволяющие исследовать и улучшать технологические характеристики, оптимизировать процессы управления и режимы работы оборудования гелиоустановок.

4. Предложено технологическое решение комбинированной СВНУ, включающей тепловой насос и специализированные аккумуляторы теплоты с автоматизированной системой управления для наиболее эффективного приме-

нения гелиоустановок в системах теплоснабжения социальных и промышленных объектов в Дальневосточном регионе.

Теоретическая значимость работы.

Результаты работы, в основе которой лежат разработанные методики расчета основных узлов исследуемых СВНУ и математическая модель комбинированной гелиоустановки могут быть применены для оптимизационных расчетов структуры и режимов работы солнечных систем теплоснабжения.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в разработке и апробировании современных проектных и конструкторских решений, обеспечивающих внедрение комбинированных системы теплоснабжения, при эффективном использовании СВНУ на объектах различного назначения, обосновании целевого применения теплоснабжающих установок в составе СВНУ и тепловых насосов, как базового узла систем горячего водоснабжения и отопления на реконструируемых и строящихся социальных и промышленных объектах Дальневосточного региона, реализации методов регулирования основных параметров в системах солнечного теплоснабжения, основанных на использовании компьютерного управляющего комплекса и принципов диспетчеризации, реализующие преимущества АСУ ТП.

Методология и методы исследования. В работе использовались методы исследования солнечных систем теплоснабжения, основанные на применении информационно-измерительных комплексов при проведении экспериментов, натурных наблюдениях за климатическими условиями с математической обработкой полученных данных, разработке математической модели объекта исследования, анализе проектно-конструкторских решений действующих СВНУ. В частности, в диссертационной работе использованы методы планирования эксперимента и математической статистики, применяемые для комплексной оценки взаимосвязи параметров солнечного излучения и показателей энергетической эффективности солнечных коллекторов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости потенциала солнечной энергии (плотности теплового потока суммарной солнечной радиации) от характера облачности и расчетного месторасположения объектов (на примере Приморского края) и угла наклона коллектора по отношению к солнцу, обеспечивающие уточнение данных актинометрических наблюдений и применяемые для расчетов систем теплоснабжения, оснащенных солнечными водонагревательными установками.

2. Обобщающий показатель (комплексная энергетическая характеристика) солнечных коллекторов в режимах теплосъема в различные периоды года, определение граничных условий эффективной эксплуатации солнечных коллекторов (плоского типа и с вакуумными трубами) в структуре СВНУ расчетным и опытным путем, рекомендации для обеспечения эксплуатации солнечного контура СВНУ с максимальным КПД.

3. Математические модели элементов комбинированной системы теплоснабжения в составе СВНУ, теплового насоса и аккумуляторов теплоты, позво-

ляющие повысить эффективность работы гелиоустановок в системах теплоснабжения и оптимизировать схемы комбинированной СВНУ.

4. Технологическое решение комбинированной СВНУ, включающей тепловой насос и специализированные аккумуляторы теплоты с автоматизированной системой управления, для обеспечения эффективной эксплуатации узлов солнечной системы теплоснабжения.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение, а именно: п. 1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии», а также п. 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований систем теплоснабжения, вентиляции, кондиционирования воздуха, газоснабжения, освещения, защиты от шума».

Степень достоверности и апробация результатов. Степень достоверности результатов базируется на использовании обоснованных исследований современных российских и зарубежных ученых, сопоставлении расчетных характеристик с экспериментальными и эксплуатационными данными, полученными на действующих опытно-промышленных гелиоустановках, использовании современных методов моделирования для повышения эффективности применения СВНУ, тепловых насосов и аккумуляторов теплоты в комбинированных системах теплоснабжения.

Основные теоретические положения и выводы диссертационной работы подтверждены апробацией на международных научно-практических конференциях:

- «ISES SWC2015». Южная Корея, Тэгу, 8–12 ноября 2015 г.;
- «Современные технологии и развитие политехнического образования». Россия, Владивосток, 14–18 сентября 2015 г.;
- II Международная научная конференция Евразийского научного объединения «Современные концепции научных исследований». Россия, Москва, 27–28 февраля 2015 г.;
- Второй Международный форум «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности» – REENFOR-2014. Россия, Москва, 10–11 ноября 2014 г.;
- «Grand Renewable Energy». Япония, Токио, 27 июля – 1 августа 2014 г.;
- II Международная научно-практическая конференция Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований. Россия, Москва, 10–11 октября 2013 г.

Рекомендации, представленные в работе (подготовленные совместно с сотрудниками Центра «Энергоэффективности и мониторинга энергоресурсов» ДВФУ, Лаборатории Нетрадиционной энергетики ДВО РАН, компании ООО «Энерджи-Сан»), были использованы при создании в Приморском крае СВНУ с площадью коллекторов более 400 м². Организациями представлены акты о внедрении научных результатов.

Публикации. Основные научные результаты диссертации опубликованы в 17 научных работах, объемом 6 п.л., лично автором – 3 п.л., в том числе 8 в рецензируемых изданиях из перечня, размещенного на официальном сайте ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, выводов, списка литературы из 170 наименований, изложена на 156 страницах машинописного текста, включает 19 таблиц и 64 иллюстрации (без учета приложений). Имеется 16 приложений на 45 страницах.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель исследований, выделены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дана характеристика структуры диссертации.

В первой главе рассмотрены особенности использования солнечных водонагревательных установок в системах теплоснабжения, выполнена интегральная оценка ресурсов солнечной энергии в Дальневосточном регионе, проанализированы основные принципы создания комбинированных систем солнечного теплоснабжения.

Во второй главе представлены результаты испытаний солнечных коллекторов в климатических условиях Дальневосточного региона, методика определения характеристик вакуумных коллекторов, дана оценка эффективности эксплуатации вакуумных коллекторов в структуре экспериментальной гелиоустановки.

В третьей главе приведены технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности работы солнечных водонагревательных установок в системах теплоснабжения, обоснованные экспериментальными данными и расчетами по математической модели комбинированной солнечной водонагревательной установки.

В четвертой главе рассмотрены особенности применения тепловых насосов и аккумуляторов теплоты в схеме СВНУ и принципы автоматизации гелиоустановок, выполнена оценка технико-экономических показателей солнечной системы теплоснабжения.

В заключении изложены основные итоги выполненного исследования, сделаны предложения о возможных направлениях продолжения исследования.

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Зависимости потенциала солнечной энергии (плотности теплового потока суммарной солнечной радиации) от характера облачности и расчетного месторасположения объектов (на примере Приморского края) и угла наклона коллектора по отношению к солнцу, обеспечивающие уточнение данных актинометрических наблюдений и применяемые для расчетов систем теплоснабжения, оснащенных солнечными водонагревательными установками.

Географическое расположение объекта является одним из основных технологических условий эффективного применения солнечных систем, при этом

ключевую роль играет определение энергетического потенциала солнечного излучения с помощью наиболее точного метода расчета.

По поступлению солнечной энергии на поверхность земли Приморский край занимает одно из первых мест в России. В большинстве районов наблюдается около 310 солнечных дней в году, при этом суммарная продолжительность солнечного сияния превышает 2000 часов (таблица 1).

Таблица 1 – Сравнение продолжительности солнечного сияния по отдельным пунктам Приморского края с другими регионами

Приморский край		Другие регионы	
Город	Количество часов	Город	Количество часов
Владивосток	2138	Москва	1597
Сад-Город	2296	Харьков	1748
Новосельское	2398	Севастополь	2342
Пограничный	2511	Сочи	1958
Находка	2398	Томск	1958
Дальнереченск	2384	Новосибирск	2083
Кировский	2415	Хабаровск	2425
Посьет	2224	Барнаул	2025

Выполненный нами анализ известных зависимостей и сравнение расчетных данных с данными актинометрических наблюдений показал, что степень точности определения суммарной радиации Q_C , Дж/(м²·день) зависит от учета характера облачности для расчетного места расположения объекта.

В этих случаях рекомендовано применять зависимость для расчета Q_C , учитывающую облачность:

$$Q_C = Q_{\text{Я}} \cdot [1 - (a + b \cdot \bar{n}) \cdot \bar{n}], \quad (1)$$

где a и b – постоянные (a – зависит от широты места, $b = 0,38$); \bar{n} – среднее месячное количество облачных дней. Поэтому для расчетов показателя Q_C необходимо знать среднюю за месяц суммарную радиацию на горизонтальную поверхность в ясный день $Q_{\text{Я}}$, что требует знания данных актинометрических станций. Прямые измерения потока солнечной радиации на Дальнем Востоке ведутся на ограниченном числе метеостанций (актинометрические станции): в Приморском крае – 4 из 37, в Хабаровском крае – 5 из 23, в Амурской области – 4 из 21, в Еврейской автономной области – 1 из 4.

В результате обработки климатической информации за последние десять лет нами предложена зависимость для расчета среднемесячных количеств суммарной радиации на горизонтальную поверхность, которая учитывает климатические характеристики региона и дает точность, необходимую для инженерных расчетов:

$$Q_C = Q_o \cdot \left(0,33 \cdot \frac{\bar{n}}{\bar{n} + n_n} + 0,57 \cdot \frac{N}{N_e} \right), \quad (2)$$

где N -дней – наблюдавшаяся за месяц продолжительность солнечного сияния; N_e -дней – возможная (максимальная) продолжительность солнечного сияния, n_n

– среднемесячное количество дней нижней (минимальной) облачности; Q_o – плотность внеатмосферной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, усредненная за рассматриваемый период времени в МДж/м², рассчитывается по зависимости:

$$Q_o = \frac{24}{\pi} I_{SC} \left\{ \left[1 + 0,33 \cos \left(\frac{360 \cdot k}{365} \right) \right] \cdot \left[\cos \varphi \cdot \cos \sigma \cdot \sin \omega_s + \left(\frac{2\pi \cdot \omega_s}{365} \right) \cdot \sin \varphi \cdot \sin \sigma \right] \right\}, \quad (3)$$

где I_{SC} – солнечная постоянная; k – день года; ω_s – часовой угол восхода солнца; φ – широта местности; $I_{SC} = 1,353$ кВт/м² (4,871 МДж/м²·ч); $\cos \omega_s = -\operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \sigma$; $\sigma = 23,45 \sin [360 \cdot (284 + k/365)]$, град.

Для проверки применимости предложенной зависимости автором были определены значения Q_c для актинометрических станций в Приморском крае, в Хабаровском крае и Амурской области.

Оценка погрешности вычислений показала, что значения Q_c , полученные по предлагаемым зависимостям, более точны, чем рассчитанные по известным формулам. Поэтому выражения (2, 3) рекомендованы для расчета месячных значений суммарной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность.

Кроме того, зависимость (3) позволяет при необходимости учитывать важное технологическое условие применения гелиоустановок – оптимальный угол наклона коллектора по отношению к солнцу.

Выполненный нами анализ графиков месячной интенсивности солнечного излучения (рисунок 1) показал, что в холодное время года поступление солнечной энергии в г. Владивостоке значительно выше, чем в большинстве городов Юго-Запада РФ. Точный расчет количества солнечного излучения по сезону является важным технологическим условием эффективного применения СВНУ с точки зрения оптимизации режимов ее работы.

На основе изложенной методики совместно со специалистами Лаборатории нетрадиционной энергетики ДВО РАН разработана и в настоящее время широко используется карта поступления солнечной энергии на территорию Приморского края (рисунок 2).

При проведении исследований, установлено, что на территории Приморского края отчетливо прослеживаются участки со значительным поступлением солнечной энергии более 1400 кВт·ч/(м²·год) и минимальным 1100...1200 кВт·ч/(м²·год).

С целью определения наиболее эффективных режимов работы комбинированных гелиоустановок, включающих СВНУ, тепловой насос и аккумуляторы теплоты, автором исследованы показатели солнечной системы теплоснабжения автономного объекта, расположенного на территории Уссурийской астрофизической обсерватории ДВО РАН.

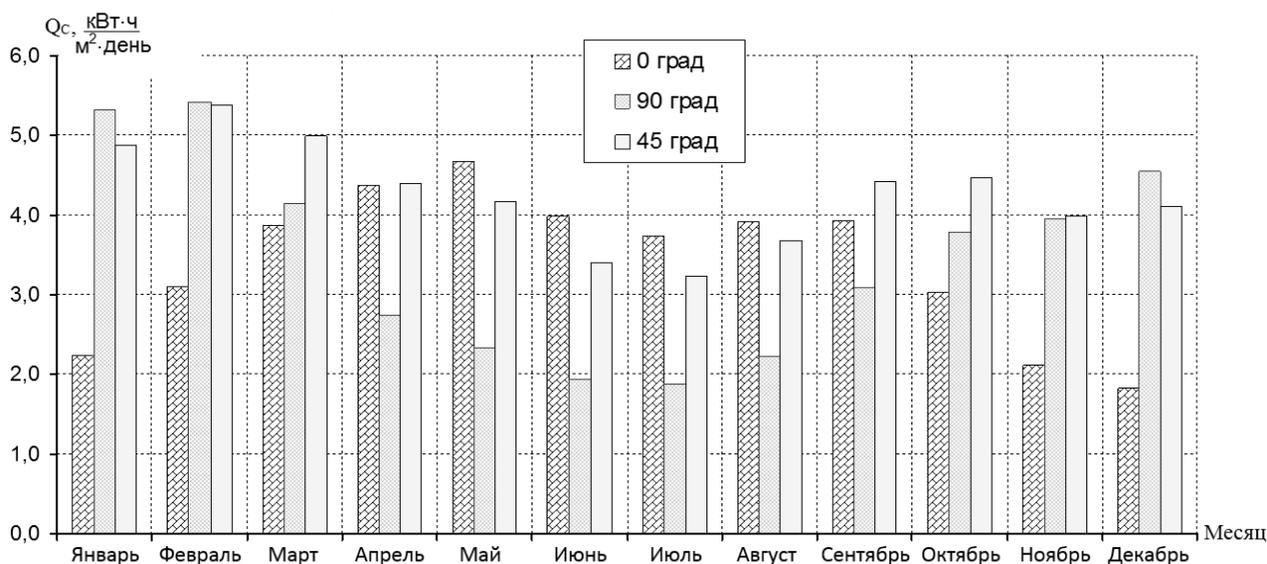


Рисунок 1 – Расчетная зависимость поступления солнечной энергии в плоскость солнечных коллекторов от угла наклона к горизонту при средних условиях облачности (г. Владивосток, ориентация на юг)

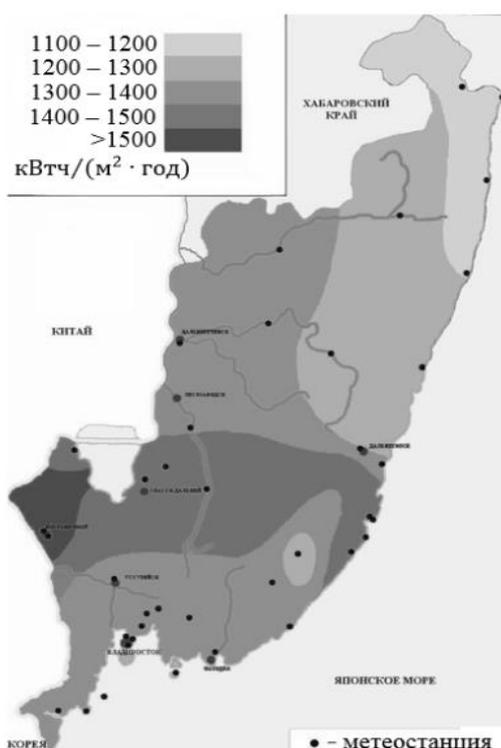


Рисунок 2 – Среднегодовое поступление солнечной энергии на территории Приморского края

Выполненными исследованиями было подтверждено, что применение тепловых насосов совместно с СВНУ в системах длительного аккумулирования тепловой энергии является наиболее перспективным направлением использования нетрадиционных теплоэнергетических установок. В соответствии с расчетами и опытными данными среднегодовая эффективность солнечных коллекторов комбинированной СВНУ достигает 40–50 % от потребной тепловой нагрузки, а коэффициент преобразования теплового насоса равен 3,0...3,5.

Доля теплоты \bar{Q} , полученной от комбинированной СВНУ при теплоснабжении объекта, расположенного на территории Уссурийской обсерватории приведена на рисунке 3.

Экспериментальные данные подтверждают, что такие установки вырабатывают от 0,9 кВт·ч/м² тепловой энергии в холодное время года, и до 1,85 кВт·ч/м² в летний период года в условиях Приморского края. При этом разность температур теплоносителя в коллекторе и окружающего воздуха напрямую влияет на производительность системы. По данным проведенных экспериментов максимальная удельная выработка тепловой энергии коллекторами составляла до 2,8 кВт·ч/м².

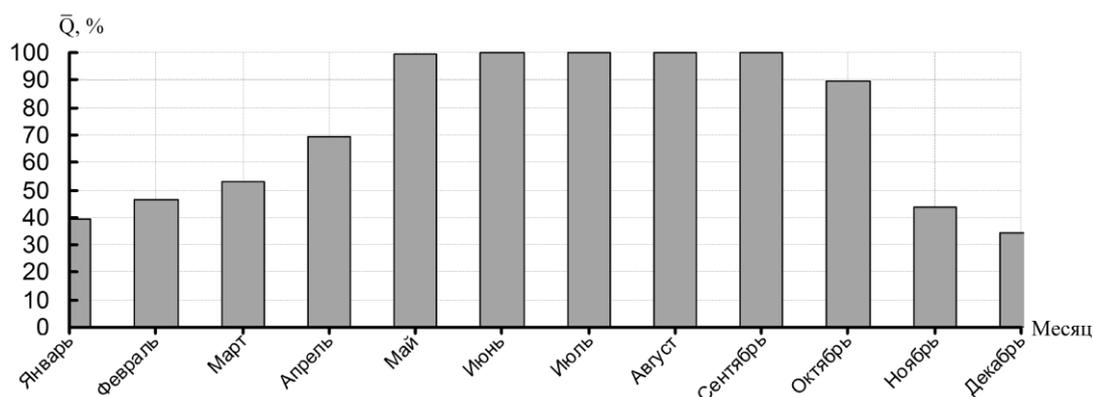


Рисунок 3 – Доля солнечной энергии в теплоснабжении зданий Уссурийской обсерватории

Таким образом, исследования, выполненные на локальной экспериментальной системе теплоснабжения, включающей СВНУ, тепловой насос и грунтовые аккумуляторы теплоты, позволили в дальнейшем разработать новую конфигурацию СВНУ всепогодного исполнения, рекомендованную для промышленных и социальных объектов Приморского края.

2. Обобщающий показатель (комплексная энергетическая характеристика) солнечных коллекторов в режимах теплосъема в различные периоды года, определение граничных условий эффективной эксплуатации солнечных коллекторов (плоского типа и с вакуумными трубами) в структуре СВНУ расчетным и опытным путем, рекомендации для обеспечения эксплуатации солнечного контура СВНУ с максимальным КПД.

Для исследования рабочих параметров солнечных коллекторов плоского типа и коллекторов с вакуумными трубами автором были проведены долговременные испытания на специализированном стенде в г. Владивостоке.

По итогам исследования, было выявлено, что более эффективная работа вакуумных коллекторов происходит за счет более длительного периода генерации, а также за счет восприятия рассеянного излучения. Также, данный тип коллекторов обладает лучшей тепловой изоляцией по сравнению с плоским типом коллекторов, что обусловлено особенностями их конструкции. Процесс самоочищения от снега более длителен для коллекторов вакуумного типа, однако данному типу коллекторов характерны более высокие среднемесячные показатели по выработке тепловой энергии (рисунок 4). На основе имеющихся данных по стендовым испытаниям, дальнейшее исследование рабочих параметров проводилось для коллекторов вакуумного типа, как для наиболее часто используемых на объектах Дальневосточного региона.

Для сравнения расчетных и экспериментальных данных в качестве определяющего показателя нами предложена комплексная энергетическая характеристика солнечного коллектора \mathcal{E} , %. Она находится как отношение количества тепловой энергии, фактически выработанной коллектором за день $Q_{СК}$, к количеству всей поступающей солнечной радиации в плоскость коллектора Q_C , кВт·ч/(м²·день):

$$\mathcal{E} = (Q_{СК}/Q_C) \cdot 100, \% \quad (4)$$

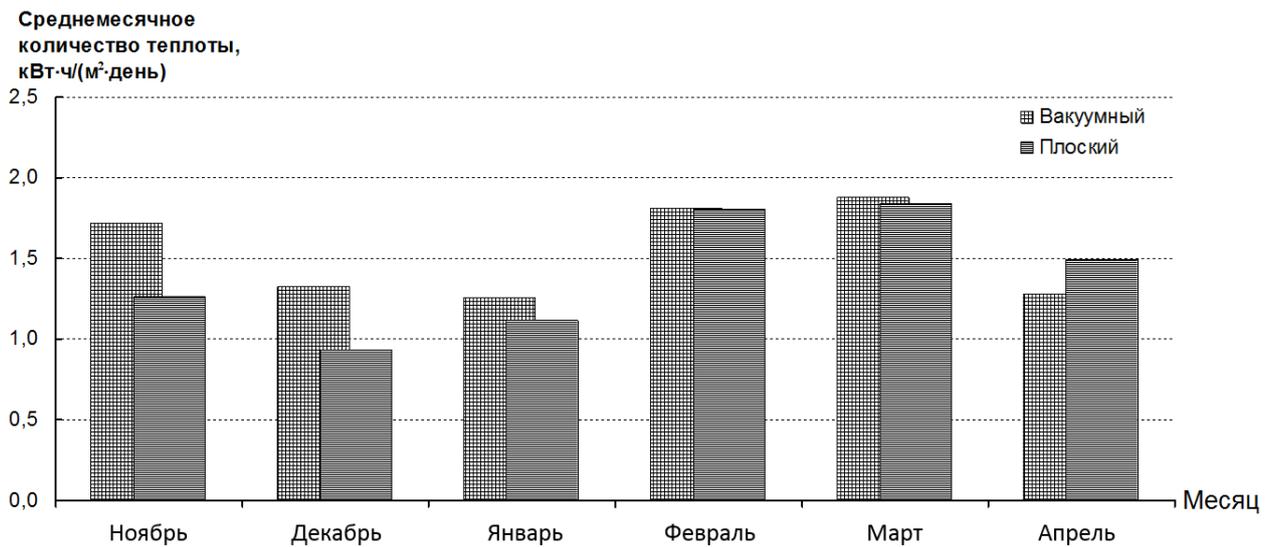


Рисунок 4 – Среднемесячное количество теплоты, выработанное коллекторами на опытном стенде в период с ноября 2012 по апрель 2013 гг.

В наших исследованиях оценивалось влияние на величину \mathcal{E} таких основных параметров, как температуры теплоносителя в коллекторе и окружающей среды, плотности потока солнечного излучения, угла наклона коллектора и др. Энергетическая характеристика вакуумного солнечного коллектора, полученная в результате испытаний, представлена на рисунке 5. Приведена зависимость \mathcal{E} от соотношения $(T_K - T_B)/Q_C$, где T_K – средняя температура теплоносителя в коллекторе, °С, T_B – температура окружающего воздуха, °С. В дальнейших расчетах коллекторов энергетическая характеристика после аппроксимации использовалась в виде полинома или линейной функции.

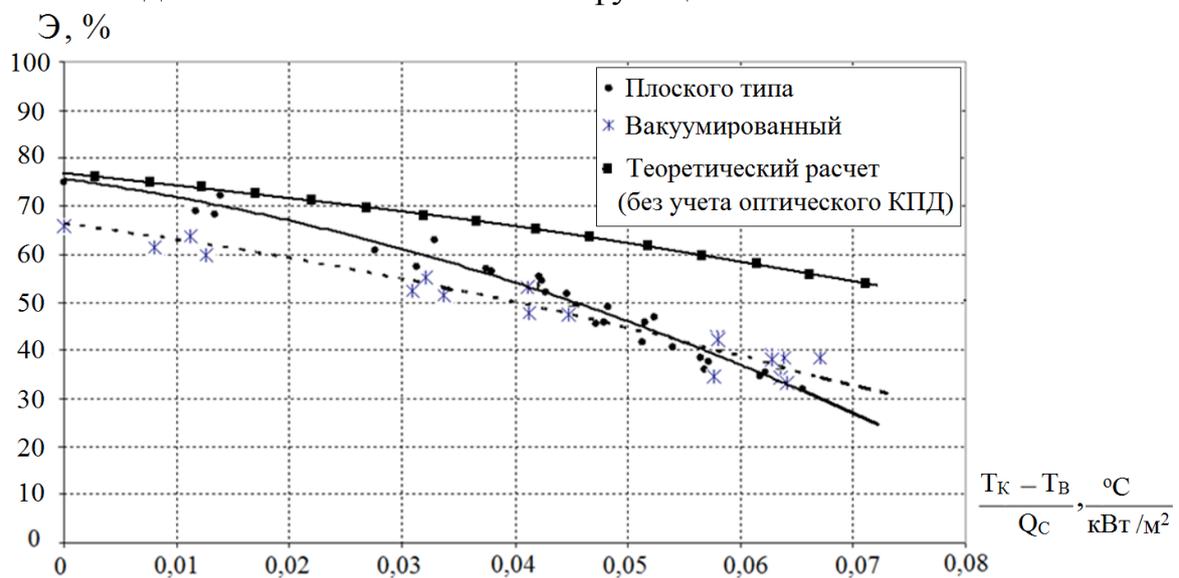


Рисунок 5 – Результаты экспериментов по определению энергетической характеристики солнечных коллекторов

С помощью измеренных на стенде параметров солнечного коллектора, и последующей аппроксимации функции \mathcal{E} , были определены более точные значения оптического КПД, $\eta_{opt} = 87,5 \%$ и суммарных потерь $U_k = k_1 + k_2 = 2,767 \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2}$, где $k_1 = 1,838 \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2}$ – коэффициент потерь тепловой энергии с

поверхности коллектора, зависящей от конвективного теплообмена, $k_2 = 0,929 \frac{\text{Вт}}{^\circ\text{C} \cdot \text{м}^2}$ – коэффициент потерь, зависящей от отраженного радиационного излучения.

При проведении исследований нами определены значения оптимального угла наклона солнечных коллекторов (в разные периоды года) при их различном расположении на крыше здания (таблица 2).

Таблица 2 – Количество солнечной энергии, поступившей на поверхность коллекторов, расположенных под различными углами наклона к горизонту (г. Владивосток, 2013 г.)

Период	Плотность солнечного излучения, итого $\text{кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^2$ при заданных углах наклона коллекторов		
	0°	45°	90°
Год	1240	1552	1255
Май – октябрь	713	717	468
Ноябрь – май	527	835	787

Согласно результатам выполненных исследований, в Приморском крае, для достижения максимально эффективного статично расположенного коллектора, оптимальным является угол наклона $42...47^\circ$, при азимуте 15° к западу от южного направления. Изменение основных параметров солнечного коллектора при измерениях на экспериментальном стенде в зимний период приведен на рисунке 6. На основе полученных результатов, нами были подготовлены рекомендации по размещению, монтажу и эксплуатации солнечных вакуумных коллекторов.

Экспериментами подтверждено, что солнечные коллекторы с вакуумными трубами лучше удовлетворяют температурным требованиям к теплоносителю ($50-95^\circ\text{C}$) в процессе эксплуатации СВНУ. Однако, перегрев выше указанного предела приводит к снижению эффективности всей системы. Поэтому в структуре СВНУ предложено использовать ТН и производить отбор части тепловой энергии от бака-аккумулятора для снижения температуры в первом контуре.

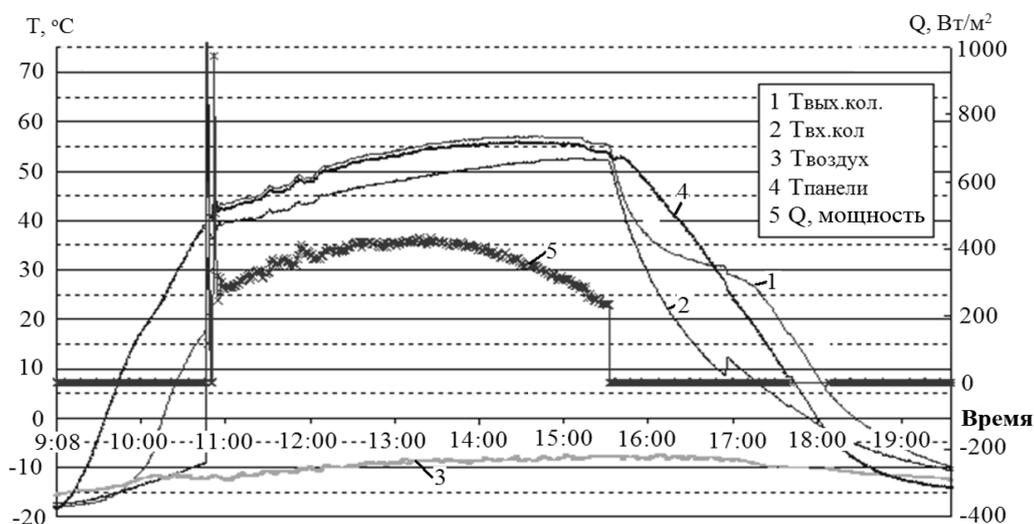


Рисунок 6 – График характерного режима работы солнечного коллектора

Использование опытных данных испытательного стенда, измеряющего энергию падающего солнечного излучения Q_c , позволило с высокой точностью определить показатели солнечных коллекторов, повысить достоверность результатов модельных расчетов и получить функциональные зависимости, необходимые для настройки контуров регулирования при модернизации опытной СВНУ.

Для оценки эффективности солнечного водонагревателя с солнечным коллектором вакуумного типа в зависимости от места установки и времени года автором производился теплоэнергетический расчет. Осредненная за месяц сумма солнечной радиации в течение дня $q_{СК}$ определялась при наиболее выгодном угле установки коллектора.

Для расчета среднего значения теплоты, получаемого коллектором в течение одного дня и используемого для нагрева теплоносителя, применялась зависимость: $Q_{СД} = q_{СК} \cdot F_{СК} \cdot \eta_{СК}$, где $F_{СК}$ – площадь абсорбера солнечного коллектора, m^2 ; $\eta_{СК}$ – КПД коллектора, определяемый с учетом экспериментальных данных (рисунок 5). При этом $\eta_{СК} = \mathcal{E} \cdot \eta_{СКП}$, где $\eta_{СКП}$ – паспортное значение КПД коллектора. Тогда расчетный объем воды, V_B , m^3 , нагреваемый солнечным коллектором за день до требуемой температуры T_1 равен $V_B = Q_{СД} / 0,0011 T_1$.

Аналогично, рассчитывалась температура нагрева воды в баке-аккумуляторе СВНУ. Используя полученные экспериментальные данные, определялось количество солнечных коллекторов, необходимых для СВНУ с заданным объемом теплового аккумулятора: $N_K = V_B C_B (T_1 - T_0) / Q_{СД}$, где V_B – объем бака аккумулятора, m^3 ; T_0 , $^{\circ}C$ – начальная температура нагрева воды в системе ГВС; C_B , $\frac{kJ}{kg \cdot ^{\circ}C}$ – удельная теплоемкость воды.

Расчетная выработка теплоты солнечным коллектором определяется как $Q_{СК} = Q_c \eta_{СКП}$. При этом тепловая эффективность (КПД) солнечного коллектора равна:

$$\eta_{СКП} = \eta_{ОПТ} - k_{1П} \frac{T_K - T_B}{Q_c} - k_{2П} \frac{(T_K - T_B)^2}{Q_c}, \quad (5)$$

где $\eta_{ОПТ}$, $k_{1П}$, $k_{2П}$ – оптический КПД и коэффициенты потерь солнечного коллектора соответственно (приводятся в паспорте и корректируются после проведения испытаний коллектора на стенде); T_B – температура окружающей среды, $^{\circ}C$; T_K – средняя температура теплоносителя внутри коллектора (ориентировочно может быть найдена по формуле для плоских и проточных трубчатых коллекторов: $T_K = \frac{T_{вх} - T_{вых}}{2}$; для вакуумных коллекторов: $T_K = T_{вых}$); $T_{вх}$ и $T_{вых}$ – температура среды на входе и выходе коллектора, $^{\circ}C$.

По разработанной методике автором произведен расчет энергетической эффективности работы вакуумного солнечного коллектора ES 58-1800-30R (теоретическая кривая на рисунке 5).

При высокой солнечной активности в январе в г. Владивостоке (широта 43,1) при угле установки 50° месячная выработка теплоты у солнечных коллекторов составляла 150–170 кВт·ч/ m^2 . При известной рабочей площади абсорбера

типового вакуумного коллектора ES 58/1800-30R $F_{ск} = 2,411 \text{ м}^2$ среднее дневное тепловосприятие $Q_{сд} = 10 - 11 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Экспериментальная часть исследований по определению характеристик секций солнечных коллекторов в эксплуатационных условиях проводилась нами на опытной СВНУ средней мощности. Установка оснащена контрольно-измерительными приборами для дистанционного снятия характеристик системы теплоснабжения. Основные технические характеристики опытной СВНУ: мощность установки – 70 кВт; площадь солнечных коллекторов – 150 м²; тип солнечных коллекторов – вакуумные с тепловыми трубами; объем баков теплового аккумулятора – 10,5 м³. Общий вид поля солнечных коллекторов СВНУ представлен на рисунке 7.



Рисунок 7 – Размещение и обвязка солнечных коллекторов СВНУ на крыше здания кампуса ДВФУ

Определены границы снижения эффективности (интегрального КПД) солнечных коллекторов в зимний период из-за повышенных тепловых потерь в окружающую среду.

На основе опытных данных определены средние значения тепловой производительности СВНУ по месяцам в виде расхода горячей воды за трехлетний период (таблица 3).

Таблица 3 – Отпуск горячей воды в систему ГВС при $T = 55 \text{ }^\circ\text{C}$

Производительность СВНУ по месяцам т/месяц												Годовая выработка горячей воды, т
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
186	168	186	225	232,5	210	217	232,5	225	186	180	186	2434

3. Математические модели элементов комбинированной системы теплоснабжения в составе СВНУ, теплового насоса и аккумуляторов теплоты, позволяющие повысить эффективность работы гелиоустановок в системах теплоснабжения и оптимизировать схемы комбинированной СВНУ.

В результате выполненного анализа предложено три способа усовершенствования схемы СВНУ: а) увеличить объем бака-аккумулятора; б) повысить

количество смонтированных коллекторов; в) подключить тепловой насос для отбора тепловой энергии у вспомогательного источника с низкой температурой и подачи дополнительной теплоты в бак-аккумулятор при пиковых нагрузках на ГВС. Основной вариант для реконструкции теплоснабжающего комплекса предложен на схеме СВНУ с ТН (рисунок 8).

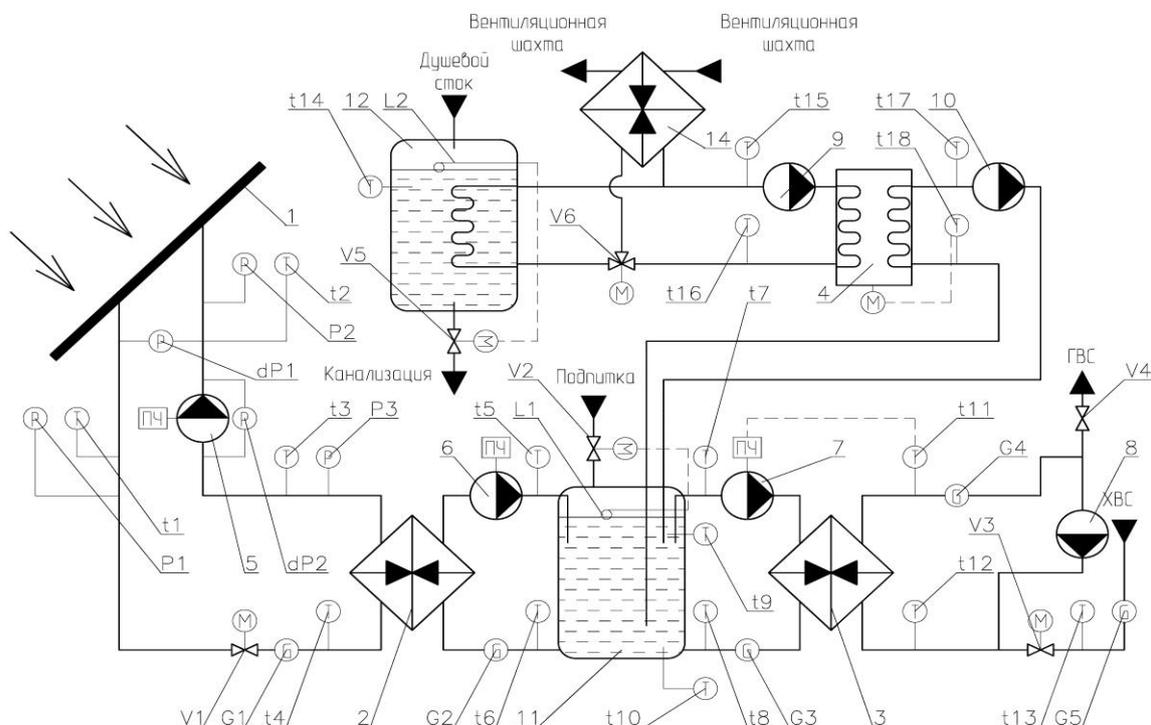


Рисунок 8 – Схема комбинированной системы теплоснабжения в составе СВНУ, теплового насоса и аккумуляторов теплоты:

1 – солнечный коллектор; 2,3,14 – теплообменники; 4 – тепловой насос, 5 – 10 циркуляционные насосы; 11 – бак-аккумулятор; 12 – бак сточных вод; G, L, P, t – датчики расхода, уровня, давления, температуры; V – регулирующие клапаны

В качестве источника тепловой энергии для ТН предложено использовать сточные воды системы ГВС объекта и теплоту вентиляционных выбросов. Для перераспределения тепловой нагрузки между СВНУ и тепловым насосом рекомендовано включить в схему установки буферный аккумулятор теплоты.

Рабочий вариант схемы СВНУ с тепловым насосом для внедрения на проектируемых объектах установлен нами при помощи моделирования рабочих процессов и определения режимов работы систем автоматики.

Моделирование процессов в солнечном коллекторе. В течение светового дня, и в зависимости от времени года, солнечный коллектор имеет различное тепловосприятие $Q_{СК}$. В расчетах изменение $Q_{СК} = f(\tau)$ задается интегральной функцией, характерной для определенной географической позиции, и с учетом параметров расположения солнечного коллектора. Уравнение теплового баланса солнечного коллектора выглядит следующим образом:

$$Q_{СК} + M_C \cdot C_B \cdot (t_{c_1} - t_{c_2}) = m_{БК} \cdot C_B \frac{dt_{c_2}}{d\tau},$$

где $m_{БК}$ – масса теплоносителя в контуре СВНУ.

Моделирование процессов в теплообменном аппарате. Пренебрегая тепловыми потерями с поверхности теплообменного аппарата, изменение температуры теплоносителя можно описать с помощью уравнений:

$$M_A \cdot C_B \cdot (t_{A_1} - t_{A_2}) - Q_T = m_{BK} \cdot C_B \frac{dt_{A_2}}{d\tau}; \quad M_B \cdot C_B \cdot (t_{B_1} - t_{B_2}) + Q_T = m_{BK} \cdot C_B \frac{dt_{B_2}}{d\tau},$$

где Q_T – теплота, передаваемая второму (нагреваемому) контуру.

Моделирование процессов в баке-аккумуляторе теплоты. Бак моделируется как объект, состоящий из двух или более емкостей, обменивающихся тепловой энергией через условные ступенчатые перегородки мембранного типа. Тогда для верхней и нижней части бака, уравнения теплового баланса имеют вид:

$$M_T t_{T1} + M_H t_{H2} C_B - M_T t_{T1} C_B - Q_B = m_{BT} C_B \frac{dt_{BT}}{d\tau}; \quad M_T t_{T2} C_B - M_T t_{T2} C_B - M_H t_{H1} C_B + Q_B = m_{BT} C_B \frac{dt_{BT}}{d\tau}.$$

Перенос теплоты внутри объема воды $Q_B = V_{GX} K_{GX} (t_{BT} - t_{BT})$, где V_{GX} – объем бака; K_{GX} – коэффициент теплопереноса (зависит от градиента температур и геометрических характеристик бака-аккумулятора).

Моделирование процессов в тепловом насосе. Тепловой насос представлен как две секции проточного теплообменника, разделенные стенкой с внутренним промежуточным охлаждением и одновременным нагревом. Теплота, передаваемая от холодной секции Q_X , Дж/с, и теплота, передаваемая к нагреваемой среде Q_T , Дж/с, связаны с мощностью, передаваемой на привод компрессора P_{TH} , Вт, теплового насоса уравнением $Q_T = Q_X + P_{TH}$. Уравнение теплового баланса для потоков теплоты в тепловом насосе имеет вид:

$$M_X C_B (t_{X2} - t_{X1}) - Q_X = m_{TX} C_B \frac{dt_{X1}}{d\tau}; \quad Q_T - M_H C_B (t_{H2} - t_{H1}) = m_{TH} C_B \frac{dt_{H2}}{d\tau}.$$

Мощность, передаваемая на привод компрессора теплового насоса, является величиной регулируемой. Коэффициент трансформации теплового насоса варьируется при изменении температур в конденсаторе и испарителе.

Моделирование системы автоматического регулирования СВНУ. Управляющие воздействия, влияющие на режим работы СВНУ включают: регулирование расхода теплоносителя в контуре солнечного коллектора; регулирование мощности теплового насоса; регулирование расхода холодной воды; регулирование уровня в баке-накопителе сточных вод. Данные воздействия учитывались при оптимизации работы комбинированной СВНУ на основе модельных расчетов, и были включены в базовые уравнения узлов в виде коэффициентов.

Для решения системы дифференциальных уравнений модели СВНУ использовался метод Рунге-Кутты, с применением ПО «Mat Lab». По расчетным кривым (рисунок 9) определена передаточная функция объекта регулирования в составе солнечных коллекторов, теплообменников и бака теплового аккумулятора, общий вид которой может быть представлен:

$$W(p) = \frac{K \cdot e^{-zP}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \quad (6)$$

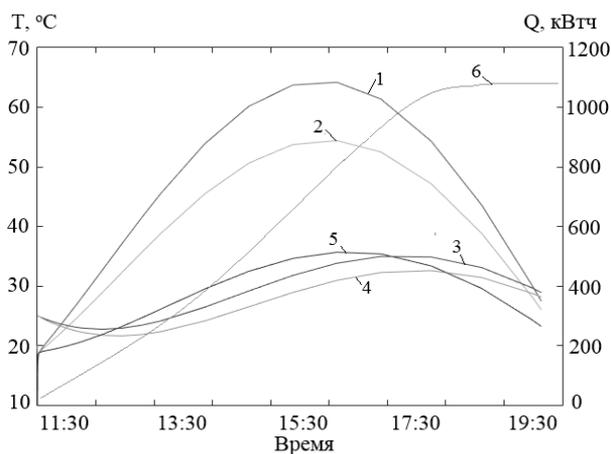


Рисунок 9 – Переходные функции изменения температуры в узлах СВНУ (расчет по модели):
 1 – за коллектором; 2 – за теплообменником первого контура; 3 – средняя в баке-аккумуляторе; 4 – на входе в коллектор; 5 – за теплообменником ГВС;
 6 – суммарная выработка теплоты

Передаточная функция в численной форме:

$$W(p) = \frac{1,2 \cdot e^{-0,5 \cdot p}}{(12p + 1)(5,7p + 1)} \quad (7)$$

В приведенных зависимостях (6, 7) T_1 и T_2 – постоянные времени теплообменника солнечного коллектора и бака теплового аккумулятора в верхней зоне нагрева (в минутах), z – постоянная запаздывания, $K = T_\infty/g_\infty$ – статический коэффициент преобразования, где T_∞ и g_∞ – относительные асимптотные значения температуры и величины сообщенного системе возмущения (по расходу теплоносителя в первом контуре).

Модельные расчеты были проверены и подтверждены данными натурных испытаний опытной системы. На рисунке 10 представлен образец дневных графиков изменения основных параметров СВНУ, полученных при обработке компьютерной базы данных контроллера гелиосистем «Delta Sol M», цифровых теплосчетчиков «Combimeter II», и пиранометра.

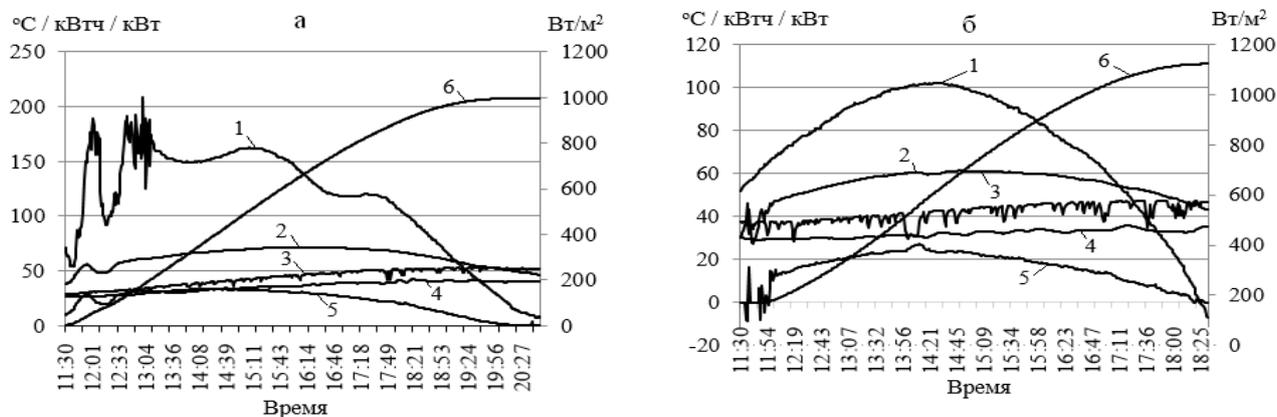


Рисунок 10 – Графики изменения рабочих параметров СВНУ:

а – в летний период с наличием облачности (05.07.2012); б – в зимний период (17.01.2013).
 По правой оси: 1- плотность прямого солнечного излучения, Вт/м²; по левой оси: 2, 3, 4 – температура в разных точках установки, °С; 5 – тепловая мощность, кВт; 6 – суммарная выработка теплоты, кВт·ч

Разработанная методика использовалась нами для настройки параметров пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов в автоматизированной системе управления технологическим процессом (АСУ ТП) опытной СВНУ.

4. Технологическое решение комбинированной СВНУ, включающей тепловой насос и специализированные аккумуляторы теплоты с автоматизированной системой управления, для обеспечения эффективной эксплуатации узлов солнечной системы теплоснабжения.

Использование схем СВНУ с тепловым насосом (рисунок 8) является оптимальным решением для круглогодично эксплуатируемых систем солнечного теплоснабжения. Для различных температур источника тепловой энергии, при длительности отопительного периода 5000 – 5600 часов в регионах России, среднегодовое значение коэффициента трансформации ТН может составлять:

<i>температура источника, °С</i>	5	10	15	20	25	30	35	40
<i>среднегодовой коэффициент трансформации</i> ...	3,6	4,1	4,6	5,3	5,9	6,6	7,2	7,9.

В исследуемых гелиоустановках обоснована возможность применения совместно с ТН способа аккумулирования солнечной энергии на основе процесса фазового перехода различных материалов. Для повышения эффективности работы СВНУ рекомендовано использовать теплоаккумулирующие материалы (ТАМ) с высокой теплоемкостью или теплотой фазового перехода в периоды максимальной тепловой генерации солнечных коллекторов.

Уравнение аккумулирования энергии в гелиосистемах с аккумуляторами теплоты в дифференциальной форме представляется в виде:

$$h_{BX} dm_{BX} - h_{БВЛX} dm_{БВЛX} + dQ_{AK} = d(W_{AK} m_{AK}) + P_{AK} dV_{AK}. \quad (8)$$

После интегрирования приведенного выше уравнения с учетом известных граничных условий, количество аккумулированной теплоты при отсутствии фазовых переходов ТАМ определялось по зависимости: $Q_{AK} = m_{AK} \cdot C_p (T_1 - T_2) \cdot \eta_{AK}$, где m_{AK} – масса ТАМ, кг, C_p – удельная теплоемкость ТАМ, T_1, T_2 – температуры ТАМ до и после накопления тепловой энергии тепловым аккумулятором, η_{AK} – коэффициент тепловых потерь. С учетом теплоты фазового перехода Δh_{ϕ} , значительно превышающей повышение внутренней энергии за счет простого нагрева среды, аккумулирование теплоты возрастает: $Q^*_{AK} = m_{AK} \cdot [C_p (T_1 - T_2) + \Delta h_{\phi}] \cdot \eta_{AK}$.

Количество ТАМ в тепловом аккумуляторе СВНУ определялось при известной удельной тепловой выработке солнечных коллекторов q_c и теплового насоса q_{TH} , тогда $q_c + q_{TH} = C_p (T_1 - T_2) + \Delta h_{\phi}$ и $m_{AK} = Q_{AK} / (q_c + q_{TH})$, при этом m_{AK} рассчитывалась как удельная величина (на 1 м² солнечного коллектора или 1 кВт мощности теплового насоса).

В предложенной конструкции теплового аккумулятора с ТАМ совмещены преимущества многокорпусных жидкостных аккумуляторов и аккумуляторов с фазовым переходом. В качестве рабочего тела в аккумуляторе фазового перехода использовался хлорид кальция CaCl₂·6H₂O. Аккумулятор теплоты включал бак с тремя рабочими секциями, к которым были подключены: батарея солнечных коллекторов, тепловой насос, электродвигатель и теплообменник системы ГВС. В процессе работы СВНУ при изменениях температуры каждая секция могла подключаться к разным источникам теплоты и к системе ГВС здания.

Исследования, проведенные на опытной СВНУ с трехкорпусным тепловым аккумулятором показали, что солнечные коллекторы, работающие при средней температуре 42 °С, воспринимают в 2 раза больше энергии в течение отопительного сезона, чем коллектор со средней температурой 60 °С. Применение многосекционных аккумуляторов позволяет понизить среднюю температуру теплоносителя, подаваемого в контур солнечных коллекторов, что гарантирует значительный рост тепловосприятости и увеличение КПД всей системы солнечного теплоснабжения.

Увязка двух и более источников теплоты (СВНУ, теплового насоса, электробойлер) и тепловых аккумуляторов в общей энергетический комплекс, значительно усложняет совместную работу узлов системы теплоснабжения. Поэтому управление работой СВНУ осуществлялось при помощи АСУ ТП. Рабочие параметры системы установки отслеживались в режиме реального времени.

В процессе внедрения АСУ ТП на опытной СВНУ проведены эксперименты по использованию частотного регулирования насосов в контурах СВНУ. Анализ полученной в экспериментах регулировочной характеристики подтверждает возможность регулирования производительности насосов в пределах частоты питающего тока 20–55 Гц.

При помощи разработанной АСУ ТП исследовалась работа опытной СВНУ в режиме диспетчерского контроля параметров. Автоматизация установки позволила повысить общий КПД системы теплоснабжения на 25–30 % за счет рационального распределения тепловой нагрузки между подключенными к тепловой сети здания источниками теплоты и оптимизировать работу аккумуляторов теплоты.

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам работы над диссертацией получены следующие результаты:

1. Усовершенствована и апробирована методика расчета интенсивности солнечного излучения с учетом климатических характеристик Дальневосточного региона, использованная для оценки эффективности установок солнечного теплоснабжения.

2. Обоснованы принципы создания комбинированных систем теплоснабжения, позволившие разработать и реализовать проекты гелиоустановок как для систем ГВС, так и для частичного покрытия отопительной нагрузки.

3. Разработана методика определения характеристик солнечных коллекторов вакуумного типа, позволяющая с высокой достоверностью производить расчеты основных параметров первого контура СВНУ с учетом климатических и технологических факторов, влияющих на эксплуатацию гелиосистем.

4. На основе произведенных расчетов и стендовых испытаний выполнено сравнение теплоэнергетических показателей солнечных коллекторов в режимах теплосъема в различные периоды года, определены граничные условия эффективной эксплуатации солнечных коллекторов (плоского типа и с вакуумными трубами) в структуре СВНУ, подготовлены рекомендации для обеспечения работы солнечного контура СВНУ с максимальным КПД.

5. Разработана и применена для оптимизационных расчетов математическая модель комбинированной СВНУ, позволяющая учесть влияние суточного и сезонного изменения тепловой нагрузки у потребителя на работу гелиоустановки.

6. Испытана схема теплогенерирующего комплекса в составе СВНУ, компрессионного теплового насоса и тепловых аккумуляторов, задействованных в процессах выравнивания суточного графика потребления теплоты в системе теплоснабжения, позволяющая регенерировать тепловую энергию, потребляемую в системе теплоснабжения.

7. В результате технико-экономической оценки эксплуатационных показателей систем теплоснабжения различных социальных и промышленных объектов, установлено, что ежегодные затраты на ГВС от СВНУ с тепловым насосом в 2–2,5 раза ниже чем в системах теплоснабжения с котельными установками на различных видах топлива и электрокотлами.

Выполненные исследования подтвердили, что использование комбинированных СВНУ при реконструкции систем теплоснабжения на ряде социально значимых муниципальных объектов (больницах, школах, интернатах и т. п.) позволяет обеспечить их стабильное горячее водоснабжение. Это создает условия для тиражирования таких систем в масштабе Дальневосточного региона РФ.

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Слесаренко И.В.** Исследование и испытания вакуумных солнечных коллекторов в системах теплоснабжения / *Фундаментальные исследования*. – 2016 № 2 (часть 3) 2016, стр. 509-514. [Электронный ресурс]. <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39632>

2. **Слесаренко И.В.** Оценка технико-экономических показателей солнечных водонагревательных установок / *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 12 (часть 4). – С. 828-833. [Электронный ресурс]. <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=39632>

3. **Слесаренко И.В.** Моделирование процессов в системе теплоснабжения с солнечной водонагревательной установкой / *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. Специальный выпуск 36, 2015 год, 300 с., С.178-185.

4. **Слесаренко И.В.** Выбор установок возобновляемой энергетики для локальных систем энергоснабжения / Слесаренко И.В., Гульков А.Н., Слесаренко В.В. / *Горный информационно-аналитический бюллетень*. Отдельный выпуск №3. Нефть и газ, 2013. С.190-196. ISBN: 0236-1493.

5. **Слесаренко И.В.** Особенности эксплуатации вакуумных солнечных коллекторов в системах теплоснабжения / Слесаренко И.В., Гульков А.Н., Слесаренко В.В., / *Энергосбережение и водоподготовка*. №3, 2015, с.26-32.

6. **Слесаренко И.В.** Исследование процессов генерации теплоты в схеме солнечно-теплонасосной установки /Слесаренко И.В., Слесаренко И.Б./ *Горный*

информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск №4. Нефть и газ, 2014. С.234-241. ISBN: 0236-1493.

7. **Слесаренко И.В.** Перспективы применения тепловых насосов при утилизации теплоты городских стоков /Слесаренко В.В., Княжев В.В., Вагнер В.В., Слесаренко И.В. / Энергосбережение и водоподготовка. №3, 2012, с.28-34.

8. **Слесаренко И.В.** Преимущества газификации: замена электрических парогенераторов газовыми котлами. / Слесаренко И.В., Кисок Д.К., Гульков А.Н./ Горный информационно-аналитический бюллетень. Отдельный выпуск №4. Нефть и газ, 2014. С.109-120. ISBN: 0236-1493.

***Статьи в других изданиях и материалы
научно-технических конференций:***

9. **Слесаренко И.В.** С. Технологические решения для повышения эффективности работы солнечных водонагревательных установок в системах теплоснабжения / Сборник трудов II Международной научной конференции Евразийского научного объединения «Современные концепции научных исследований». Москва, 27 – 28 февраля 2015 г. С. 63 – 66

10. **Слесаренко И.В.** Возможности устойчивого социально-экономического развития территории на основе солнечной энергетики / Материалы VII Международной студенческой электронной конференции, 2015 г. [Электронный ресурс].

<http://www.scienceforum.ru//2015/945/13485>

11. **Слесаренко И.В.** Research of vacuum solar in heating systems / Слесаренко И.В., Гульков А.Н., Слесаренко В.В.// Материалы международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования» 14-18 сентября 2015г., Владивосток

12. **Слесаренко И.В.** Operation of solar collectors in ambient with low temperatures and comparison of their output characteristics / Слесаренко И.В., Слесаренко В.В., Гульков А.Н. // Материалы VI Международной научно-практической конференции «Фундаментальная наука и технологии – перспективные разработки», выпуск Фундаментальные науки и техники – перспективные разработки VI: Труды конференции. Северный Чарльстон, 3-4.08.2015, С. 157-161. [Электронный ресурс].

http://www.amazon.co.uk/dp/1515396258/ref=rdr_ext_tmb

13. **Слесаренко И.В.** Выбор установок возобновляемой энергетики для локальных систем энергоснабжения Дальневосточного региона. /В.В. Слесаренко, И.В.Слесаренко/ Материалы Второго Международного форума «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности» – REENFOR-2014. Москва. 10 – 11 ноября 2014 г. С. 471- 472.

14. **Слесаренко И.В.** Особенности моделирования солнечных водонагревательных установок. /Слесаренко И.В., Слесаренко И.В./ Материалы II Международной научно-практической конференции Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований. 10-11 октября 2013г., Москва, ISBN 978-14935487120-2 Научно-издательский «Академический» центр, том 2, с. 92-94.

15. **Слесаренко И.В.** Усовершенствование комбинированных солнечно-теплонасосных установок. /Слесаренко В.В., Вагнер В.В., Слесаренко И.В. / Вологдинские чтения. Материал научной конференции ISSN 2219-7389 – Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2013. – С.147-150.

16. **Slesarenko I.V.** Solar water heating systems: the analysis of schemes design / Slesarenko V.V., Slesarenko I.V./ GRAND RENEWABLE ENERGY 2014 Abstracts 27 July – 1 August, 2014 Tokyo Big Sight, Tokyo Japan. – Area III: Solar Thermal Applications. [Электронный ресурс].

17. **Slesarenko I.V.** Complex Modeling of Solar Water Heating Systems / Slesarenko I.V./ Solar World Congress 2015, Poster presentation, 08-12 November, 2015 Daegu, Korea.

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 19.10.2016. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 100 экз. Заказ 142.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.

190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, ул. Егорова, д. 5/8, лит. А.

