

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

ТАШКЕНТСКИЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

*На правах рукописи*  
УДК 696.2

**ИКРАМОВ АБДУСОБИР АБДУСАТТОРОВИЧ**

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ САМОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ  
СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

**диссертация  
на соискание академической степени магистра по специальности**

**5А340403 - Теплогазоснабжение, вентиляция, кондиционирование воз-  
духа и охрана воздушного бассейна**

**Рекомендовано к защите  
Руководитель отдела магистрату-  
ры**

**доц.М.С.Саидов**

**Зав. кафедрой к.т.н., доцент  
Буриев Э.С.**

**«\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г**

**«\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г**

**Научный руководитель: к.т.н.,  
проф.Рашидов Ю.К.**

**ТАШКЕНТ – 2015**

**Утверждаю**

Зав. кафедрой ПСЭИК  
к.т.н., доц. Буриев Э.С.  
«      » 2014 г.

## **ЗАДАНИЕ ПО ПОДГОТОВКЕ И НАПИСАНИЮ МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Магистерская диссертация по теме: «Повышение эффективности саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения»

название (с указанием материалов конкретных организаций)  
утверждённая приказом ректората института от «28» 11 2013г.  
за номером 2/319 по кафедре ПСЭИК  
за слушателем Икрамов Абдулсабир Абдусатторович  
научный руководитель проф. Рашидов Ю.К., к.т.н., с.н.с.  
Ф.И.О., занимаемая должность, учёная степень, учёное звание  
должна быть подготовлена и представлена к предварительной защите  
на кафедру 30.05.2015 г.

число, месяц, год

В работе будут использованы: Авторефераты, справочная литература, КМК, статьи журналов, отчёты о научно-исследовательской работе,

Практические, балансовые и др. материалы, стат. данные др. ведомств и т.п. за годы  
материалы семинаров, обзорные проспекты, брошюры, каталоги  
публикации, труды и т.д. законодательные и нормативные акты, инструкции и т.п.

современного оборудования, руководство по проектированию, монтажу и эксплуатации систем солнечного горячего водоснабжения

В работе предусматривается: Выполнение аналитического обзора научно-аналит. таблицы, группировочные таблицы, графики, схемы, диаграммы, математические модели и т.п.  
технической и патентной литературы по системам солнечного горячего водоснабжения -их основные типы, параметры и характеристики, эффективность термосифонных систем солнечного горячего водоснабжения, температурная стабильность горячей воды в режимах однократного и многократного нагрева, влияние кратности циркуляции на суточную эффективность термосифонной системы, гидравлический расчет гелиоконтура с термосифонной циркуляцией

В работе предусматривается изложение следующих групп вопросов:

1-я группа Анализ эффективности существующих систем солнечного горячего водоснабжения. Цель и задачи исследований

название

2-я группа Теоретические исследования саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения

название

3-я группа Экспериментальные исследования саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения

название

Задание выдано \_\_\_\_\_

число, месяц, год

Научный руководитель проф. Рашидов Ю.К...

подпись, Ф.И.О., дата

Задание принял слушатель Икрамов Абдусобир Абдусатторович

График завершения магистерской диссертации в первоначальном варианте

Глава I. Анализ эффективности существующих систем солнечного горячего водоснабжения. Цель и задачи исследований

название первой главы диссертации в первоначальном плане и сроки представления

Глава II. Теоретические исследования саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения

название второй главы диссертации в первоначальном плане и сроки представления

Глава III. Экспериментальные исследования саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения

название третьей главы диссертации в первоначальном плане и сроки представления

Предварительная защита диссертация на кафедре 30.05.2015 г.

срок, дата, год

Задание выдано проф., к.т.н.

научный руководитель магистерской диссертации

Рашидов Юсуф Каримович

Ф.И.О.

Подпись, дата

Задание принял Икрамов Абдусобир Абдусатторович

Ф.И.О., слушателя,

подпись дата

# С О Д Е Р Ж А Н И Е

	Стр.
<b>ЗАДАНИЕ</b>	2
<b>Введение</b>	5
<b>Глава I</b>	
<b>Анализ эффективности существующих систем солнечного горячего водоснабжения. Цель и задачи исследований</b>	8
1.1. Основные конструктивные решения систем солнечного горячего водоснабжения	8
1.2. Эффективность термосифонных систем солнечного горячего водоснабжения	28
1.3. Цель и задачи исследования	32
<b>Выводы по I главе</b>	33
<b>Глава II</b>	
<b>Теоретические исследования саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения</b>	35
2.1. Температурная стабильность горячей воды в режимах однократного и многократного нагрева	35
2.2. Влияние кратности циркуляции на суточную эффективность термосифонной системы	42
2.3. Гидравлический расчет гелиоконтура с термосифонной циркуляцией	45
<b>Выводы по II главе</b>	47
<b>Глава III</b>	
<b>Экспериментальные исследования саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения</b>	40
3.1. Описание экспериментальной гелиоустановки и методика проведения исследований	49
3.2. Результаты экспериментальных исследований	53
<b>Выводы по III главе</b>	61
<b>Заключение</b>	62
<b>Список использованной литературы</b>	63
<b>Приложения</b>	69

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В настоящее время, в связи с ростом цен на традиционные энергоносители, вновь начинает увеличиваться внимание к использованию солнечной энергии. При этом новый интерес к системам солнечного горячего водоснабжения весьма актуален в свете Указа Президента Республики Узбекистан «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии»<sup>1</sup>.

Постоянный рост потребления энергии, а также необходимость защиты окружающей среды от вредных выбросов и "теплового загрязнения", уже сегодня перед человечеством стоит вопрос о правильном и целесообразном расходовании топливных запасов земли и поиска новых источников энергии, которые должны быть не только достаточно мощными, но и достаточно "чистыми".

Вовлечение в энергетический баланс Республики Узбекистан нетрадиционных видов энергии, в первую очередь солнечной энергии, представляют значительный научный и практический интерес. Использование экологически чистой солнечной энергии, поступающей в республике Центрально-Азиатского региона практически круглый год: особенно важно для теплоснабжения, как наиболее реальной и подготовленной в техническом отношении области практического использования солнечной энергии, на нужды которого тратится почти 25 % энергии природных топливных ресурсов.

Исследованиям по использованию солнечной энергии большое внимание уделяется в Узбекистане. Использование энергии Солнца сможет обеспечить экономию топливных ресурсов народному хозяйству нашей страны.

К числу устройств, где использование энергии Солнца может быть наиболее эффективным, относятся системы солнечного горячего водоснаб-

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан УП-4512 от 1.03.2013 г. «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии».

жения. Получение потребителем воды с заданной температурой - основной показатель нормальной работы систем горячего водоснабжения. Одним из явлений, ухудшающих комфортность пользования гелиосистемами горячего водоснабжения, является колебание температуры отбираемой воды, связанные с изменением интенсивности солнечной радиации в течение дня.

Расширение масштабов использования энергии солнца для целей горячего водоснабжения сдерживается в основном из-за сравнительно высоких удельных капиталовложений в сооружение гелиосистем по сравнению с системами, работающими от традиционных источников. Причиной этого является традиционный подход при разработке и создании систем солнечного горячего водоснабжения, который не предусматривает применения процессов саморегулирования для упрощения и повышения надёжности работы систем солнечного горячего водоснабжения в условиях нестационарного поступления солнечной радиации.

Поэтому разработка саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения является актуальной задачей.

**Цель работы** – повышение эффективности саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения.

Исходя из поставленной цели, задачами исследования явились:

1. Анализ существующих конструктивных решений систем солнечного горячего водоснабжения и выявление наиболее перспективных.
2. Разработать схемно-технологические решения саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения.
3. Выявить закономерности процессов саморегулирования в термосифонных системах солнечного горячего водоснабжения.
4. Разработать физико-математическую модель работы саморегулирующегося термосифонного гелиоконтура;
5. Получить аналитические зависимости для расчёта температуры воды на выходе из солнечного коллектора, а также зависимости для расчёта относительной стабильности температуры горячей воды на выходе из солнечного коллектора;

6. Оценить влияние кратности циркуляции на суточную эффективность термосифонной системы.

**Объект исследования.** Системы солнечного горячего водоснабжения.

**Предмет исследования.** Процессы саморегулирования в системах солнечного горячего водоснабжения.

**Методы исследования.** Для достижения цели и решения поставленных задач будет использован комплексный метод, включающий аналитические и экспериментальные численные исследования.

**Научная новизна работы** будет заключаться в разработке физико-математической модели саморегулирующегося термосифонного гелиоконтура; в получении аналитических зависимостей для расчёта температуры воды на выходе из солнечного коллектора; зависимостей для расчёта относительной стабильности температуры горячей воды на выходе из солнечного коллектора; зависимостей для оценки влияния кратности циркуляции на суточную эффективность термосифонной системы.

**Практическая значимость работы** будет состоять в разработке новых технологий и подходов создания систем солнечного горячего водоснабжения, обеспечивающих существенное повышение их экономичности и надёжности, снижение материлоёмкости и стоимости отдельных элементов и узлов систем, а также значительное упрощение их эксплуатации за счёт эффектов саморегулирования.

Основные результаты выполненной работы опубликованы и доложены на научных конференциях: Архитектура ва қурилиш муаммолари. Магистрантларнинг XII-XIII-анъанавий анжумани илмий мақолалар тўплами, ТАҚИ, Тошкент, 2014-2015 гг.

.

# ГЛАВА I. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1. Основные конструктивные решения систем солнечного горячего водоснабжения

Системы солнечного теплоснабжения (ССТ) становятся все более популярными во многих странах мира. Особенно впечатляют успехи солнечной теплоэнергетики в Европе, где ежегодный прирост оборота отрасли в течение последних десяти лет составлял 11–12% [2].

Общая площадь солнечных коллекторов (СК), установленных к настоящему времени в европейских странах, составляет более 11 млн  $\text{м}^2$ . В последнее десятилетие наиболее быстро рынок ССТ развивался в Германии, Австрии и Греции. Удельная площадь солнечных коллекторов к 2004 году составляла в Греции  $264 \text{ м}^2$  на 1000 человек, в Австрии –  $203 \text{ м}^2$ , а в среднем по странам Европейского сообщества –  $26 \text{ м}^2$  на 1000 жителей [3].

Мировой опыт применения СК показывает, что солнечные системы теплоснабжения могут быть эффективными и надежными для обеспечения горячего водоснабжения и отопления жилых и общественных зданий, подогрева воды в бассейнах и даже солнечного кондиционирования и опреснения воды.

Под солнечным теплоснабжением понимается использование солнечной энергии для обеспечения горячего водоснабжения и отопления в жилищно-коммунальной, бытовой или производственной сферах.

ССТ могут быть классифицированы по различным критериям:

а) по назначению:

- системы горячего водоснабжения (ГВС);
- системы отопления;
- комбинированные системы;

б) по виду используемого теплоносителя:

– жидкостные;

– воздушные;

в) по продолжительности работы:

– круглогодичные;

– сезонные;

г) по техническому решению схемы:

– одноконтурные;

– двухконтурные;

– многоконтурные.

Вне зависимости от варианта исполнения системы в мировой практике наиболее часто применяется градация систем по их производительности, которая определяет принципиальную схему и вариант конструктивного исполнения системы [3]. Ориентировочные диапазоны производительности и применяемые для их реализации варианты систем приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1.

**Ориентировочные диапазоны производительности и применяемые для их реализации варианты систем**

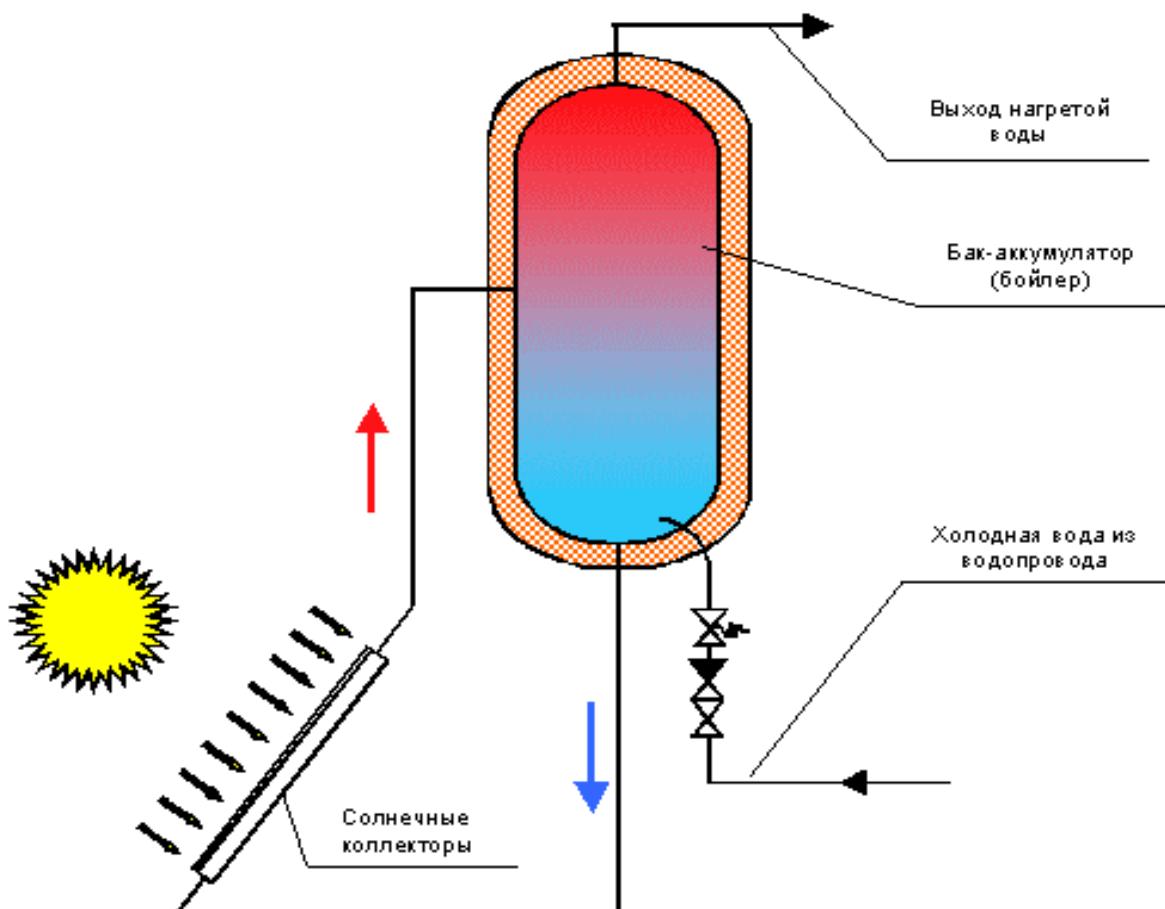
Производительность по горячей воде в день	Тип системы	Описание системы
< 150 л	«многоблок»	Простейшая система, в которой СК, БА и трубопроводы объединены в единую установку полной заводской готовности и, как правило, неразъемны. Применяется для сезонного ГВС в бытовых целях и на объектах, действующих только в летнее время
150–300 л	малая безнасосная («термосифонная»)	Система, в которой движение теплоносителя в коллекторном контуре осуществляется за счет разности плотности теплоноси-

		теля, нагреваемого в СК, и охлаждения его в БА. В таких системах БА всегда расположен выше СК и расстояние между ними мало. Наиболее часто применяется для сезонного ГВС
300–500 (750) л	малая насосная	Система с принудительной циркуляцией теплоносителя, в коллекторном контуре которой имеется насос и система автоматического управления им. Расположение БА относительно СК – произвольное. Может применяться как для сезонной (ГВС), так и круглогодичной эксплуатации (ГВС + отопление)
> 1000 л	большая много-контурная («промышленная»)	Системы с принудительной циркуляцией теплоносителя. Применяются для теплоснабжения объектов с большой тепловой нагрузкой в режиме сезонной или круглогодичной эксплуатации

Системы типа «моноблок» и малые термосифонные системы часто именуют домашними или бытовыми солнечными водонагревателями. Эти установки могут быть как одно-, так и двухконтурными, устанавливаются на открытом воздухе и характеризуются повышенными теплопотерями накопительного бака-аккумулятора. В отличие от «моноблока» в малых системах СК и БА выполняются раздельно и могут устанавливаться как вместе на единой опорной конструкции, так и на расстоянии друг от друга, ограниченном гидравлическим сопротивлением коллекторного контура.

В 1970–80-х годах большинство солнечных водонагревательных систем как в нашей стране, так и за рубежом, были одноконтурными, то есть системами прямого нагрева водопроводной (сетевой) воды.

Работа одноконтурной термосифонной системы для прямого нагрева воды (рис.1.1).



**Рис.1.1. Принципиальная схема одноконтурной термосифонной системы солнечного горячего водоснабжения**

В такой системе солнечные коллекторы, бак-аккумулятор и соединительные трубопроводы заполнены холодной водой. Солнечное излучение, проходя через прозрачное покрытие (остекление) коллектора нагревает его поглощающую панель и воду в её каналах. При нагреве плотность воды уменьшается, и нагретая жидкость начинает перемещаться в верхнюю точку коллектора и далее по трубопроводу – в бак-аккумулятор. В баке нагретая вода перемещается в верхнюю точку, а более холодная вода раз-

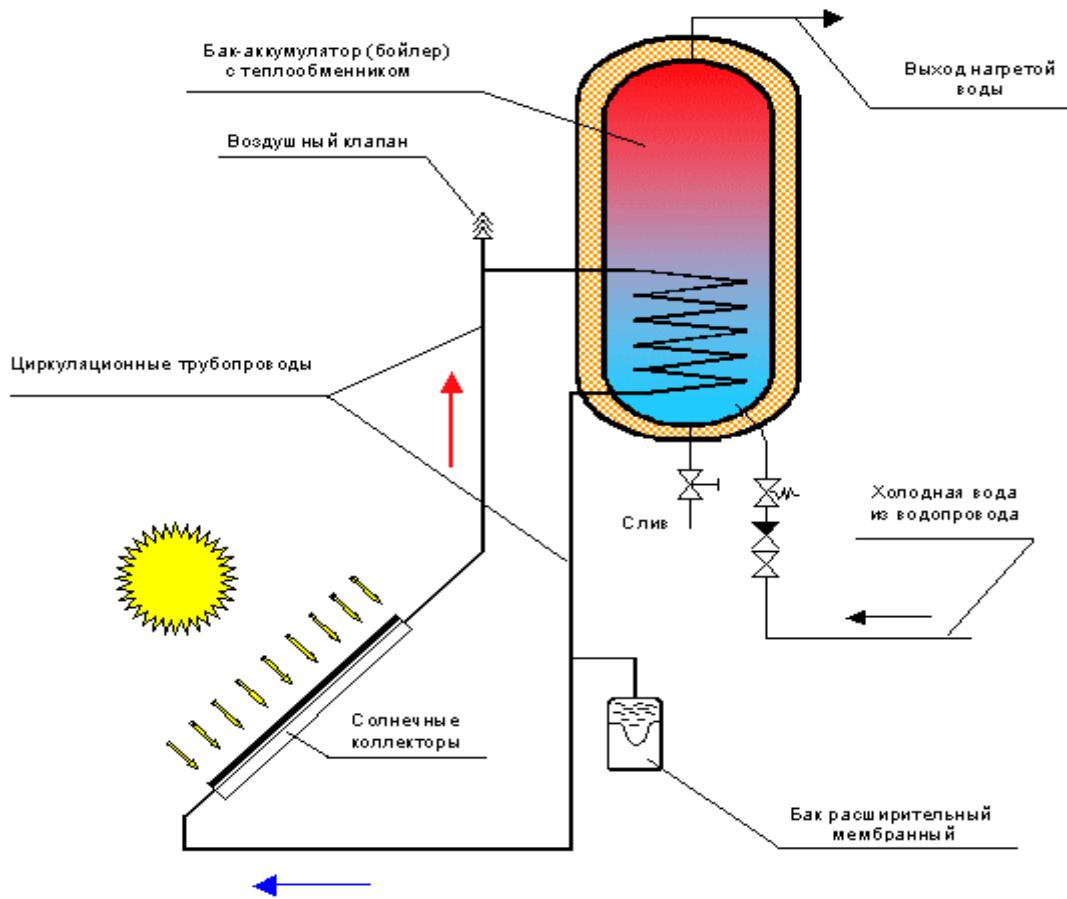
мещается в нижней части бака, т.е. наблюдается расслоение воды в зависимости от температуры. Более холодная вода из нижней части бака по трубопроводу поступает в нижнюю часть коллектора.

Таким образом, при наличии достаточной солнечной радиации, в коллекторном контуре устанавливается постоянная циркуляция, скорость и интенсивность которой зависят от плотности потока солнечного излучения. Постепенно, в течение светового дня, происходит полный прогрев всего бака, при этом отбор воды для использования должен производиться из наиболее горячих слоев воды, располагающихся в верхней части бака. Обычно это делается подачей холодной воды в бак снизу под давлением, которая вытесняет нагретую воду из бака.

Опыт эксплуатации показал, что при всей простоте и кажущейся дешевизне эти системы достаточно проблематичны в эксплуатации и имеют меньший срок службы в сравнении с двухконтурными системами, включающими промежуточный теплообменник между СК и БА (рис.1.2.).

Работа такой системы аналогична работе одноконтурной системы, но в системе имеется отдельный замкнутый коллекторный контур, состоящий из коллекторов, трубопроводов и теплообменника в баке-аккумуляторе. Этот контур заправляется специальным (как правило, незамерзающим) теплоносителем. При нагреве теплоносителя в коллекторе он поступает в верхнюю часть теплообменника, отдает тепло воде в баке и охлаждаясь движется вниз к входу в коллекторы, осуществляя постоянную циркуляцию при наличии солнечной радиации.

Полный прогрев бака происходит постепенно, в течение всего светового дня, но поскольку отбор воды к потребителю производится из наиболее прогретых верхних слоев, пользование горячей водой возможно и до полного прогрева.



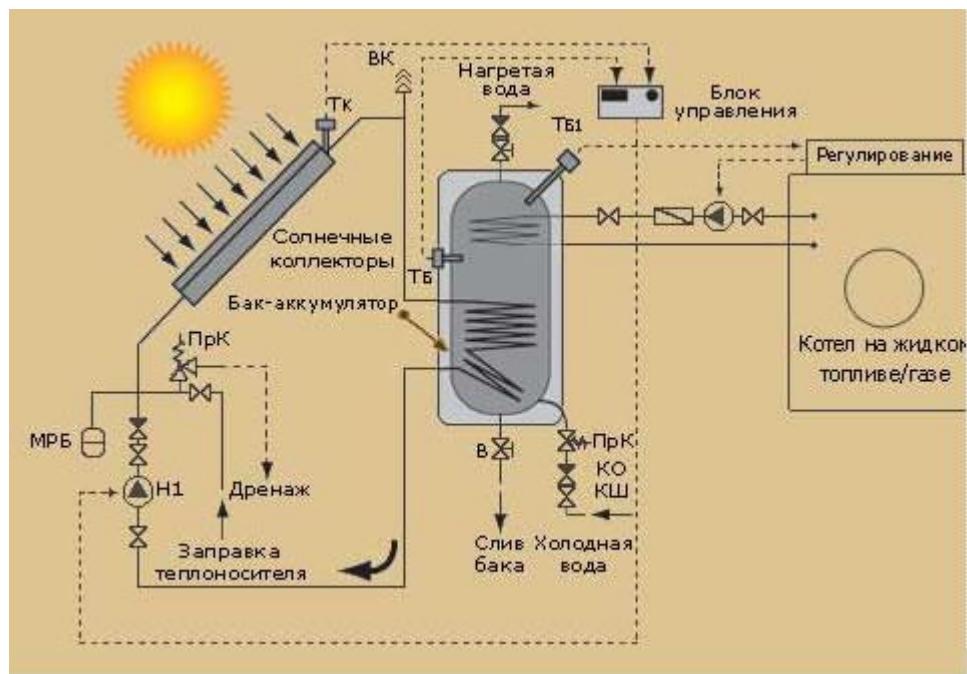
**Рис.1.2. Двухконтурные системы с пассивной циркуляцией теплоносителя**

По мере расширения применения солнечных систем также произошел постепенный переход от повсеместного применения «моноблоков» и небольших водонагревателей (с термосифонным движением теплоносителя через СК) к двухконтурным системам с принудительной насосной циркуляцией. Такая схема системы позволяет размещать БА в любом удобном месте здания. В настоящее время большая часть солнечных систем в Европе устроена по этому принципу

Наиболее распространенной в Европе системой, применяемой сегодня для ГВС индивидуальных жилых зданий (коттеджей), является двухконтурная система с принудительной циркуляцией в коллекторном контуре теплоносителя-антифриза. Отбор нагретой воды из БА производится с верхней точки бака методом вытеснения, то есть путем подачи холодной воды из во-

допровода (или иного источника) под давлением в нижнюю часть бака. Принципиальная схема такой системы не зависит от ее производительности и места установки.

Рассмотрим подробнее принципиальную схему двухконтурной системы солнечного теплоснабжения с принудительной насосной циркуляцией (рис.1.3).



**Рис. 1.3. Принципиальную схему двухконтурной системы солнечного теплоснабжения с принудительной насосной циркуляцией**

Коллекторный контур системы является замкнутым и заполняется каким-либо незамерзающим и нетоксичным теплоносителем. Нетоксичность теплоносителя является обязательным требованием, которое дает возможность при создании схемы установки обойтись более простыми техническими решениями и избежать «правила двух стенок», разделяющих токсичный теплоноситель и питьевую воду. Низкие температуры замерзания теплоносителя позволяют не сливать его из СК в зимнее время, что также удешевляет эксплуатацию и повышает коррозионную устойчивость системы.

В настоящее время в связи с развернувшимся строительством на рынке появилось большое количество систем отопления для индивидуальных односемейных зданий. Теплоносители систем соответствуют требованиям, предъявляемым к теплоносителям солнечных систем. Эти теплоносители, как зарубежные, так и разработанные в России, имеют сбалансированный набор ингибиторов коррозии для основных конструкционных металлов коллекторов. Выбор теплоносителя осуществляется по их теплофизическим свойствам и стоимости.

Коллекторы устанавливаются, как правило, на кровле здания, хотя в каждом конкретном случае возможны и другие места установки. Условия размещения и ориентации СК выбираются в соответствии с нормативными документами.

На выходе из СК в верхней точке контура устанавливается автоматический клапан-воздухоотводчик. Затем нагретый в СК теплоноситель проходит через опускной трубопровод и поступает в нижний теплообменник БА, где охлаждается, передавая тепло расходной воде бака. После выхода из бака теплоноситель по трубопроводу поступает через насос в нижнюю часть СК.

Верхний теплообменник БА подключен к отопительному котлу, соединенному с отопительным контуром здания. Циркуляция горячей воды из котла для нагрева БА осуществляется с помощью отдельного насоса.

Отбор расходной горячей воды из БА выполняется в верхней точке бака подачей снизу в бак холодной воды (то есть всегда расходуется самая горячая вода, имеющаяся в баке). Эта вода по магистрали подается к точкам отбора. Для обеспечения постоянного наличия в точках отбора горячей воды в систему может быть включена циркуляционная магистраль со своим насосом.

Фактически БА всегда находится под давлением водопроводной сети. Включение циркуляционного насоса коллекторного контура производится блоком управления, который по своей функции является дифференциальным реле, сравнивающим показания двух датчиков температуры: датчика, уста-

новленного на выходе теплоносителя из СК, и датчика, установленного в БА. Место установки датчика в баке может быть различным по высоте, и это влияет на параметры работы регулятора, а следовательно, на теплопроизводительность системы и ее безопасность.

Если температура теплоносителя на выходе из СК выше, чем температура воды в баке, то включается циркуляционный насос и тепло передается воде в баке. При использовании современных насосов при работе может производиться регулировка частоты вращения насоса, чтобы, по возможности, поддерживать постоянной установленную разность температур управляющих датчиков.

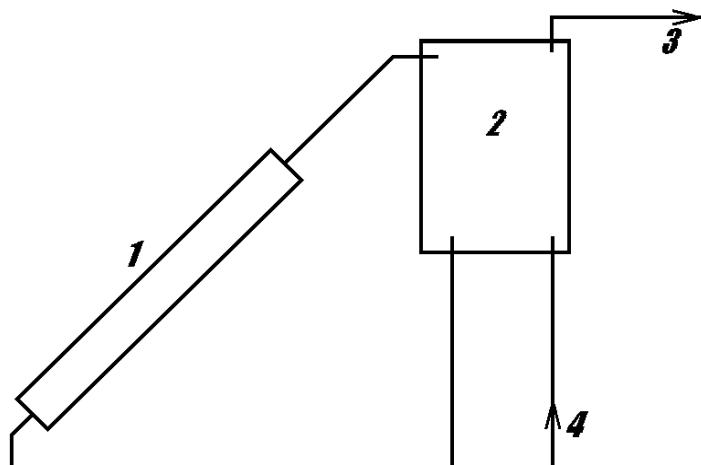
Многие зарубежные блоки управления имеют функции защиты установки от перегрева. Так, если температура СК превышает установленный уровень, то блок управления принудительно включает насос, пока температура коллекторов не понизится на 10 °C, несмотря на то что сам бак будет разогреваться выше установленной предельной температуры. Но при достижении в баке максимальной температуры 95 °C насос выключается обязательно.

Правильный выбор принципиальных схем систем солнечного горячего водоснабжения во многом определяет экономическую целесообразность использования солнечной энергии.

В южных районах республики, климат которых наиболее благоприятен, из общего количества тепла, расходуемого жилищно-коммунальным сектором, 50-70% расходуется на горячее водоснабжение. Это обстоятельство, а также то, что к горячему водоснабжению предъявляются менее жесткие требования по надежности, чем к отоплению, дает основание считать, что первым этапом внедрения солнечных систем является горячее водоснабжение.

Рассмотрим принципиальные схемы систем солнечного горячего водоснабжения с точки зрения обеспечения потребителей горячей водой требуемой температуры и эксплуатационной готовности, т.е. времени необходимой для нагрева за счёт солнечной энергии воды до нужной температуры.

Наиболее просты по устройству одноконтурные системы с естественной циркуляцией (рис.1.4). Основными элементами таких систем являются солнечный водонагреватель и бак-аккумулятор. Бак-аккумулятор расположен над солнечным водонагревателем и вода циркулирует в результате естественной конвекции, когда за счет энергии солнечной радиации, поглощаемой в солнечном водонагревателе, увеличивается температура воды на выходе из водонагревателя, создавая таким образом градиент плотности. Такие системы могут быть слегка подсоединенными к традиционным системам горячего водоснабжения с местным приготовлением горячей воды.



**Рис.1.4. Принципиальная схема одноконтурной системы солнечно-го горячего водоснабжения с естественной циркуляцией теплоносителя:**

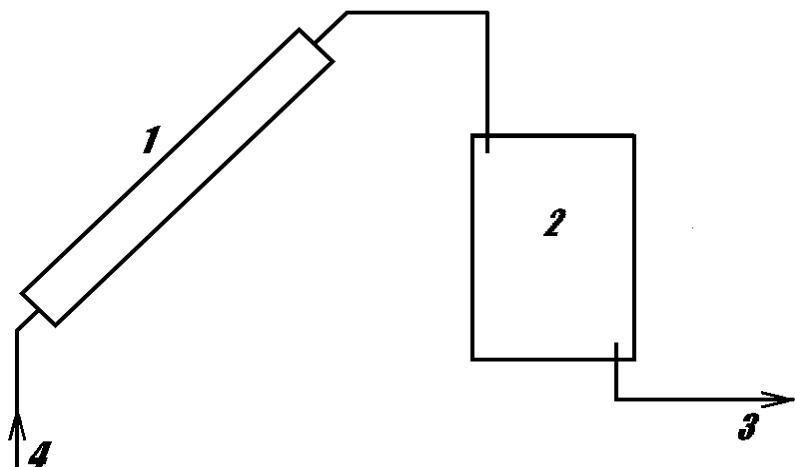
- 1 – солнечный водонагреватель;
- 2 – бак-аккумулятор горячей воды;
- 3 – горячая вода;
- 4 – холодная вода.

Основным элементом системы солнечного горячего водоснабжения является жидкостный солнечный нагреватель. Системы могут быть одно-, двух- и многоконтурными, с естественной (термосифонной) или принудительной циркуляцией.

Бак-аккумулятор горячей воды – может быть совмещен или на совмешен с теплообменником [3].

Для повышения эксплуатационной готовности систем солнечного горячего водоснабжения с естественной циркуляцией применяются несложные приспособления [2].

Другим примером выполнения одноконтурных систем солнечного горячего водоснабжения являются проточные системы (рис.1.5).



**Рис.1.5. Принципиальная схема одноконтурной проточной системы солнечного горячего водоснабжения:**

1 – солнечный водонагреватель; 2 – бак-аккумулятор горячей воды; 3 – горячая вода к потребителю; 4 – холодная вода.

Они могут быть применены также для предварительного подогрева исходной воды в солнечно-топливных котельных с открытым водоразбором и химочисткой подогреваемой воды. Главный недостаток этих систем – подверженность коррозии, что сводит на нет все преимущества.

Для повышения коррозионной устойчивости и обеспечения работы с антифризом в качестве промежуточного теплоносителя в зимнее время системы чаще всего выполняют двух- или многоконтурными. Принципиальная схема простейшей двухконтурной гелиосистемы с естественной циркуляцией [3] приведена на рис.1.6.

Недостаток двухконтурных термосифонных систем – низкая тепловая эффективность, вызванная малыми скоростями движения теплоносителя.

Для ее повышения в крупных системах, как правило, используют принудительную циркуляцию (рис.1.7).

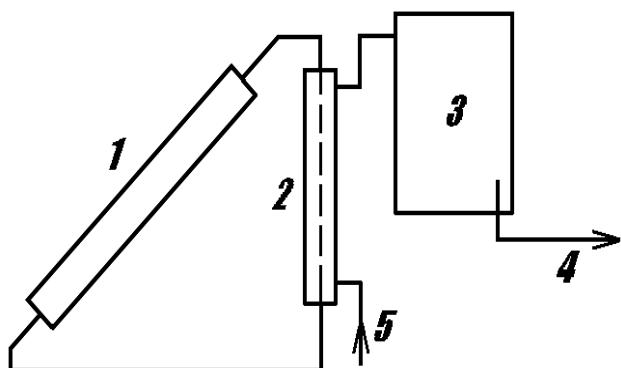
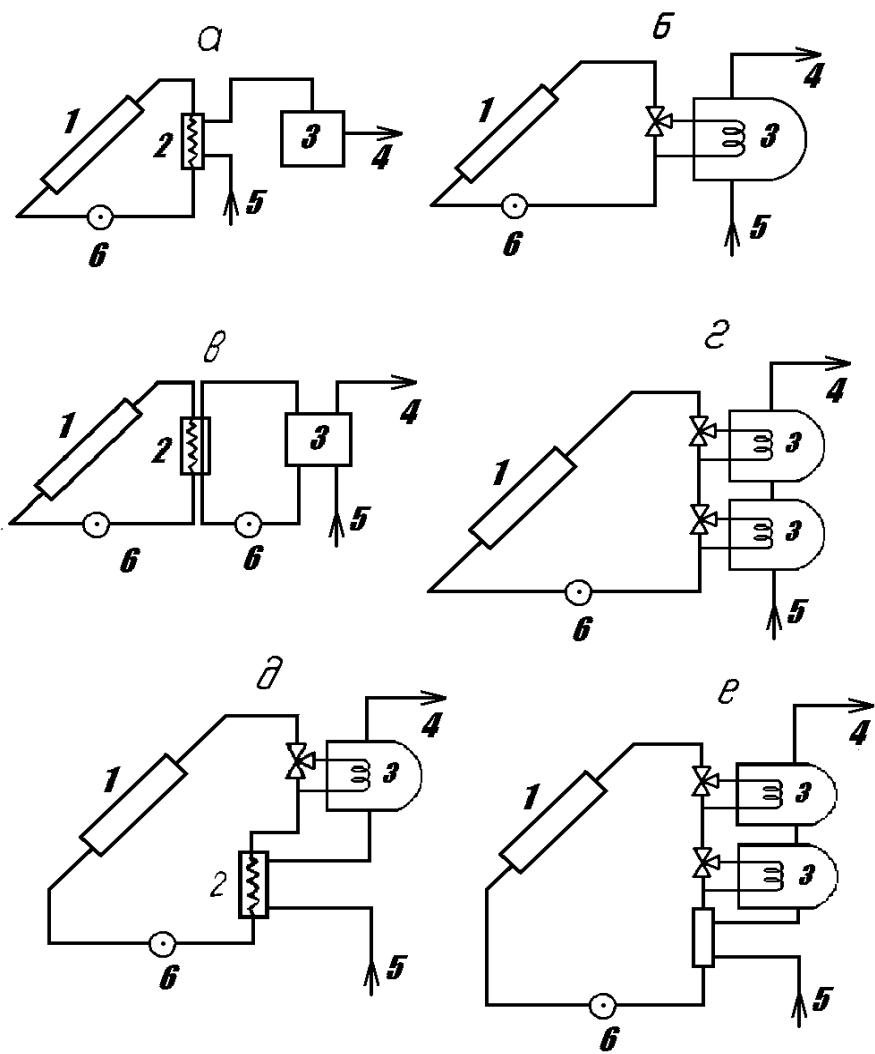


Рис.1.6. Принципиальная схема простейшей двухконтурной системы солнечного горячего водоснабжения с естественной циркуляцией теплоносителя:

- 1 – солнечный водонагреватель; 2 – теплообменник; 3 - бак-аккумулятор горячей воды;
- 4 – горячая вода к потребителю; 5 – холодная вода.

Для повышения эффективности работы двухконтурных систем солнечного горячего водоснабжения необходимо максимально понизить температуру теплоносителя, подаваемого в солнечный нагреватель. Эта температура в значительной мере зависит от схемы присоединения бака-аккумулятора. В практике нашли применение три основные схемы присоединения (рис.1.7, а, б, в), сравнительный анализ которых дан в [4].

Эффективность двухконтурных систем солнечного горячего водоснабжения, в которых бак-аккумулятор горячей воды совмещен с теплообменником (рис. 1.7, б), можно увеличить за счет использования явления стратификации воды в аккумуляторе. Для усиления этого эффекта емкость бака-аккумулятора разбивают на секции (рис.1.7, г). Скоростной теплообменник, установленный перед входом исходной воды в бак-аккумулятор (рис. 1.7, д, е), позволяет обеспечить нормальную работу системы горячего водоснабжения в течение всего периода инсоляции.



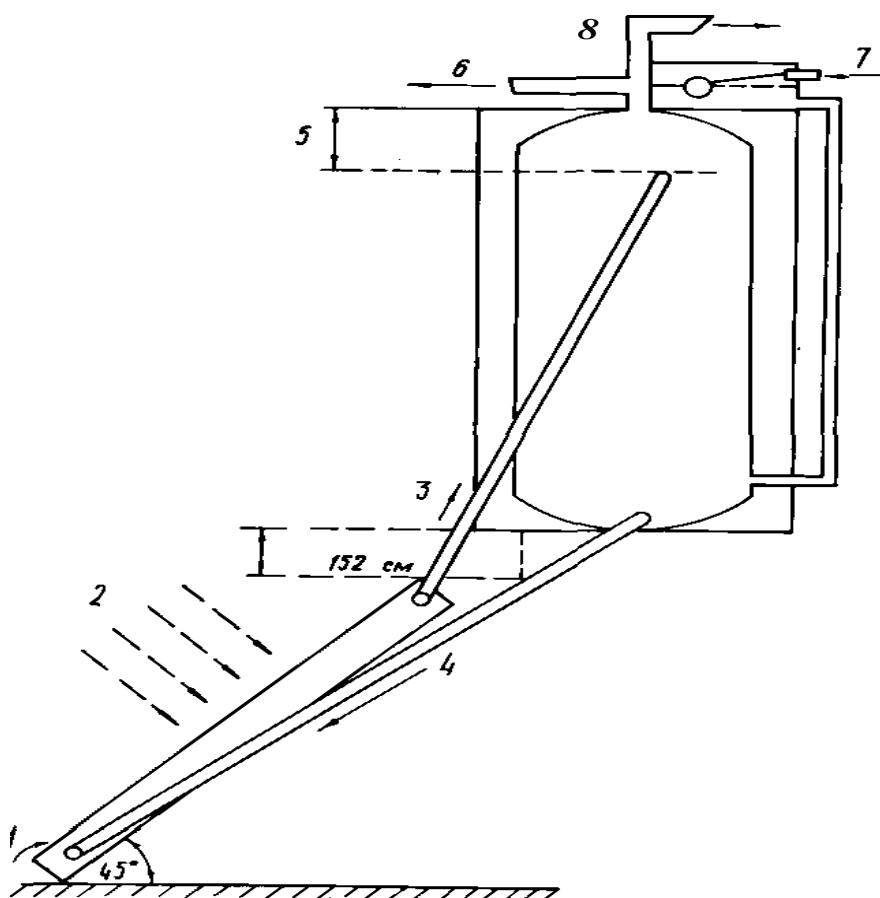
**Рис.1.7. Принципиальная схема двухконтурных систем солнечного горячего водоснабжения с принудительной циркуляцией теплоносителя:**

1 – солнечный водонагреватель; 2 – теплообменник; 3 - бак-аккумулятор горячей воды; 4 – горячая вода к потребителю; 5 – холодная вода; 6 – циркуляционный насос: а – со скоростным водо-водяным теплообменником, б – с баком-аккумулятором горячей воды, совмещенным с теплоприемником; в – с промежуточном циркуляционным контуром, г – с секционными баками-аккумуляторами горячей воды, совмещенными с теплоприемниками, д – со скоростным и емким водо-водяным теплообменником, совмещенным с баком-аккумулятором горячей воды, е - со скоростным и секционным емким водо-водяным теплообменником, совмещенным с секционными баками-аккумуляторами горячей воды.

Получение потребителем воды с заданной температурой - основной показатель нормальной работы систем горячего водоснабжения. Одним из явлений, ухудшающих комфортность пользования гелиосистемами горячего водоснабжения, является колебание температуры отбираемой воды, связанные с изменением интенсивности солнечной радиации в течение дня.

При термосифонной циркуляции задача температурной стабильности отбираемой воды может быть решена несколькими способами [5], [6], [7].

Простейшим решением, получившим широкое распространение в Австралии [5], является расположение точки соединения трубопровода отбора горячей воды с баком-аккумулятором в самой верхней его части, а подающего трубопровода - несколько ниже (рис.1.8).



**Рис. 1.8. Схема простейшей гелиоустановки с термосифонной циркуляцией без регулятора температуры:** 1-коллектор; 2-солнечная радиация; 3,4-подающий и обратный трубопроводы; 5-расстояние от верха бака, равная 20% его высоты; 6-подача горячей воды в сеть; 7-питательный бак; 8-перелив

Такое расположение точек соединения трубопроводов с баком позволяет исключить колебания температуры горячей воды, накопленной в его верхней части, вследствие ее перемешивания с недостаточно нагретой водой поступающей из коллектора в бак в часы снижения интенсивности солнечной радиации.

Установки, использующие данную схему приготовления горячей воды, характеризуются обычно низкой эксплуатационной готовностью, в связи с чем потребитель обеспечивается горячей водой только во второй половине дня. Объясняется это тем, что в широком интервале условий температура воды в солнечных коллекторах систем с естественной циркуляцией повышается в среднем на 10°C и для приобретения нужной температуры необходим многоцикловой ее нагрев.

Повысить эксплуатационную готовность гелиосистемы можно за счет увеличения гидравлического сопротивления гелиоконтура. На рис.1.9. показана схема гелиоустановки [ 6 ], в которой для изменения сопротивления контура и регулирования тем самым температуры горячей воды, применена задвижка на циркуляционном трубопроводе.

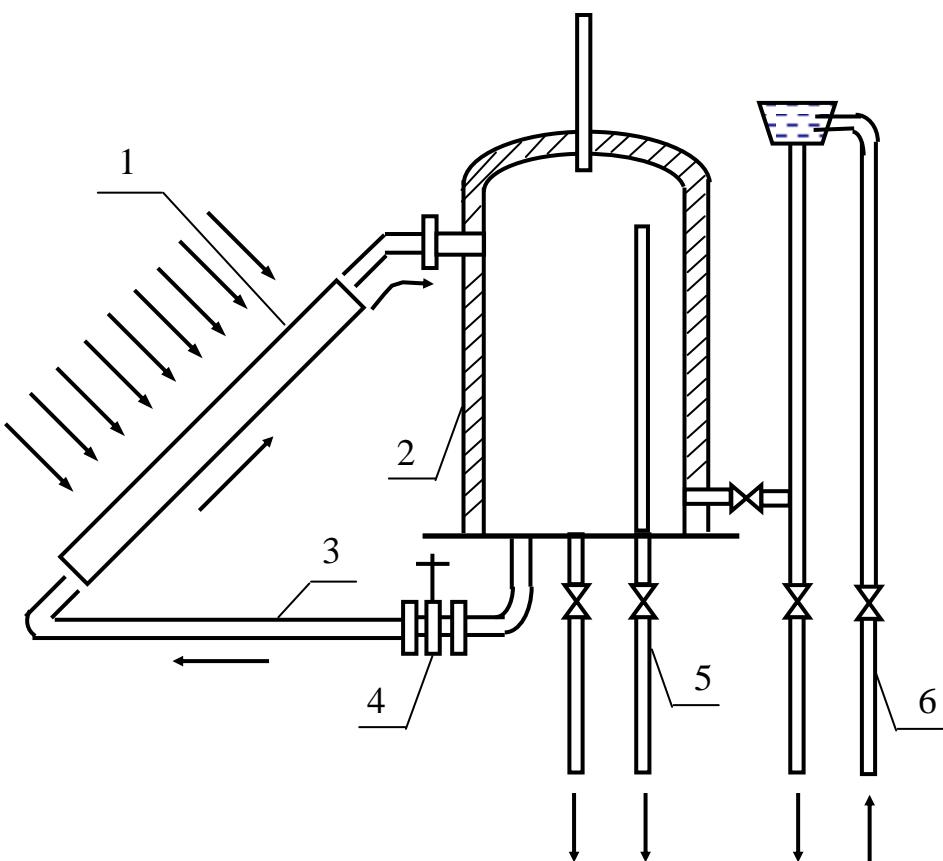
Достоинством системы является сравнительно высокая её эксплуатационная готовность, которая позволяет уже через 2...3 часа после начала попадания солнечных лучей на водонагреватель осуществлять отбор горячей воды.

К недостаткам системы можно отнести нестабильность температуры горячей воды, связанную с тем, что гидравлическое сопротивление задвижки, при одном и том же положении ее регулирующего органа, различно при разных расходах теплоносителя.

Требуемая стабильность температуры горячей воды обеспечивается в системах, снабженных приборами автоматики.

На рис.1.10. приведена схема системы горячего водоснабжения от солнечной энергии [ 8 ], в которой регулирование температуры воды осуществляется терморегулирующим вентилем 3. Поплавковый клапан 5 при не наполненном резервуаре 2 открывает приток холодной воды. Холодная вода

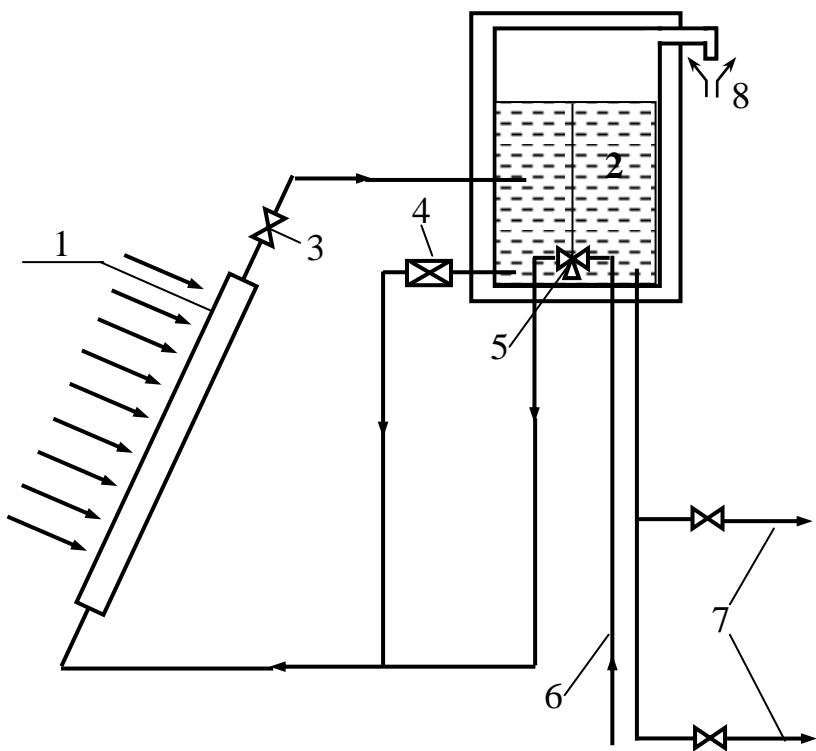
втекает в коллектор 1 и нагревается там до требуемой температуры. При ее достижении вентиль 3 открывается, теплая вода направляется в резервуар, холодная перетекает в коллектор. Если резервуар наполнен, то закрывается поплавковый клапан 5, обеспечивающий приток холодной воды к коллектору. При дальнейшем нагреве в солнечном коллекторе осуществляется термосифонная циркуляция из резервуара через обратный клапан 4 в коллектор, после чего вода снова возвращается в резервуар.



**Рис. 1.9. Схема гелиоустановки с регулятором температуры в виде задвижки на циркуляционном трубопроводе:**

1-коллектор; 2-бак; 3-обратный трубопровод; 4- задвижка «Лудло»; 5,6- трубопроводы для подачи горячей и холодной воды в сеть

Особенностью системы является то, что вода для потребителя есть всегда, причем нужной температуры, при уменьшении солнечной радиации ее количество уменьшается.



**Рис. 1.10. Схема системы горячего водоснабжения от солнечной энергии с терморегулирующим вентилем:**

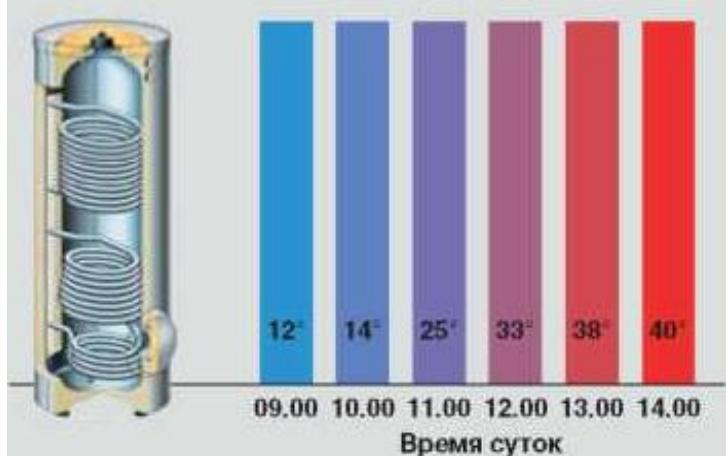
1-коллектор; 2-резервуар для горячей воды; 3-терморегулирующий вентиль; 4-обратный клапан; 5-поплавковый клапан; 6-холодная вода; 7-отбор горячей воды; 8-переливная труба.

К недостаткам системы можно отнести ее насыщенность автоматикой, а также уменьшение КПД коллектора вследствие прекращения циркуляции во время нагрева воды.

Немецкие компании «Будерус» (Buderus) [4] и Виссманн (Viessmann) [5] разработали различные варианты систем солнечного горячего водоснабжения с автоматической поддержкой температуры нагрева горячей воды в солнечных коллекторах. Для этого применяется послойная зарядка аккумуляторного бака.

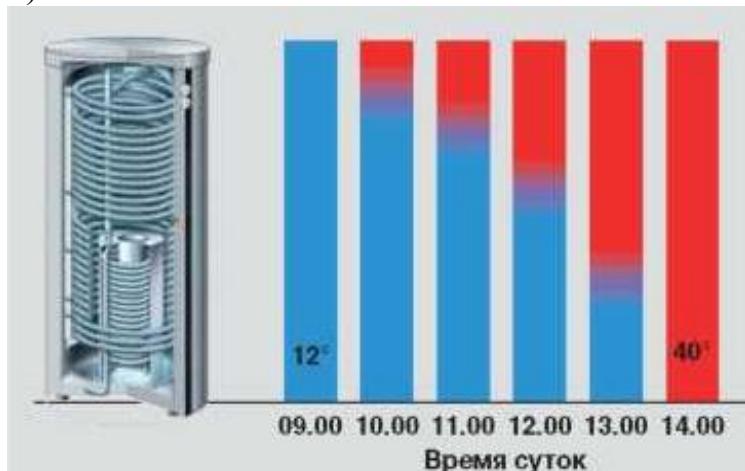
При использовании принципа послойной зарядки вода, нагретая в солнечном коллекторе, распределяется по слоям, каждый из которых имеет определенную температуру. При этом смешение с более холодными слоями не происходит (рис.1.11).

а)



В обычном бивалентном емкостном водонагревателе коллектор постоянно нагревает весь объем водонагревателя. При достижении заданной температуры нагретым оказывается весь объем.

б)



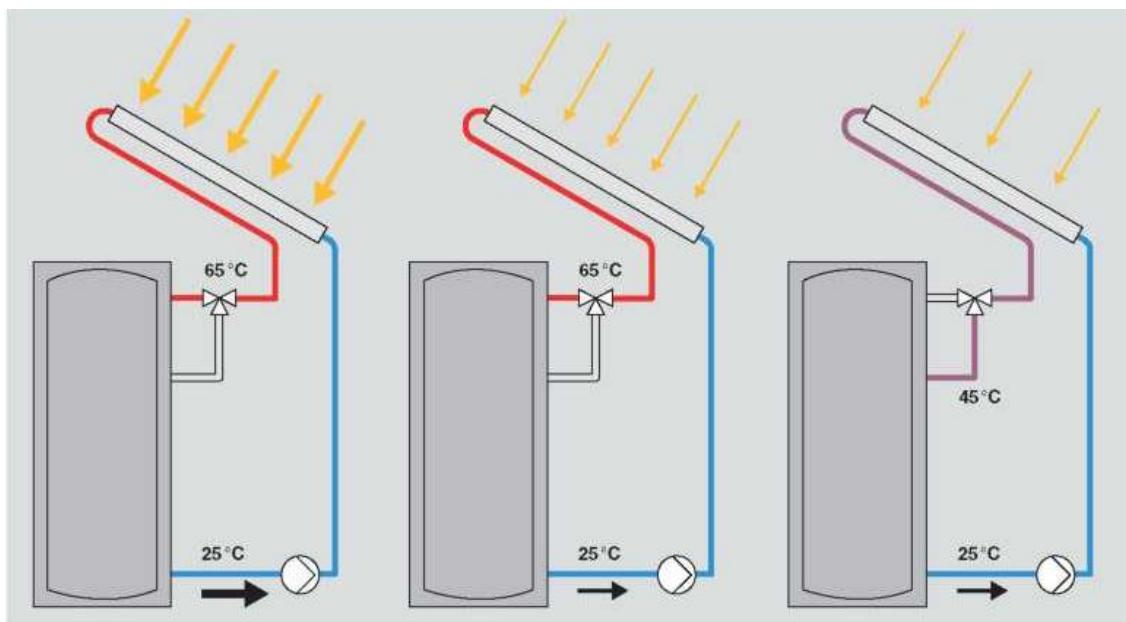
При послойной зарядке заданная температура в верхней части емкостного водонагревателя достигается раньше. Весь объем достигает заданной температуры за тот же период времени, что и в водонагревателе без использования послойной зарядки.

**Рис.1.11. Обычная (а) и послойная (б) зарядка аккумуляторного бака.**

При зарядке емкостного водонагревателя со встроенным теплообменником без использования послойного принципа одновременно нагревается весь объем жидкости. Для достижения требуемой температуры коллектор должен работать продолжительное время. Если потребность в теплоте возникает до достижения требуемой температуры воды, то необходим дополнительный нагрев с помощью теплогенератора.

Используя принцип послойной зарядки, можно снизить расход теплоты на дополнительный нагрев, для чего вода, нагретая в солнечном коллекторе, подается в слой с соответствующей температурой, при этом необходимо избежать перемешивания слоев. Таким образом можно раньше обеспечить подачу теплоты потребителю, не используя дополнительный догрев.

В зависимости от интенсивности излучения, гелиоконтур работает с большим или меньшим расходом теплоносителя (рис.1.12). Так выполняется послойная зарядка емкостного водонагревателя. Если интенсивность солнечного излучения недостаточна, то выполняется зарядка более низких слоев.



**Рис.1.12. Режимы регулирования расхода теплоносителя.**

Для послойной зарядки гелиоконтур работает с большим значением разности температур, то есть объемный расход теплоносителя снижается по сравнению с обычной зарядкой водонагревателя. При этом средняя температура коллектора увеличивается и, как следствие, коэффициент полезного действия коллектора уменьшается. Поэтому вакуумированные трубчатые коллекторы благодаря их небольшим тепловым потерям более подходят для

послойной зарядки, чем плоские коллекторы - это, в частности, касается солнечных систем для поддержки отопления

Объемный расход теплоносителя в гелиоконтуре отрегулирован для послойного наполнения таким образом, чтобы на выходе из коллектора (в подающем трубопроводе) постоянно поддерживалась заданная температура, то есть рабочая температура плюс разность температур теплообменника. Если солнечного излучения для этого недостаточно, то выполняется зарядка более низких слоев или заряжается другой емкостный водонагреватель. Таким образом, в зависимости от интенсивности солнечного излучения и уже достигнутого уровня температуры регулируется расход теплоносителя в гелиоконтуре.

Более простая схема [ 10 ] получения горячей воды с заданной температурой показана на рис. 1.14. В аккумулирующий бак 2 ниже уровня свободной поверхности воды подводится вода, нагреваемая в коллекторе 1. На подающий патрубок 4 внутри бака надет гибкий шланг 5, открытый конец которого, прикреплен к поплавку 3, находится на  $0,5 \div 1$  мм выше свободной поверхности воды.

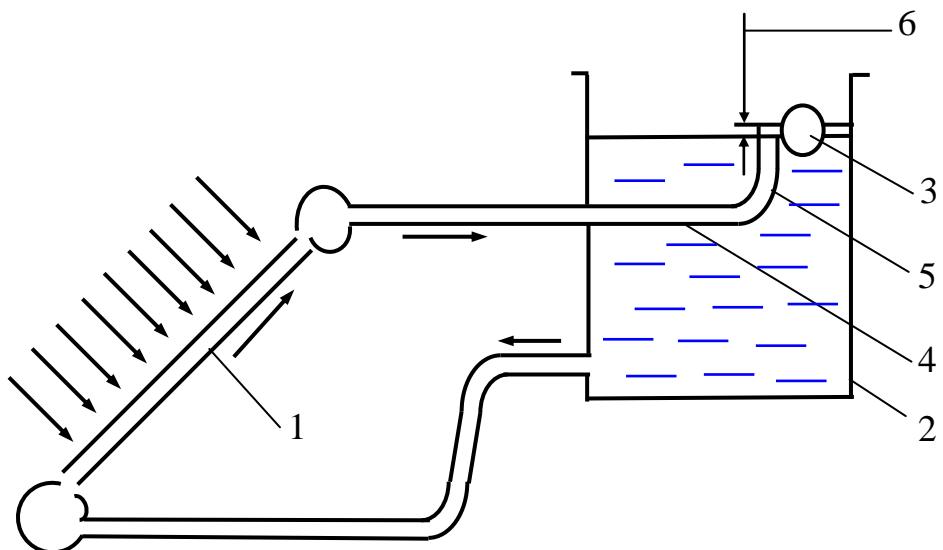


Рис. 1.14. Схема получения горячей воды с СТП:  
1-коллектор; 2-бак-аккумулятор; 3-поплавок; 4-подающей патрубок;  
5-гибкий шланг; 6-высота поднятия свободного конца шланга над  
поверхностью воды.

Вода за счет термосифонной циркуляции поступает из нижней части бака 2 через коллектор 1 в его верхнюю часть. Причем высота поднятия 6 свободного конца шланга обеспечивает циркуляцию воды, только в том случае, когда она в коллекторе нагреется до требуемой температуры

Рассматриваемая схема интересна тем, что она является наиболее удачным примером саморегулирующегося теплогидродинамического процесса, когда в гелиоконтуре одним лишь поднятием открытого конца шланга создается такое гидравлическое сопротивление, при котором располагаемый циркуляционный напор всегда соответствует неизменной температуре воды на выходе коллектора.

К недостаткам схемы следует отнести отсутствие регулятора температуры и большие тепловые потери со свободной поверхности горячей воды.

## **1.2. Эффективность термосифонных систем солнечного горячего водоснабжения**

Естественная циркуляция в термосифонном гелиоконтуре возникает, когда коллектор нагревается до температуры, вызывающей разность плотностей воды в коллекторе и в вышерасположенном аккумуляторном баке. Разность плотностей является функцией разности температур, поэтому массовый расход воды зависит от тепловой эффективности коллектора, которая определяет величину этой разности температур. Благодаря указанным обстоятельствам термосифонный гелиоконтур является саморегулирующимся, т.е. повышение степени нагрева коллектора ведет к увеличению в нем массового расхода.

Действие термосифонной системы в условиях нестационарного прихода солнечной радиации носит сложный характер. Исследованию этого вопроса посвящены работы ряда зарубежных авторов [26,28,29,30,31].

Леф и Клоуз [28], а также Купер [26] установили путем наблюдений, что в широком интервале условий температура воды в коллекторах систем с естественной циркуляцией повышается приблизительно на 10°C.

Клоуз [29] разработал аналитическую модель системы с термосифонной циркуляцией для ясной погоды и без отбора горячей воды в течение дня, предполагая, что зависимость солнечной радиации и температуры окружающего воздуха от времени - синусоидальная. Им было получено дифференциальное уравнение, описывающее изменение средней температуры воды в баке-аккумуляторе в зависимости от времени кубическое уравнение для массового расхода теплоносителя.

Автор не приводит решения этих уравнений, а ограничивается лишь численным расчетом, выполненным методом конечных разностей для установки на которой были проведены натурные испытания. Его результаты подтверждают предложение, что для таких систем, если они правильно спроектированы и не имеют существенных нарушений потока, характерно повышение температуры на 10°C.

Гупта и Гарг [13] модифицировали модель Клоуза для учета емкости системы и КПД коллектора. Рассмотрев изменения температуры воды на входе и выходе для двух коллекторов различных конструкций, полученные расчетным и экспериментальным путем, они также установили, что повышение температуры воды в коллекторах почти постоянно в течение дня.

Учитывая это обстоятельство, Даффи и Бекман [26] рассмотрели более простую модель процесса, в которой принимается постоянное повышение температуры воды в коллекторе, например на 10°C, и при этом условии проводится расчет расхода воды, соответствующего данному перепаду  $\Delta t$  для вычисленной производительности коллектора.

В коллекторе, работающем при  $\Delta t$  порядка 10°C, вода проходит через коллектор несколько раз в течение суток. Тейбор [31] рассмотрел иной режим работы коллектора, состоящий в том, что за счет соответствующего увеличения гидравлического сопротивления в контуре системы вода, содер-

жащаяся в баке, проходит через коллектор один раз в сутки, но при высоком значении перепада  $\Delta t$ . Им рассчитано, что за счет более высокой степени стратификации в баке суточная эффективность "одноцикловой" системы с высоким  $\Delta t$  будет примерно равна эффективности "многоцикловой" системы с более низким  $\Delta t$ . Однако эксплуатационная готовность "одноцикловой" системы выше "многоцикловой" - за счет получения на выходе коллектора в течении короткого времени работы гелиоустановки небольшой массы воды с расчетной температурой.

Определению влияния кратности циркуляции воды, содержащейся в баке, на суточную эффективность термосифонной системы посвящен ряд работ [32,33].

Гордон и Зерми [32] на основе анализа влияния расхода теплоносителя в термосифонной гелиосистеме на ее эффективность пришли к выводу, что она практически не зависит от кратности циркуляции по контуру коллектор-бак-аккумулятор. С целью обобщения этого заключения они разработали модель работы термосифонной гелиосистемы без водоразбора для квазистационарного режима при незначительности эффектов перемешивания воды в баке и линейной зависимости КПД коллектора от режимных параметров системы, использовав уравнение Хотелля-Уиллера-Блиса

$$Q = F_R [E(\tau\alpha) - U_L(t_1 - t_b)], \quad (1.1)$$

$$\text{где} \quad F_R = \frac{gC_p}{U_L} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{U_L \cdot F'}{gC_p} \right) \right]. \quad (1.2)$$

При сравнении эффективности одноциклового и многоциклового нагрева, авторы учитывали изменение температуры воды  $t_1$  на выходе в коллектор от цикла к циклу, а удельный расход воды  $g$  в одноцикловом нагреве принимался в  $n$  раз меньшим, чем при многоцикловом.

Колларис [33] считает, что принцип проточности для солнечных водонагревателей весьма эффективен и в условиях принудительной циркуляции.

К этому выводу автор пришел на основе расчетов, выполненных для четырех разных типов солнечных коллекторов с многократной (от 1,5 до 3) принудительной циркуляцией и однократной термосифонной, в которой расход воды в 5 - 10 раз меньше, чем в циркуляционных. Показано, что при одинаковой площади солнечного коллектора проточный водонагреватель с естественной конвекцией получить примерно на 25 % больше энергии, чем циркуляционный.

В работе А.А.Валюжинича, Ю.А. Мышко и др. [34] приведен расчет теплопроизводительности одноконтурной солнечной установки при разных расходах воды в циркуляционном контуре. Отмечается, что в диапазоне удельных расходов  $8 \div 10 \text{ кГ/м}^2\cdot\text{ч}$  как КПД установки, так и степень обеспеченности потребителя имеют максимум, а в области расходов  $36 \div 108 \text{ кГ/м}^2\cdot\text{ч}$  происходит снижение КПД в ростом  $g$ . Наличие максимума объясняется тем, что удельный воды оказывает противоположное влияние на различные составляющие тепловых потерь установки.

Снижение эффективности системы, как с ростом, так и с уменьшением удельного расхода в гелиоконтуре по сравнению с его значениями, близкими к удвоенной величине коэффициента потерь  $gC_p = 2U_L$  ( $g = 10 \div 13 \text{ кГ/м}^2\cdot\text{ч}$ ), отмечается также в работах М.Д. Рабиновича, А.Р. Ферта [35], Котнея [136] и Сакадюре [137]. Последнее, с учетом того, что оптимальная вместимость бака-аккумулятора лежит в пределах  $50 \div 100 \text{ л на квадратный метр площади коллектора}$  [38], соответствует по продолжительности удельному расходу в режиме однократного нагрева.

Таким образом можно констатировать, что имеются различные оценки влияния кратности циркуляции на суточную эффективность термосифонных систем. В одних работах [31,32] утверждают, что кратность циркуляции не оказывает практического влияния на эффективность системы, а в других работах [33] считают более эффективными (на 25%) проточные системы. Поэтому данный вопрос нуждается в уточнении.

Характерной особенностью рассмотренных работ является то, что в них не анализируется влияние различных факторов на температурную стабильность воды при однократном и многократном нагреве, а при сравнении не установлены области, в которых  $n$  оказывает существенное влияние на теплопроизводительность системы. Отмечая наличие саморегулируемости в системе с термосифонной циркуляцией, авторы не дают количественной оценки данному явлению. Это затрудняет проектирование системы с термосифонной циркуляцией, обладающей заданной температурной стабильностью горячей воды.

Обзор отечественных и зарубежных источников свидетельствует об отсутствии методики гидравлического расчета гелиоконтура с термосифонной циркуляцией, учитывающей температурную стабильность нагрева горячей воды. В частности, в рекомендациях по расчету и пробированию систем горячего водоснабжения с солнечными водонагревательными установками [39], гидравлический расчет таких систем рекомендуется производить обычным путем, т.е. без оценки степени саморегулируемости.

### **1.3. Цель и задачи исследования**

На основе выполненного аналитического обзора литературы можно сформулировать цель и задачи исследования.

**Цель работы** – повышение эффективности саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения.

**Исходя из поставленной цели, задачами исследования явились:**

1. Анализ существующих конструктивных решений систем солнечного горячего водоснабжения и выявление наиболее перспективных.
2. Разработать схемно-технологические решения саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения.
3. Выявить закономерности процессов саморегулирования в термосифонных системах солнечного горячего водоснабжения.

4. Разработать физико-математическую модель работы саморегулирующегося термосифонного гелиоконтура;
5. Получить аналитические зависимости для расчёта температуры воды на выходе из солнечного коллектора, а также зависимости для расчёта относительной стабильности температуры горячей воды на выходе из солнечного коллектора;
6. Оценить влияние кратности циркуляции на суточную эффективность термосифонной системы.

### **Выводы по I главе**

На основе выполненного аналитического обзора литературы можно сделать следующие выводы:

1. Системы солнечного теплоснабжения становятся все более популярными во многих странах мира. Мировой опыт применения солнечных коллекторов показывает, что солнечные системы теплоснабжения могут быть эффективными и надежными для обеспечения горячего водоснабжения.

2. Системы типа «моноблок» и малые термосифонные системы могут быть как одно-, так и двухконтурными, устанавливаются на открытом воздухе и характеризуются повышенными теплопотерями накопительного бака-аккумулятора. В отличие от «моноблока» в малых системах солнечные коллекторы и баки-аккумуляторы выполняются раздельно и могут устанавливаться как вместе на единой опорной конструкции, так и на расстоянии друг от друга, ограниченном гидравлическим сопротивлением коллекторного контура.

3. Правильный выбор принципиальных схем систем солнечного горячего водоснабжения во многом определяет экономическую целесообразность использования солнечной энергии. В южных районах республики, климат которых наиболее благоприятен, из общего количества тепла, расходуемого жилищно-коммунальным сектором, 50-70% расходуется на горячее водоснабжение. Это обстоятельство, а также то, что к горячему водоснабже-

нию предъявляются менее жесткие требования по надежности, чем к отоплению, дает основание считать, что первым этапом внедрения солнечных систем является горячее водоснабжение.

4. Наиболее просты по устройству одноконтурные системы с естественной циркуляцией. Недостаток двухконтурных термосифонных систем – низкая тепловая эффективность, вызванная малыми скоростями движения теплоносителя. Для ее повышения в крупных системах, как правило, используют принудительную циркуляцию.

5. Получение потребителем воды с заданной температурой - основной показатель нормальной работы систем горячего водоснабжения. Одним из явлений, ухудшающих комфортность пользования гелиосистемами горячего водоснабжения, является колебание температуры отбираемой воды, связанные с изменением интенсивности солнечной радиации в течение дня.

6. Установки, использующие термосифонную циркуляцию для приготовления горячей воды, характеризуются обычно низкой эксплуатационной готовностью, в связи с чем потребитель обеспечивается горячей водой только во второй половине дня. Объясняется это тем, что в широком интервале условий температура воды в солнечных коллекторах систем с естественной циркуляцией повышается в среднем на  $10^{\circ}\text{C}$  и для приобретения нужной температуры необходим многоцикловой ее нагрев.

7. Обзор отечественных и зарубежных источников свидетельствует об отсутствии методики гидравлического расчета гелиоконтура с термосифонной циркуляцией, учитывающей температурную стабильность нагрева горячей воды.

## ГЛАВА II. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ САМОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

### 2.1. Температурная стабильность горячей воды в режимах однократного и многократного нагрева

Рассмотрим режим работы разомкнутого гелиоконтура с патрубком излива при однократном нагреве (рис.2.1.) [40,41].

Запишем уравнение, связывающее располагаемое естественное давление с гидравлическими потерями и свободным динамическим давлением излива

$$\Delta p_t = \Delta p_w + \rho_2 g h_2 + p_{C\partial}. \quad (2.3)$$

С другой стороны величина  $\Delta p_t$  определяется:

$$\Delta p_t = g h_1 (\rho_1 - \rho_2) \quad (2.4)$$

Учитывая, что плотность воды с точностью  $\pm 0,2\%$  можно выразить линейной зависимостью от температуры:

$$\rho_1 = at_1 + b; \quad (2.5)$$

$$\rho_2 = at_2 + b; \quad (2.6)$$

выражение (5.4) можно переписать в виде

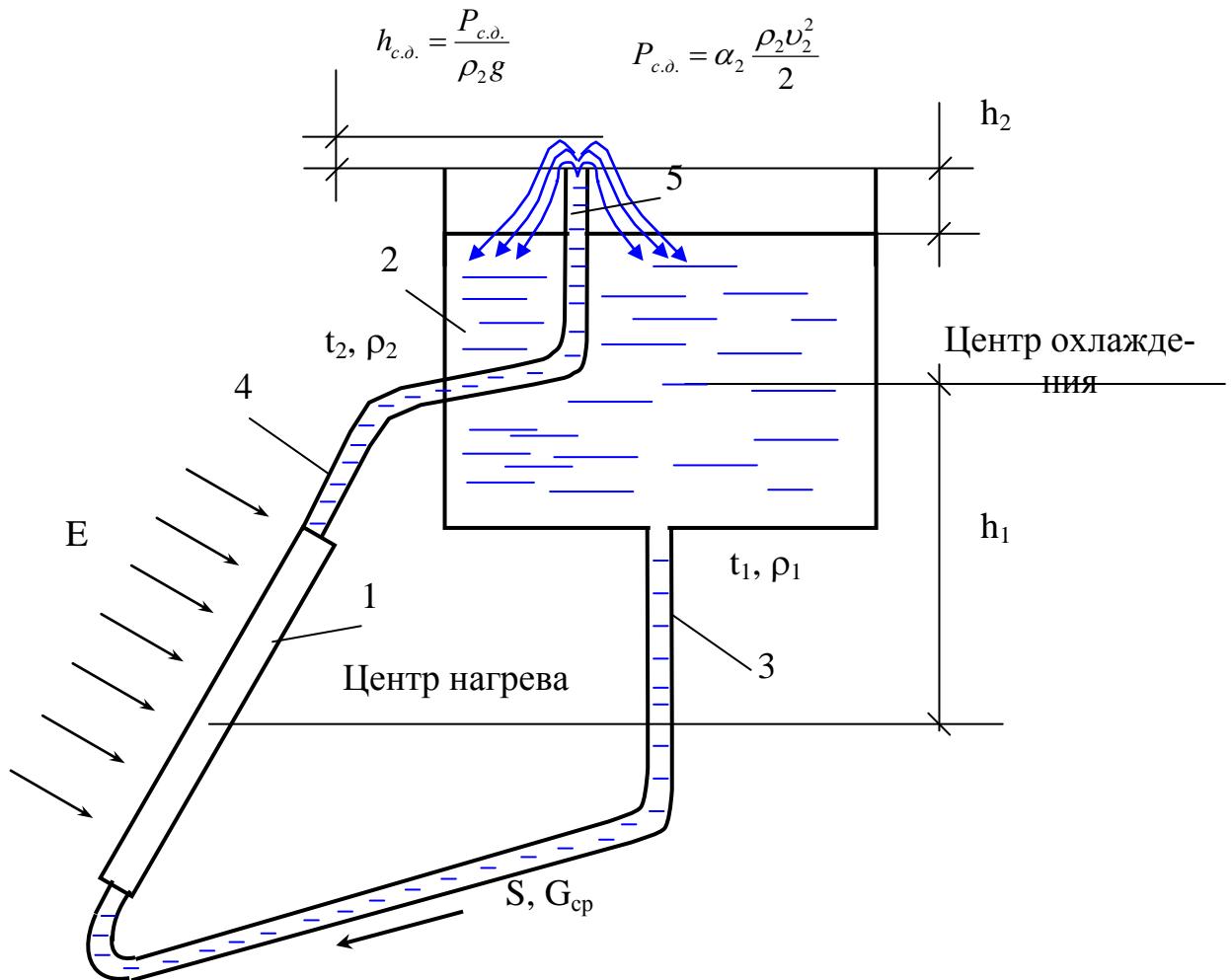
$$\Delta p_t = a g h_1 (t_1 - t_2) \quad (2.7)$$

Потери давления в циркуляционном контуре на трение и местные сопротивления равны

$$\Delta p_w = SG^2 \quad (2.8)$$

Свободное динамическое давление излива, с учетом (3.18) и (3.8), можно выразить через удельное динамическое давление

$$p_{c\partial} = \alpha_2 \frac{\rho_2 W_2^2}{2} = \alpha_2 A G^2. \quad (2.9)$$



**Рис. 2.1. Расчетная схема гелиоконтура с термосифонной циркуляцией при одноцикловом нагреве:**

1 - солнечный коллектор; 2 - бак-аккумулятор; 3,4 - обратный и подающий трубопровод; 5-патрубок излива.

Из условия теплового баланса солнечного коллектора имеем

$$Q_T = \eta E = C_p G (t_2 - t_1). \quad (5.10)$$

Подставляя в (2.3) выражения (2.7), (2.8), (2.9) с учетом (2.6) и (2.10) получим

$$-agh_1(t_2 - t_1) = (S + \alpha_2 A) \frac{\eta^2 E^2}{C_p^2 (t_2 - t_1)^2} + gh_2(at_2 + b) \quad (2.11)$$

Решая (2.11) относительно температуры  $t_2$ , находим

$$t_2 = \sqrt[3]{-L + \sqrt{L^2 + M^3}} + \sqrt[3]{-L - \sqrt{L^2 + M^3}} - N \quad (2.12),$$

где

$$\begin{aligned} L &= \frac{[bh_2 - at_1(3h_1 + 2h_2)]^3}{27a^3(h_1 + h_2)^3} - \frac{[bh_2 - at_1(3h_1 + 2h_2)][at_1^2(3h_1 + h_2) - 2bh_2t_1]}{6a^2(h_1 + h_2)^2} + \\ &+ \frac{(bh_2 - ah_1t_1)t_1^2}{2a(h_1 + h_2)} + \frac{(S + \alpha_2 A)\eta^2 E^2}{2c_p g a (h_1 + h_2)} \\ M &= \frac{3a(h_1 + h_2)[at_1^2(3h_1 + h_2) - 2bh_2t_1] - [bh_2 - at_1(3h_1 + 2h_2)]^2}{9a^2(h_1 + h_2)^2} \\ N &= \frac{bh_2 - ah_1(3h_1 + 2h_2)}{3a(h_1 + h_2)} \end{aligned}$$

В силу громоздкости полученной формулы (2.12) вычисления по ней рекомендуется осуществлять на ЭЦВМ, используя при этом разработанную программу, рис.2.2.

В случае, когда  $(S + \alpha_2 A) \rightarrow 0$  из (2.11) имеем

$$t_2 = \frac{ah_1t_1 - h_2b}{a(h_1 + h_2)}. \quad (2.13)$$

Из (2.13) видно, что при  $(S + \alpha_2 A) \rightarrow 0$ , температура горячей воды  $t_2$  не зависит от интенсивности солнечной радиации, а определяется лишь температурой холодной воды  $t_1$  при постоянных  $h_2$  и  $h_1$ , т.е. система полностью саморегулируема. Следовательно, при проектировании гелиоконтура необходимо максимально снижать гидравлические потери и свободное динамическое давление, обеспечивая требуемое для одноциклового нагрева сопротивление контура гидростатическим столбом излива.

Проведем анализ работы полностью замкнутого гелиоконтура, используя полученные зависимости.

Решая (2.11) относительно  $t_2$  при  $h_2=0$ , находим

$$t_2 = t_1 + \sqrt[3]{\frac{(S + \alpha_2 A)\eta^2 E^2}{-agh_1 C_p^2}}. \quad (2.14)$$

Из полученной формулы видно, что и для замкнутого гелиоконтура с уменьшением гидравлических потерь уменьшается зависимость  $t_2$  от интенсивности солнечной радиации. При  $(S + \alpha_2 A) \rightarrow 0$  система также полностью саморегулируема, однако при этом  $t_2 \rightarrow t_1$ . Последнее, согласно (5.10) возможно для  $Q \neq 0$ , если расход  $G \rightarrow \infty$ .

С возрастанием гидравлических потерь в контуре расход воды ограничивается и возникает разность между температурами  $t_2$  и  $t_1$ , но одновременно, как это следует из формулы (2.14) снижается температурная стабильность горячей воды. Таким образом, в замкнутом гелиоконтуре степень саморегулируемости тем выше, чем меньше повышение температуры за цикл нагрева. Этим, в частности, можно объяснить установленный на основе наблюдений Лёфа и Клоуза [28], а также Купера [26] тот факт, что в широком интервале условий температура воды в коллекторах систем с естественной циркуляцией повышается приблизительно на 10 °C.

При более высоком перепаде температур стабильность нагрева резко ухудшается, поэтому для реализации однократного нагрева разомкнутый контур является предпочтительнее замкнутого.

В реальных условиях эксплуатации гелиосистем наблюдается непрерывное отклонение солнечной радиации и других климатических параметров от номинального (расчетного) значения. В результате таких отклонений неизбежны колебания температуры горячей воды на выходе солнечного коллектора.

Оценим температурную стабильность горячей воды при одноциклическом нагреве, для чего рассмотрим переменный режим работы замкнутого гелиоконтура как наиболее неустойчивого в отношении поддержания заданной температуры.

Для нахождения соответствующих зависимостей воспользуемся уравнением (2.11), которое перепишем в следующем виде: для термосифонной циркуляции с расчетными значениями параметров

$$-agh_1(t_2^* - t_1^*) = (S + \alpha_2 A) \frac{Q_T^{*2}}{C_P^2 (t_2^* - t_1^*)^2}; \quad (2.15)$$

для термосифонной циркуляции с текущими значениями параметров

$$-agh_1(t_2 - t_1) = (S + \alpha_2 A) \frac{Q_T^2}{C_P^2 (t_2 - t_1)^2}. \quad (2.16)$$

Вычитая из последнего уравнения предыдущее, а также введя обозначения

$$\bar{t}_2 = \frac{t_2}{t_2^*} \quad \text{и} \quad \bar{Q}_T = \frac{Q_T}{Q_T^*}, \quad (2.17)$$

находим

$$\bar{t}_2 = 1 + \Pi(\bar{Q}_T^{2/3} - 1), \quad (2.18)$$

$$\Pi = \sqrt[3]{\frac{(S + \alpha_2 A) Q_T^{*2}}{-agh_1 C_P^2 t_2^{*3}}}. \quad (2.19)$$

В дальнейшем величину  $\Pi$  будем называть параметром гелиоконтура.

Заметим, что при равномерном нагреве относительная температура воды на выходе коллектора равна единице. Вследствие этого отклонение неравномерного нагрева воды от равномерного составит

$$r = \bar{t}_2 - 1 = \Pi(\bar{Q}_T^{2/3} - 1) \quad (2.20)$$

На рис. 2.3 показана зависимость  $r$  от  $\Pi$  при разных значениях  $\bar{Q}_T$ . Из графика видно, что при расчетной теплопроизводительности отклонения равны нуля независимо от параметра гелиоконтура, а с ее увеличением или уменьшением - непрерывно возрастают по абсолютной величине. Причем, если за номинальную теплопроизводительность  $Q_T^*$  принята треть от максимальной, то положительные и отрицательные отклонения при экстремальных значениях теплопроизводительности ( $\bar{Q}_T=0$  и  $\bar{Q}_T=3$ ) почти равны между собой. Однако при этом относительная продолжительность работы ( $\bar{\tau}_3^+$ ) гелиоконтура на повышенных температурах (превышающих номинальное значение в допустимых пределах) будет в 3,6 раза больше продолжительности работы ( $\bar{\tau}_3^-$ ) на пониженных температурах, так как, теплопроизводительность коллектора, следуя интенсивности солнечной радиации, изменяется по синусоидальному закону (рис.2.4). Это несколько снижает среднедневной КПД солнечного коллектора.

Равная продолжительность работы гелиоконтура на повышенных и пониженных температурах наступает при  $Q_T^* \approx 0,71 Q_T^{\max}$ , после чего наблюдается более длительная его работы на пониженных температурах.

Данное обстоятельство позволяет сделать вывод, что с точки зрения обеспечения высокого КПД коллектора и стабильности нагрева номинальная теплопроизводительность должна находиться в следующих пределах  $0,71 Q_T^{\max} < Q_T^* \leq 0,83 Q_T^{\max}$  ( $1,2 \leq \bar{Q}_T^* \leq 1,4$ ).

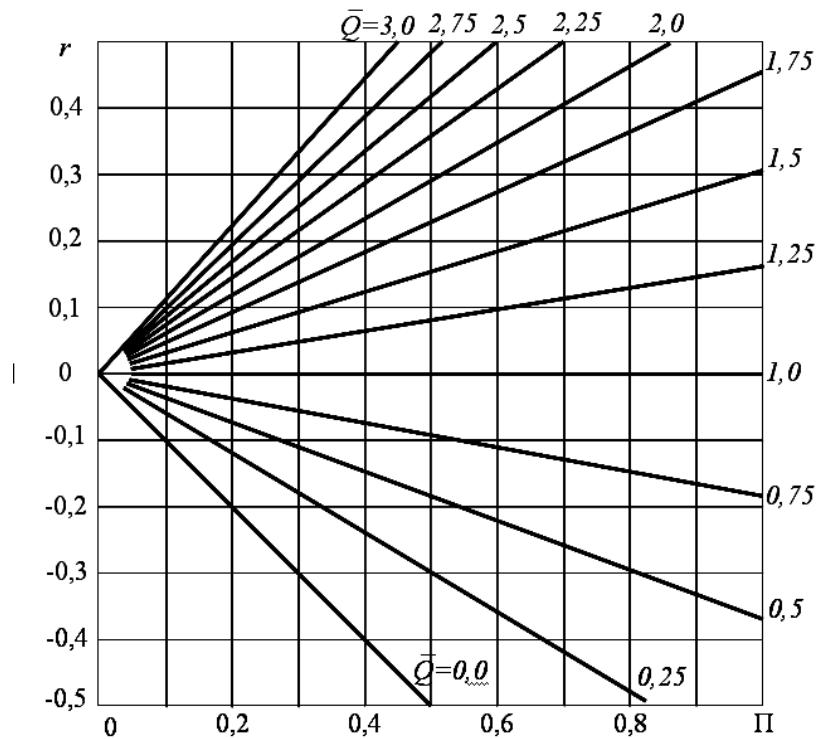


Рис.2.2. Зависимость относительного отклонения от параметра гелиоконтура при разных значениях относительной теплопроизводительности солнечного коллектора

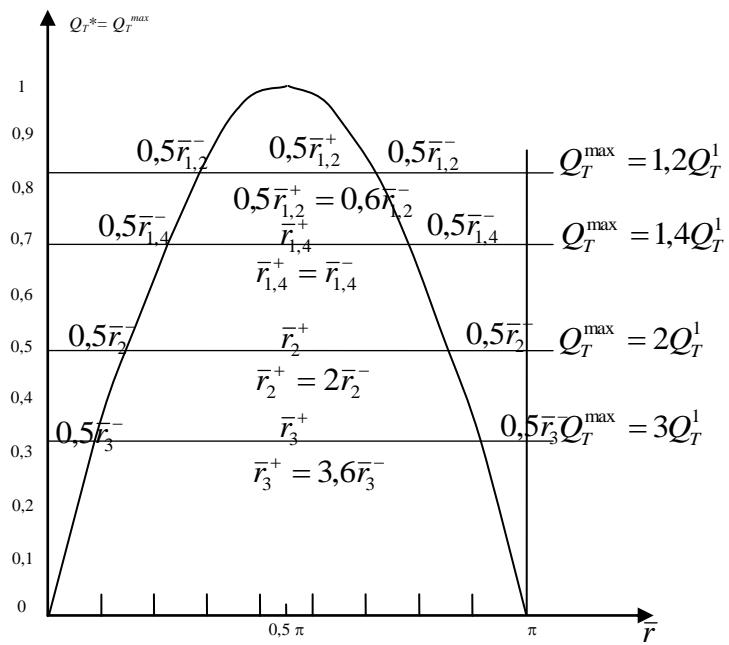


Рис.2.3. Зависимость относительной продолжительности работы гелиоконтура на повышенных и пониженных температурах от соотношения номинальной и максимальной теплопроизводительности

Формулу (2.20) можно использовать при гидравлическом расчете гелиоконтура.

## 2.2. Влияние кратности циркуляции на суточную эффективность термосифонной системы

Увеличение кратности циркуляции в термосифонной системе сопряжено с факторами, оказывающими противоположное влияние на ее суточную эффективность. Так если возрастание кратности приводит, с одной стороны, к интенсификации отвода тепла из коллектора, вследствие увеличения удельного расхода, то с другой стороны - к росту температуры воды, питающей коллектор.

Априорное решение вопроса какой из данных факторов является преувеличивающим затруднено. Поэтому для оценки влияния кратности циркуляции  $n$  на эффективность термосифонной системы сопоставим ее суточную производительность в режимах однократного и многократного нагрева.

В силу сложности действия термосифонной системы в нестационарных условиях, проведем упрощенный анализ, чтобы определить, желательно ли более детальное исследование вопроса.

Предположим, что одно и тоже количество воды массой  $M$  и начальной температурой  $t_H$ , нагревается в коллекторе в течение дня при разных удельных расходах  $g_1$  и  $g_2$  (рис.2.5). Причем  $g_1$  удельный расход при котором вся масса воды  $M$  за время работы установки  $\Delta\tau$  проходит через коллектор один раз, а при  $g_2$  -  $n$  раз. Пусть конечная температура воды в баке  $t_k$  определяется эффективностью работы коллектора в сравниваемых режимах. Условия работы коллектора считаем стационарными, тепловыми потерями от трубопроводов и аккумуляторного бака пренебрегаем. Допустим также, что в режиме многократного нагрева в аккумуляторном баке происходит идеальное расслоение воды.

Согласно принятой постановке задачи, суточная теплопроизводительность коллектора в режиме однократного нагрева с расходом  $g_1$

$$Q_0 = \frac{Mc_p}{U_{Lo}} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{U_{Lo} \cdot F'}{g_1 C_p} \right) \right] [E(\tau a) - U_{Lo}(t_H - t_b)], \quad (2.21)$$

где  $M = g_1 \Delta \tau$  - удельная вместимость аккумуляторного бака,  $\text{kG/m}^2$ .

Суточную теплопроизводительность коллектора в режиме многократного нагрева определим как сумму теплопроизводительностей  $Q_i$   $n$ - циклов однократного нагрева с расходом  $g_2 = n g_1$

$$Q_M = \sum_{i=1}^n Q_i = \frac{Mc_p}{U_{LM}} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{U_{LM} \cdot F'}{ng_1 C_p} \right) \right] \sum_{i=1}^n [E(\tau a) - U_{LM}(t_i - t_b)], \quad (2.22)$$

или учитывая, что

$$t_i = t_H + \frac{1}{U_{LM}} [E(\tau a) - U_{LM}(t_H - t_B)] \left\{ 1 - \exp \left[ (i-1) \left( -\frac{U_{LM} \cdot F'}{ng_1 C_p} \right) \right] \right\} \quad (2.23)$$

находим

$$Q_M = \frac{Mc_p}{U_{LM}} \left[ 1 - \exp \left( -\frac{U_{LM} \cdot F'}{g_1 C_p} \right) \right] [E(\tau a) - U_{LM}(t_H - t_B)] \quad (2.24)$$

Разделив (5.21) на (5.24), получим

$$\frac{Q_0}{Q_M} = \frac{U_{LM} \left[ 1 - \exp \left( -U_{Lo} F' / g_1 C_p \right) \right] [E(\tau a) - U_{Lo}(t_H - t_B)]}{U_{Lo} \left[ 1 - \exp \left( -U_{LM} F' / g_1 C_p \right) \right] [E(\tau a) - U_{LM}(t_H - t_B)]} \quad (2.25)$$

Из (2.25) следует, что влияние кратности циркуляции на эффективность коллектора выражается только через величину общего коэффициента потерь  $U_L$ , которая зависит и от средней температуры поглощающей панели (рис. 2.6), а значит и от  $n$ . При  $U_{Lo} = U_{LM}$  кратность циркуляции не влияет на суточную теплопроизводительность коллектора,  $Q_0 / Q_M = 1$ .

Для определения  $U_{LO}$  и  $U_{LM}$  необходимо знать соответствующую среднюю температуру поглощающей панели  $\bar{t}_{no}$  и  $\bar{t}_{nm}$ . Однако она зависит от эффективности коллектора при однократном и многократном нагреве и, следовательно, расчет должен проводиться методом итераций [1]. Поэтому для упрощения анализа рассмотрим предельные значения  $U_L$  в режимах однократного и многократного нагрева воды от 10 до 60 °C, используя данные работы [5] (рис.2).

При однократном нагреве с  $g \rightarrow 0$  среднюю температуру поглощающей панели можно принять равной температуре жидкости на выходе коллектора,  $\bar{t}_{no} = t_{b_{bx}} = 60$  °C. Тогда для самых неблагоприятных климатических условий работы коллектора в летний период ( $W_e = 3,9 \div 4,2$  м/с;  $t_e = 12 \div 20$  °C) имеем  $U_{LO} = 8,9$  Вт/м<sup>2</sup>°C (см. рис.2). При многократном нагреве с  $g \rightarrow \infty$  и  $n \rightarrow \infty$  можно полагать  $\bar{t}_{nm} = 0,5(t_{Bx} + t_{Bb_{bx}}) = 35^0C$ , т.е.  $U_{LM} = 8,0$  Вт/м<sup>2</sup>°C. Таким образом при предельных значениях  $g$  и  $n$  общий коэффициент потерь  $U_L$  в режимах однократного и многократного нагрева воды от 10 до 60 °C отличается не более 10%.

Принимая линейное изменение  $U_L$  от  $\bar{t}_n$ , а также учитывая, что первый предельный случай справедлив при  $g=1 + 2$  кГ/м<sup>2</sup>ч, а второй при  $g>20$  кГ/м<sup>2</sup>ч [5], т.е. для  $n > 10$ , можно записать

$$U_{LM} = (1,01 - 0,01n)U_{LO} \quad \text{для } 1 \leq n \leq 11 \quad (2.26)$$

Подставив (5) в (6), считая  $t = t = 10$  °C, находим

$$\frac{Q_o}{Q_M} = (1,01 - 0,01) \frac{1 - \exp(-U_{LO} \bullet F^1 / g_1 C_p)}{1 - \exp[-(1,01 - 0,01n)U_{LO} \bullet F^1 / g_1 C_p]} \quad (2.27)$$

Как следует из рис. 2.3, где представлен график, построенный по формуле (2.27), преимущества многократного нагрева уменьшаются с ростом  $g_1$ .

При  $g_1 C_p > 2U_{LO} F^1$  использование многократного нагрева с кратностью

$n=10$  обеспечивает увеличение суточной теплопроизводительности коллектора всего лишь на 2%. Следовательно можно считать, что дальнейшее увеличение не приводит к заметному возрастанию теплопроизводительности коллектора.

При малых удельных расходах, характеризуемых параметром (порядка 3-4  $\text{кГ}/\text{м}^2\text{ч}$ ) заметное увеличение (от 3 до 7 %) теплопроизводительности коллектора наблюдается только при  $n > 5$ , т.е. за пределами реальных ( $n = 1,5 - 3$ ) кратностей циркуляции, наблюдаемых в термосифонных системах кратность циркуляции практически не влияет (разница составляет менее 1,5%) на суточную теплопроизводительность солнечного коллектора.

### **2.3. Гидравлический расчет гелиоконтура с термосифонной циркуляцией**

Гидравлический расчет гелиоконтура с термосифонной циркуляцией представляет собой отдельный этап проектирования гелиосистемы горячего водоснабжения. Он выполняется после теплового расчета установки, на основе которого подбирают необходимое оборудование и производят конструирование системы. Эти вопросы хорошо освещены в литературе [26,38,39] и здесь не рассматривается.

На основе полученных зависимостей (2.19), (2.20) можно предложить следующую методику конструктивного и поверочного расчетов гелиоконтура с термосифонной циркуляцией.

Цель конструктивного расчета - определение диаметра трубопроводов гелиоконтура, обеспечивающих при допустимом отклонении заданную температуру воды на выходе коллектора.

Исходными данными для конструктивного расчета являются; номинальная температура воды ( $t_2$ ) на выходе из установки, максимальная теплопроизводительность ( $Q_t^{\max}$ ) и допустимое относительное отклонение температуры ( $r$ ).

Расчет ведется в следующей последовательности :

1) вычисляет параметр гелиоконтура приняв задавшись (из конструктивных соображений) вертикальным расстоянием, находят расчетную характеристику сопротивление гелиоконтура при которой обеспечиваются заданная стабильность нагрева и в соответствии с ней подбирают диаметры трубопроводов;

3) рассчитывают конструктивную характеристику сопротивление гелиоконтура для принятых диаметров трубопроводов, определяя характеристики сопротивления отдельных элементов контура по вышеизложенной методики (см.п.3.6), и сравнивают ее с расчетной.

Если  $(S + \alpha_2 A)_{\text{кон.}} \approx (S + \alpha_2 A)$  то расчет закончен. В случае неравенства  $(S + \alpha_2 A)_{\text{кон.}} \neq (S + \alpha_2 A)$  следует скорректировать величину  $h_1$  и диаметры трубопроводов так, чтобы новые значения  $(S + \alpha_2 A)_{\text{кон.}}$  и  $(S + \alpha_2 A)$  были одинаковыми.

Проверочный расчет выполняется для полностью известной конструкции гелиоконтура с целью определения величин относительного ( $r$ ) и абсолютного ( $\Delta t$ ) отклонений температуры на выходе коллектора.

Исходными данными для проверочного расчета является:  $Q_T^{\max}$ , диаметры трубопроводов гелиоконтура .

Расчет ведется в следующей последовательности:

- 1) вычисляют характеристику сопротивления гелиоконтура для заданной конструкции  $(S + \alpha_2 A)$ ;
- 2) находят параметр гелиоконтура по формуле (2.19);
- 3) вычисляют величину относительного отклонения температуры
- 4) подсчитывают температуры воды на выходе из коллектора при максимальной теплопроизводительности
- 5) находит величину абсолютного отклонения температуры на выходе коллектора

$$\Delta t = t_2^{\max} - t_2$$

## Выводы по II главе

На основе выполненных теоретических исследований можно сделать следующие выводы:

1. Оценена температурная стабильность горячей воды в режимах однократного и многократного нагрева. Получено уравнение, связывающее располагаемое естественное давление с гидравлическими потерями и свободным динамическим давлением излива. Показано, что при  $(S + \alpha_2 A) \rightarrow 0$ , температура горячей воды  $t_2$  не зависит от интенсивности солнечной радиации, а определяется лишь температурой холодной воды  $t_1$  при постоянных  $h_2$  и  $h_1$ , т.е. система полностью саморегулируема.

2. При проектировании гелиоконтура необходимо максимально снижать гидравлические потери и свободное динамическое давление, обеспечивая требуемое для одноциклового нагрева сопротивление контура гидростатическим столбом излива  $h_2$ .

3. С возрастанием гидравлических потерь в контуре расход воды ограничивается и возникает разность между температурами  $t_2$  и  $t_1$ , но одновременно снижается температурная стабильность горячей воды.

4. В замкнутом гелиоконтуре степень саморегулируемости тем выше, чем меньше повышение температуры за цикл нагрева. Этим, в частности, можно объяснить установленный на основе наблюдений Лёфа и Клоуза, а также Купера тот факт, что в широком интервале условий температура воды в коллекторах систем с естественной циркуляцией повышается приблизительно на 10 °C.

5. Выполнена оценка влияния кратности циркуляции на суточную эффективность термосифонной системы. Увеличение кратности циркуляции в термосифонной системе сопряжено с факторами, оказывающими противоположное влияние на ее суточную эффективность. Так если возрастание кратности приводит, с одной стороны, к интенсификации отвода тепла из коллектора, вследствие увеличения удельного расхода, то с другой стороны - к росту температуры воды, питающей коллектор.

При малых удельных расходах, характеризуемых параметром (порядка 3-4  $\text{кГ}/\text{м}^2\text{ч}$ ) заметное увеличение (от 3 до 7 %) теплопроизводительности коллектора наблюдается только при  $n > 5$ , т.е. за пределами реальных ( $n = 1,5 - 3$ ) кратностей циркуляции, наблюдаемых в термосифонных системах кратность циркуляции практически не влияет (разница составляет менее 1,5%) на суточную теплопроизводительность солнечного коллектора.

5. Разработан метод гидравлического расчета гелиоконтура с термосифонной циркуляцией, учитывающий температурную стабильность подогреваемой воды.

## ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СА- МОРЕГУЛИРУЮЩИХСЯ СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

### 3.1. Экспериментальная гелиоустановка и методика исследований

Эксперименты по проверке теоретических решений проводились на экспериментальной гелиоустановке (рис.3.1), содержащей гелиоприемник, баке горячей и холодной воды, систему соединительных трубопроводов, мерную емкость, запорно-регулировочную арматуру и контрольно-измерительные приборы (рис.3.2).

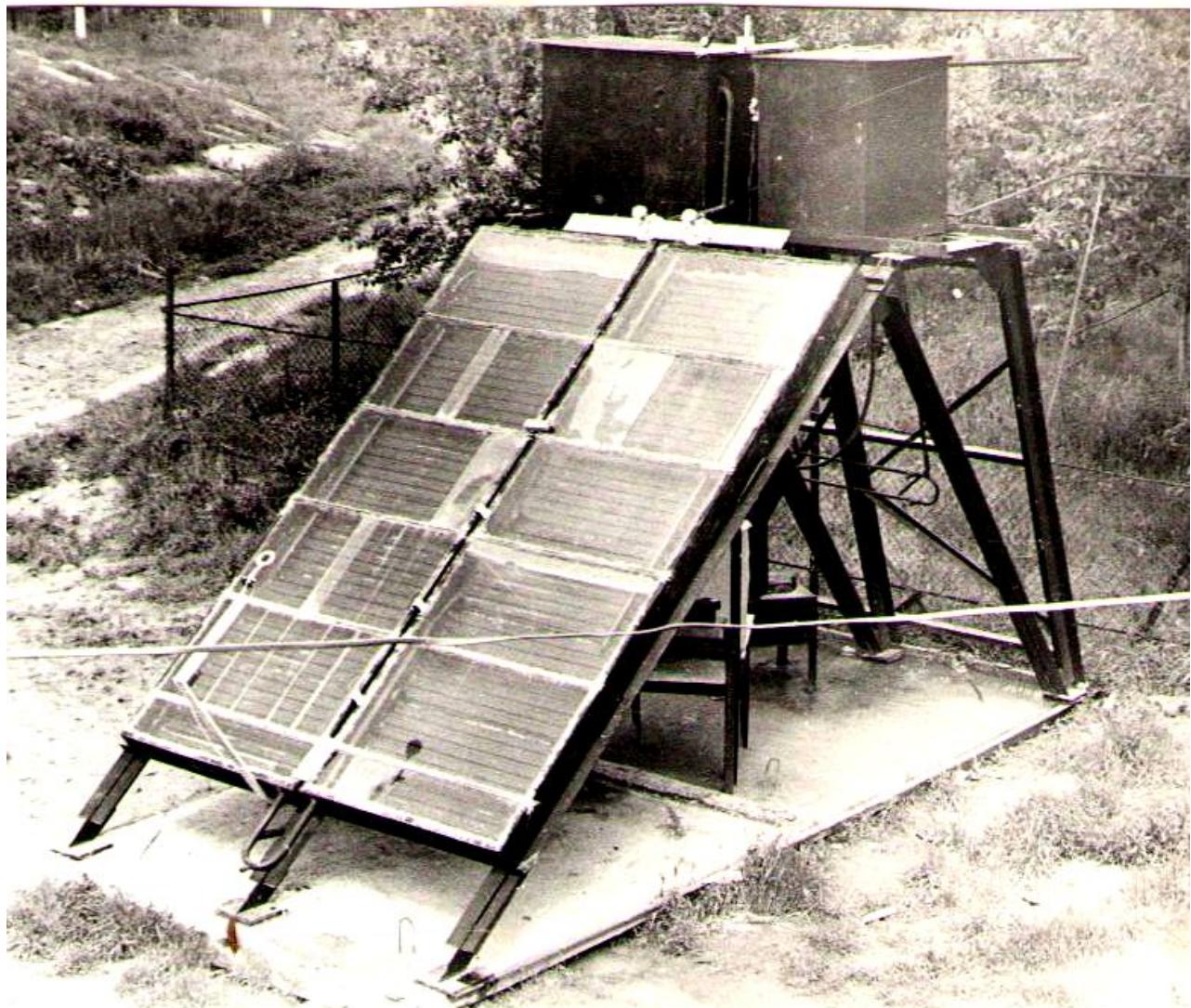
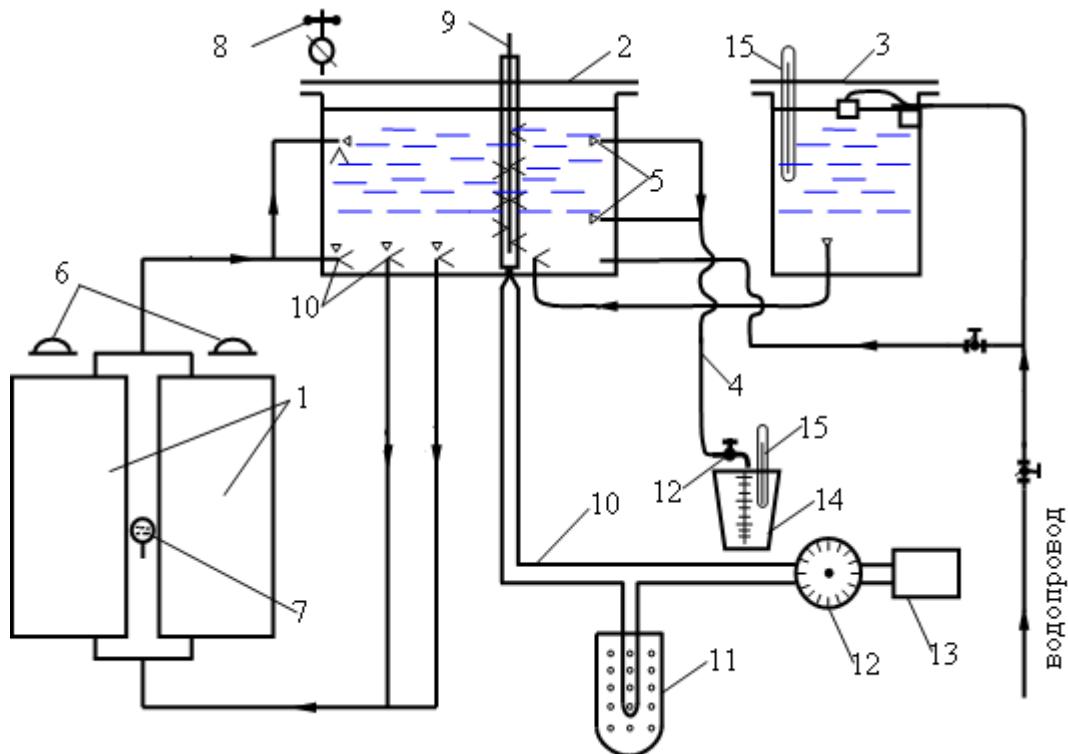


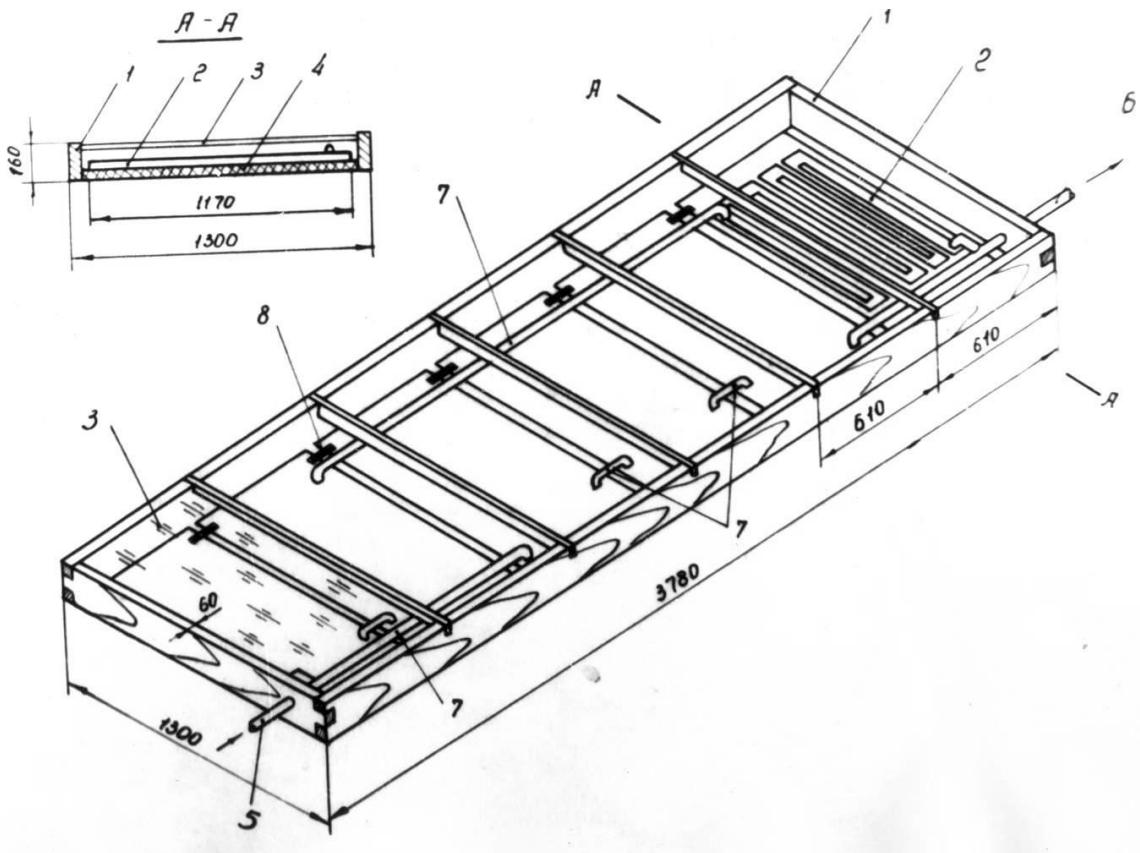
Рис.3.1. Экспериментальная гелиоустановка



**Рис.3.2. Принципиальная схема экспериментальной гелиоустановки:**

1-гелиоприёмник; 2-бак горячей воды; 3-бак холодной воды; 4-трубопровод отбора горячей воды; 5-заглушка; 6-пиранометр; 7-балансомер; 8-чашечный анемометр; 9-выдвижная линейка с термопарами; 10-термопара; 11-сосуд Дьюара; 12-переключатель термопар; 13-потенциометр ПП-63; 14-мерный сосуд; 15- термометр

Гелиоприемник (рис.3.3) представлял из себя деревянный ящик 1, утепленный снизу изоляцией 4 (слой стекловаты  $\delta=40$  мм) и закрытый сверху одинарным остеклением 3. Во внутрь ящика были встроены окрашенные в черный цвет шесть стальных штампованных радиаторов 2 марки 3С-11-7. Рабочая площадь гелиоприемника составляла  $4,9 \times 2$  м<sup>2</sup>, угол наклона к горизонту был равен 40°.



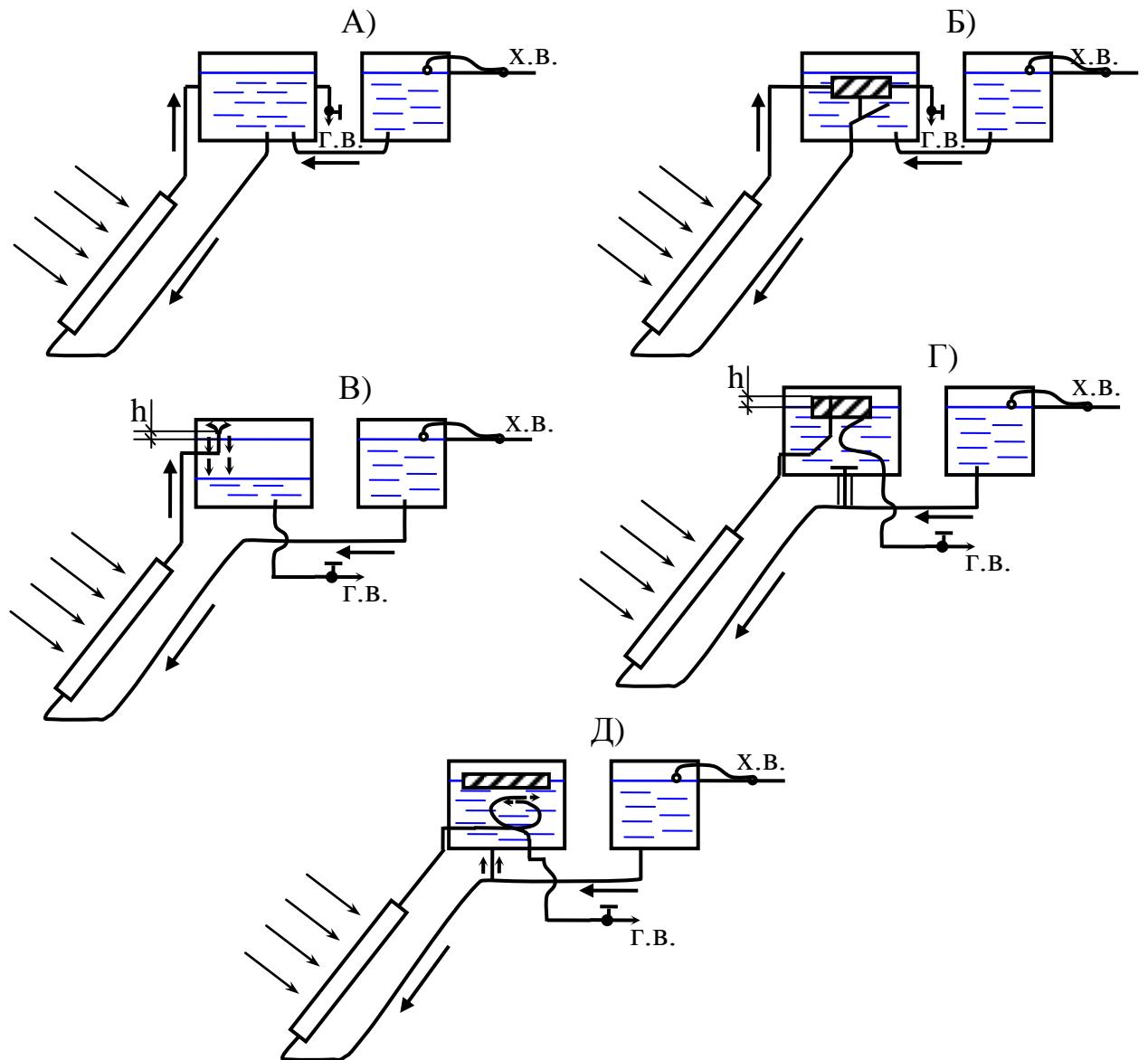
**Рис.3.3. Конструкция гелиоприёмника:**

1-корпус; 2-стальной радиатор марки ЗС-11-7; 3-остекление; 4-изоляция; 5, 6-входной и выходной патрубки; 7-перемычка

Для использования термосифонной циркуляции баки 2 и 3 емкостью 860 и 580 л были установлены на стальных фермах выше гелиоприемника. Расстояние от центра нагрева (середина гелиоприемника) до центра охлаждения (середина аккумуляторного бака) составляло 1,7м.

Экспериментальная гелиоустановка позволяла проводить эксперименты при различных схемах приготовления горячей воды с помощью солнечной энергии. Для этого изменялась связка баков горячей и холодной воды, а также гелиоприемников путем заглушки части патрубков и соединения других резиновыми шлангами. Кроме того, с этой же целью, были изготовлены патрубки излива, а также различные деревянные и механические поплавки с соответствующими крепежными и соединительными элементами.

Испытаниям были подвергнуты следующие схемы приготовления горячей воды (рис.3.3): традиционная схема А; схема Б с послойным нагревом воды в баке аккумуляторе с помощью подвижного обратного патрубка, прикрепленного к поплавку, удельный вес которого равен удельному весу потребляемой горячей воды ; схемы В и Г с неподвижным и подвижным патрубком излива; схема Д с регулятором расхода в виде наконечника.



**Рис.3.4. Испытанные схемы приготовления горячей воды с помощью солнечной энергии: А – обычная, Б, В, Г, Д – с повышенной эксплуатационной готовностью**

Для всех испытанных схем опыты проводились как в режиме без отбора горячей воды из бака-аккумулятора, так и с отбором воды.

В процессе опытов замерялись следующие параметры: плотность потока суммарной солнечной радиации на поверхности гелиоприемника  $E$ ; температура наружного воздуха  $t_b$ ; скорость ветра в невозмущенном потоке  $W_b$ ; температура холодной водопроводной воды  $t_x$ ; температура воды на входе  $t$  и выходе  $t'$  из гелиоприемника; температура воды по высоте бака-аккумулятора  $t - t_{om}$ ; расход горячей воды.

Суммарную солнечную радиацию измеряли гальванометром ГСА-І-М-А с помощью пиранометра М-80, установленного в плоскости гелиоприемника. Температуру наружного воздуха определяли психрометром, а скорость ветра - чашечным анемометром. Температура воды измерялась хромель-алюмелевыми термопарами, подключенными к потенциометру ПП-63, и ртутными термометрами точностью  $0,1^{\circ}\text{C}$ . Расход горячей воды определяли мерным сосудом. Высоту поднятия патрубка извивая над уровнем воды в баке замеряли штангенциркулем.

Полученные экспериментальные данные были обработаны в соответствии с общепринятой методикой по отрезками времени [26, 43].

При определении тепло производительности установки составляли тепловой баланс бака-аккумулятора с учетом значений температуры в различных слоях воды.

### **3.2. Результаты натурных исследований и их анализ**

Результаты натурных испытаний приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1.

## Результаты натурных испытаний

№	Дата	Схема	$\bar{E}$ , $\frac{Bm}{M^2}$	$\bar{t}_B$ , °C	$\bar{W}_B$ , м/с	$\bar{t}_1$ , °C	$\bar{t}_2$ , °C	$\bar{g}$ , $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$	$n$	г	$\tau_{\text{н.э.}}$ , ч	$Q_{\text{т.}}$ , кВт.ч	$\eta$ , %
1	10.04	А	775	20,5	1,5	28,2	41,0	20,1	2,2	0,19	11.30	27,9	38,6
2	20.04	А	684	21,9	0,7	25,3	36,2	24,8	2,7	0,21	11.30	29,3	46,0
3	4.05	Б	640	22,5	1,3	30,5	45,2	21,5	2,3	0,11	10.10	34,1	57,3
4	5.05	В	628	24,6	0,7	20,5	48,5	11,8	1,0	0,08	9,30	35,7	61,0
5	8.05	Г	628	17,0	1,2	22,5	46,3	10,3	1,1	0,09	9,50	26,5	45,3
6	17.05	Д	629	23,4	1,4	16,5	38,0	10,6	1,2	0,10	10.30	24,8	42,3
7	25.06	А	667	31,8	2,0	35,2	51,7	20,6	2,2	0,24	11.10	36,8	59,2
8	26.06	А	730	31,7	2,9	36,4	53,5	21,4	2,3	0,25	11.05	39,7	58,4
9	27.06	А	758	32,5	3,8	37,2	54,1	29,7	2,5	0,23	11.15	41,5	58,8
10	28.06	А	624	33,6	1,6	38,3	54,2	20,0	2,2	0,26	11.10	34,5	59,3
11	29.06	Б	698	34,0	4,4	36,5	51,7	23,0	2,5	0,13	10.00	37,8	58,2
12	30.06	Б	675	34,2	2,5	35,3	50,6	22,0	2,4	0,12	9.50	36,5	58,0
13	1.07	Б	730	33,0	3,6	34,3	50,3	22,5	2,4	0,11	10,05	38,9	57,3
14	2.07	Б	653	33,5	4,3	38,1	51,8	23,9	2,6	0,12	10.10	35,4	58,3
15	3.07	В	716	34,0	2,6	22,1	53,4	11,8	1	0,07	9.15	40,0	60,0
16	4.07	В	747	34,0	3,5	23,4	54,7	12,2	1	0,08	9.10	41,2	59,3
17	5.07	В	723	33,4	3,0	21,8	53,8	11,3	1	0,09	9.25	39,2	58,2
18	6.07	В	683	33,5	2,1	22,5	54,5	10,8	1	0,11	9.20	37,5	59,0
19	10.07	Г	624	36,0	2,2	22,7	55,4	9,4	1	0,09	9.30	33,3	57,3
20	11.07	Г	671	36,5	1,6	23,4	56,1	10,0	1	0,10	9.30	35,2	56,4
21	12.07	Г	656	34,8	1,2	24,0	54,8	10,7	1	0,10	9.45	35,7	58,4
22	13.07	Г	63	34,0	1,3	24,5	53,4	10,8	1	0,09	9.40	33,8	56,0

№	Дата	Схема	$\bar{E}$ , $Bm$ $M^2$	$\bar{t}_B$ , °C	$\bar{W}_B$ , м/с	$\bar{t}_1$ , °C	$\bar{t}_2$ , °C	$\bar{g}$ , кГ $m^2 \cdot \text{ч}$	$n$	$r$	$\tau_{\text{н.э.}}$ , ч	$Q_{\text{т.}}$ , кВт.ч	$\eta$ , %
23	14.07	Д	719	34,2	1,5	23,5	51,7	13,0	1	0,12	9.50	39,8	59,4
24	15.07	Д	747	34,0	2,6	22,7	50,8	14,3	1	0,11	9.50	42,6	61,2
25	16.07	Д	765	35,8	3,2	24,5	54,8	13,0	1	0,12	9.40	42,5	59,7
26	17.07	Д	768	35,0	4,0	25,3	53,0	13,7	1	0,13	9.40	41,0	57,4
27	20.07	Д	686	28,0	3,8	21,9	51,0	14,9	1	0,12	10.00	35,4	55,4
28	21.07	Д	700	32,0	3,5	22,5	52,0	11,9	1	0,14	9.45	37,9	58,2

Из таблицы видно, что средние значения метеорологических параметров составляли в опытах  $E = 624-775 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ;  $t_e = 17,0-36,5^\circ\text{C}$ ;  $W_e = 0,7-4,4 \text{ м}/\text{с}$ , а режимные параметры установки при различных схемах приготовления горячей воды изменялись в следующих пределах  $t = 21,9 - 38,1 \text{ C}$ ;  $t = 36,2 - 54,7^\circ\text{C}$ ;  $\bar{g} = 10 - 25 \text{ кГ}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

В результате был получен спектр значений эффективности от 0,4 до 0,61.

Кратность циркуляции теплоносителя за время работы установки, которое почти во всех опытах было равно 9,5 часам, изменялась от 1 до 2,7 а параметр  $c_p g / U_L F' = 1,45 - 3,63$ .

Первые шесть экспериментов были проведены без отбора воды из аккумуляторного бака. Из таблицы видно, что в этом режиме наилучшими характеристиками производительности  $Q$ , стабильности нагрева и эксплуатационной готовности обладает схема В с неподвижным патрубком излива горячей воды (см.рис.3.4). Несмотря на отсутствие отбора горячей воды, установки при этой схеме работала в течение всего дня в режиме однократного нагрева с  $\Delta\bar{t} = 28^\circ\text{C}$  и  $\bar{g} = 11,8 \text{ кГ}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ . Чего нельзя сказать о других схемах однократного нагрева Г и Д, при которых отсутствии отбора приведено, после исчерпания запаса холодной воды в баке, к повторному ее нагреве

в коллекторе. Последнее явилось причиной как снижения КПД установки, так и температурной стабильности.

При наличии отбора горячей воды из аккумулятора схема В также показала наилучшие характеристики. Эффективность системы при этой схеме составила 0,58 - 0,6, что не хуже эффективности традиционной (0,58 - 0,59), работающей с многократным нагревом ( $n = 2,2-2,5$ ) по схеме А (опыты № 7-10). Эксплуатационная готовность схемы В при этом выше традиционной на 1,5 - 2 часа.

Однократной нагрев по схеме Г незначительно уступает по эффективности нагрева по схеме В (см. опыты № 15-22). Объясняется это по-видимому перемешиванием воды в аккумуляторе. Выигрыш в эксплуатационной готовности у нее также ниже - не более 1,5 часов.

Однако несмотря на некоторый проигрыш в теплотехнических характеристиках, схема Г имеет существенные эксплуатационные преимущества над схемой В: возможность повторного нагрева воды в случае ее охлаждения в аккумуляторном баке и постоянное давление в отборе. Последнее имеет важное значение для обеспечения устойчивой работы водоразборной арматуры, исключающего сбои температуры смешанной воды.

К схеме Г близка по эффективности схема Д (опыты № 23 - 28), которая отличается тем, что в ней одновременно с высокой эксплуатационной готовностью совмещено еще одно ценное свойство, как ограничение минимального объема горячей воды готовой к потреблению. Это обеспечивается за счет расположения водовыпускного конца подающего трубопровода ниже водозаборного на высоту и образованием таким образом изотермического слоя горячей воды под поплавком.

При работе установке в режиме многократного нагрева по схеме Б (опыты № 11 - 14) среднедневная эффективность установки составила 0,57 - 0,58, т.е. практически одинакова с эффективностью традиционной схемы А. Преимущества схемы проявились только в эксплуатационной готовности и температурной стабильности.

Результаты испытаний установки при различном сопротивлении гелиоконтура подтвердили предпосылку о снижении температурной стабильности нагрева с ростом гидравлических потерь давления. Причем было обнаружено заметное преимущество разомкнутого гелиоконтура перед замкнутым.

В качестве примера на рис.3.5 представлены результаты испытаний установки в режимах ее работы с разомкнутым (схема Г) и замкнутым (схема А) гелиоконтуром. В обоих режимах характеристика сопротивления гелиоконтура  $S$  и удельное динамическое давление  $A$  были одинаковыми. Величина  $(S + \alpha_2 A)$ , определенная опытным путем для данных режимов составляла  $132970 \text{ Па}/(\text{кг}/\text{с})^2$ .

Из рис.3.5, а видно, что при однократном нагреве повышение температуры воды в гелиоприемнике достигала в полдень  $30,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом температура воды на выходе из гелиоприемника с 9.30 до 17 часов поддерживалась на уровне  $48 \text{ }^{\circ}\text{C}$  с точностью  $\pm 4,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. отклонение от равномерного нагрева  $r = \pm 0,09$ . Можно отметить достаточно хорошее согласие результатов расчетов  $t$  по формуле (2.12), приведенных на том же графике, с опытными данными.

Для замкнутого гелиоконтура повышение температуры воды в гелиоприемнике (рис.3.5,б) достигала в полдень  $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом температура воды на выходе из гелиоприемника с 9,30 до 17 часов поддерживалась на уровне  $42,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$  с точностью  $+ 8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , т.е. отклонение от равномерного нагрева  $r = \pm 0,19$ . Отсюда видно, что при прочих равных условиях температурная стабильность нагрева замкнутого гелиоконтура в два раза хуже разомкнутого.

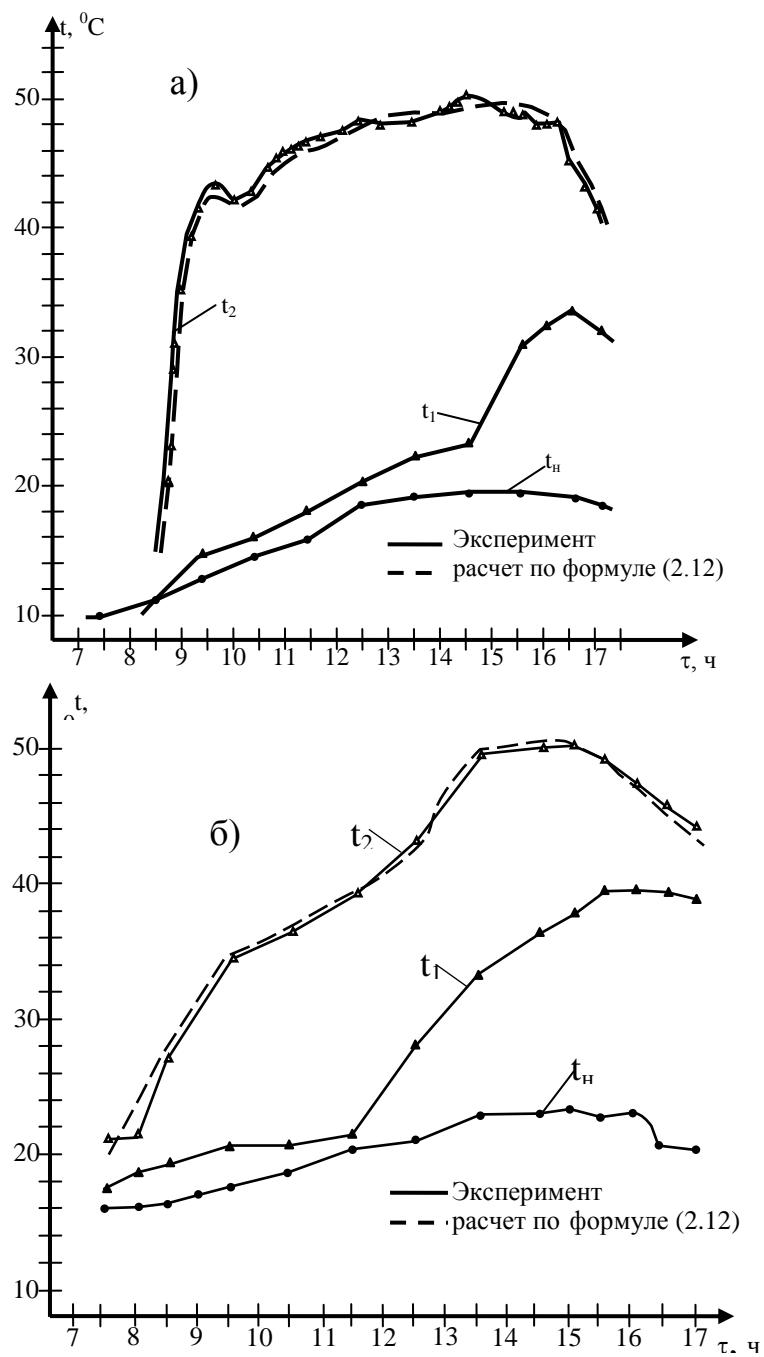
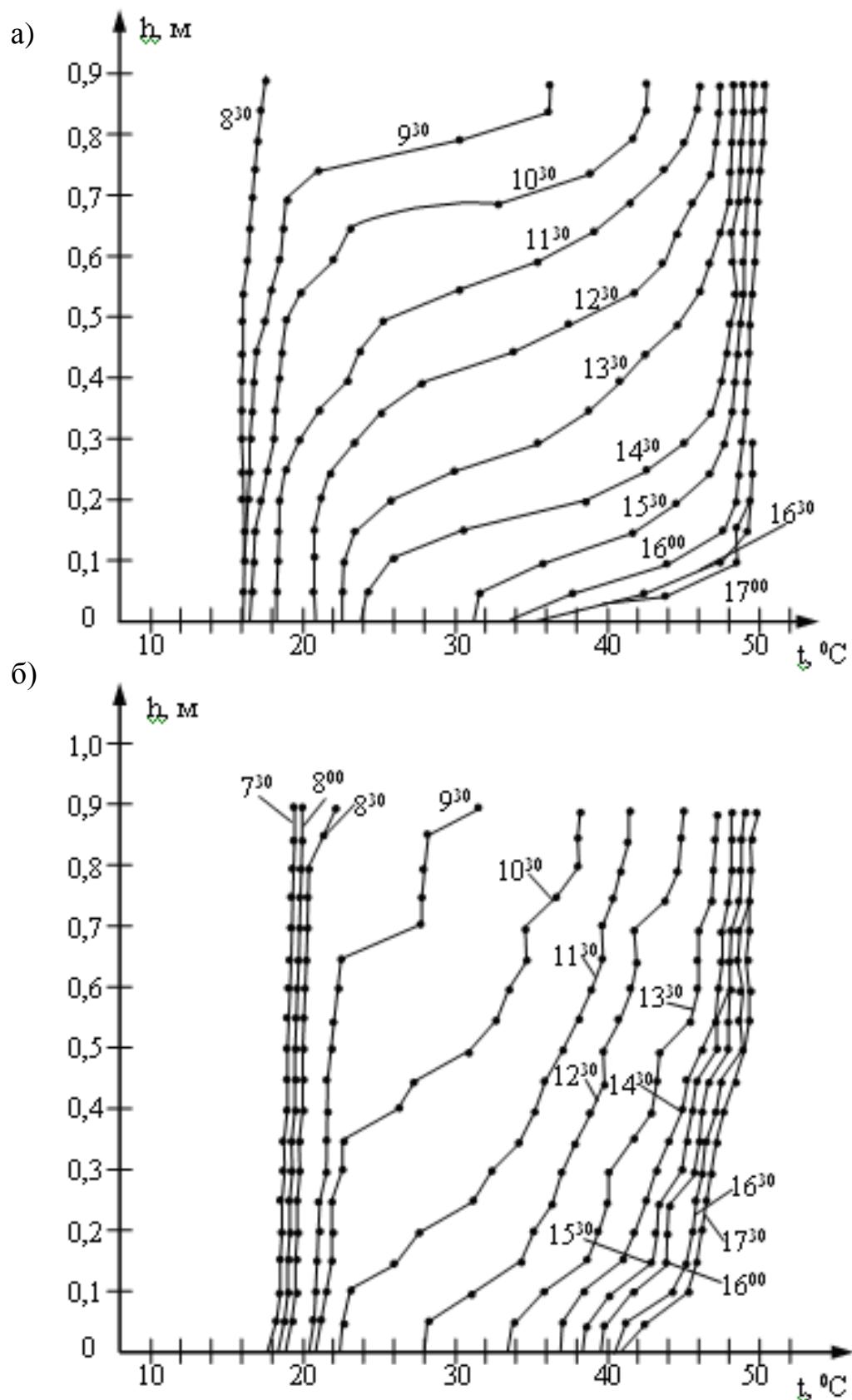


Рис.3.5. Результаты испытаний гелиоустановки при однократной (а) и многоократной (б) циркуляции теплоносителя.

Результаты испытаний показали также, что для разомкнутого гелио-контура характерна значительная температурная стратификация воды в баке-аккумуляторе (рис.3.6,а). Объясняется это сравнительно малым расходом теплоносителя, что способствует хорошему расслоению воды. Для замкнутого гелиоконтура, вследствие больших расходов, стратификация воды в баке-аккумуляторе менее выражена (рис.3.6,б). Последним объясняет-

ся сравнительно низкая эксплуатационная готовность традиционной схемы, которая хуже почти на 2 часа эксплуатационной готовности схемы приготовления горячей воды с патрубком излива.

В целом можно заключить, что результаты натурных исследований подтвердили основные предпосылки и расчетные формулы, полученные из теоретического анализа.



**Рис.3.6. Распределение температуры воды по высоте бака аккумулятора по опытным данным:**

а) в режиме работы установки с замкнутым гелиоконтуrom (схема Г); б - в режиме установки с замкнутым гелиоконтуром (схема А).

## **Выводы по III главе**

На основе выполненных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Выполнены экспериментальные исследования саморегулирующихся систем солнечного горячего водоснабжения, для чего были разработаны экспериментальная гелиоустановка и методика проведения, а также обработки экспериментальных данных.

2. Результаты испытаний установки при различном сопротивлении гелиоконтура подтвердили предпосылку о снижении температурной стабильности нагрева с ростом гидравлических потерь давления. Причем было обнаружено заметное преимущество разомкнутого гелиоконтура перед замкнутым.

3. Для разомкнутого гелиоконтура характерна значительная температурная стратификация воды в баке-аккумуляторе. Объясняется это сравнительно малым расходом теплоносителя, что способствует хорошему расслоению воды. Для замкнутого гелиоконтура, вследствие больших расходов, стратификация воды в баке-аккумуляторе менее выражена. Последним объясняется сравнительно низкая эксплуатационная готовность традиционной схемы, которая хуже почти на 2 часа эксплуатационной готовности схемы приготовления горячей воды с патрубком излива.

В целом можно заключить, что результаты натурных исследований подтвердили основные предпосылки и расчетные формулы, полученные из теоретического анализа.

## **Заключение**

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

1. Разработанные саморегулирующиеся устройства для стабилизации температуры нагрева теплоносителя обеспечивают более экономичное и надежное управление системой солнечного горячего водоснабжения по сравнению с другими средствами автоматизации.

2. Эффективность термосифонных систем при нагреве воды от 10 до 60°C практически не зависит от кратности циркуляции теплоносителя. Саморегулирующийся гелиоконтур с однократной циркуляцией обеспечивает улучшение потребительских свойств гелиосистемы за счет стабилизации температуры отбираемой воды и повышения эксплуатационной готовности при снижении эффективности менее, чем на 1,5 %.

3. Температура воды на выходе из солнечного коллектора термосифонных систем может быть определена по выявленным зависимостям, являющимся решением уравнения (2.11). Стабильность температуры нагрева воды увеличивается при снижении гидравлического сопротивления гелиоконтура. Метод гидравлического расчета саморегулирующегося гелиоконтура с использованием предложенного параметра  $\Pi$ , определяемого по зависимости (2.19), позволяет проектировать автономные системы с заданной температурой стабильностью нагрева воды.

4. Разработанные в диссертации инженерные методы расчета гелиосистем и оборудования с саморегулирующимися устройствами хорошо соответствуют экспериментальным данным.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Республики Узбекистан УП-4512 от 1.03.2013 г. «О мерах по дальнейшему развитию альтернативных источников энергии».
2. Тарнижевский Б.В. Оценка эффективности применения солнечного теплоснабжения в России. // «Теплоэнергетика» № 5, 1996.—С. 15–18.
3. «Строительная инженерия», №1, январь 2006 г.
4. Аvezov P.P., Orlov A.YU. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. Ташкент, Фан, 1988 г. - 286 с.
5. Документация по проектированию: гелиотехника Logasol для горячего водоснабжения и поддержки отопления. Издание 03/2013. [www.buderus.ru](http://www.buderus.ru).
6. Книга о «Солнце». Руководство по проектированию систем солнечного теплоснабжения. Издание 06/2010. [www.viessmann.ua](http://www.viessmann.ua).
7. Васильева И.М., Порублев А.И., Чадин И.М., Кетаов А.Г., Гелиотеплоснабжение населенных мест // Обзорная информация ЦНТИ по гражданскому строительству и архитектуре. - М., 1984 г., № 4. - 35с.
8. Байбутаев К.Б. Сравнительные испытания различных систем солнечных водонагревателей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 1955 г. — 16с.
9. Кисторян Х.А. Аккумулирование тепла в солнечных отопительных устройствах. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М, 1959 г. - 13с.
10. Жамалов А. Исследование теплотехнических и энергетических характеристик солнечных водонагревателей с плоскорифленным приемником. Автореф. дис....канд. техн. наук. - Ташкент, 1971 г. - 22с.
11. Аvezov P.P. Исследование по комбинированному использованию гелиоустановок для отопления и охлаждения помещений. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Ташкент, 1971 г. - 27с.
12. Соатов Ф. Исследование и разработка приемников солнечных водонагревательных установок. Автореф. дис....канд. техн. наук. - Ашхабад, 1978 г.-19 с.

13. Рабинович М.Д. Разработка и исследование гелиосистем горячего водоснабжения гражданских зданий. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1980 г.- 19 с.
10. Швалева О. Л. Исследование работы солнечных водонагревателей совместно с полупроводниковыми тепловыми насосами для теплоснабжения. Автореф. дис... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1980 г.-23 с.
11. Назарова Г.Р. Комбинированная солнечная установка для теплоснабжения на основе плоских коллекторов. Автореф. дис.... канд. техн. наук. -Ашхабад, 1987 г.-21с.
12. Захидов М.М. Исследование влияния элементов системы солнечного теплоснабжения на объёмно-планировочные решения сельских малоэтажных жилых здания. Автореф. дис... канд. арх. - М., 1982 г.- 24с.
13. Хатамов СО. Исследование системы солнечного воздушного обогрева. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1982 г. - 26с.
14. Рашидов Ю.К. Саморегулирующиеся устройства для систем солнечного теплоснабжения. Автореф. дис.... канд. техн. наук. - М., 1986 г. - 20с.
15. Назарова Г.Р. Комбинированная солнечная установка для теплоснабжения на основе плоских коллекторов. Автореф. дис.... канд. техн. наук. -Ашхабад, 1987 г.-21с.
16. Каландаров Б. Теплотехнические характеристики солнечных коллекторов и систем типа коллектор-рефлектор. Автореф. дис.... канд. техн. наук. -Ашхабад, 1987 г.-21с.
17. Беглиев Х.А. Разработка, создание и исследование систем горячего водоснабжения для стационарных потребителей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - Ашхабад, 1988 г. — 22с.
18. Малевский Ю.Н., Тарнижевский Б.В., Фугенфиров М.И. Солнечная энергия за рубежом: прогнозы, состояние разработок, технико-экономические возможности // Гелиотехника, 1979 г. № 4 - С.72-75.

- 19.Фугенфиров М.И. Солнечная энергия за рубежом // Теплоэнергетика, 1980г., №3С.72-74.
- 20.Байрамов Р.Б., Ушакова А.Д. Солнечные водонагревательные установки. -Ашхабад: Ылым. 1987 г. -168 с.
- 21.Смирнов С.И., Водовозов В.А. Использование солнечной энергии для теплоснабжения за рубежом // Жилищное строительство, 1980 г., № 10. С.21-22.
- 22.Кенисарин М.М., Карабаев М.К. Централизованные системы солнечного теплоснабжения с сезонным аккумулированием тепла. Ташкент: Обзорная информация УзНИИНТИ. 1987 г. - 36с.
- 23.Умаров Г.Я., Раббимов Р.Т., Авезов Р.Р., Усманов М.У. Использование низкопотенциальных солнечных установок.-Ташкент,Фан,1976 г.-100 с.
- 24.Константиновский Ю.А., Заваров А.И., Рабинович М.Д., Ферт А.Р. Использование солнечной энергии для теплоснабжения. - Киев: Будвельник, 1985 г. -104 с.
- 31.Манюк В.И., Каплинский Я.И., Хиж Э.Б., Манюк А.И., Ильин В.К. Справочник по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей. - М.: Стройиздат, 1977 г.ю - 272 с.
- 32.Аверьянов В.К., Тютюнников А.И. Выбор оптимальной поверхности промежуточного теплообменника двухконтурной гелиосистемы. // Гелиотехника, 1984 г., №3. С.58-61.
- 33.Петраш В.Д., Полунин М.М. Оптимальные расчетные параметры теплообменников двухконтурных гелиосистем горячего водоснабжения // Гелиотехника, 1985 г., №2. С.37-41.
- 34.Weiersmiiller R/ Durahfluss and Wärmeaustauscherbemessung bei Sonnenenergianlagen// Heizmg, Lufting, Haustechnik, Klimatchnin. 1985/ Bd.36. №5. S.234-237.
- 35.Харченко Н.В., Никифоров В.А. Оптимизация гелио-топливной системы теплоснабжения //Промышленная теплотехника, 1981 г, т.3, №4. С. 103-108.

36. Козлов В.Б., Рудян Ю.Б. Оптимизированная модель системы солнечный водонагреватель - аккумулятор - потребитель с переменным расходом теплоносителя // Гелиотехника, 1978 г., №5. С.52-57.
- 38.Аvezov P.P. Повышение эффективности использования низкопотенциальных солнечных нагревателей в системах теплоснабжения. Авт-реф. дис. ... док. техн. наук. - Ташкент, 1990 г.
- 39.Рашидов А.Ю., Аvezov P.P. Оптимизация двухконтурных систем солнечного теплоснабжения. Сборник научных работ по итогам VI традиционного конференция магистрантов. ТАСИ, Ташкент - 2006 г., 101-103 с.
40. Васильева И.М., Рабинович М.Д. Солнечно-топливные и солнечно-электрические котельные. В кн. Системы солнечного тепло -и хлодоснабжения. М.: Стройиздат. 1990. с.89-103.
41. Насонов Е.А., Крюкова Т.Н., Аvezov P.P., Рузимуродов Б. //Гелиотехника. 1988. №3. с. 69-75.
42. Аvezов P.P., Аvezова Н.Р. Схемно-технологические решения солнечно-топливных систем теплоснабжения.// Труды международной конференция "Возобновляемые источники энергии и гелиоматериаловедение", Ташкент, 29-30 сентября 2005, с.4..6.
43. Аvezов P.P., Анарбаев А.И., Захидов Р.А. Оптимизация солнечных коллекторов на ограниченной площади.// Гелиотехника, 2005, №1, с.35...39.
44. Анарбаев А.И., Захидов Р.А., Короли М.А. Оптимизация пространственного положения солнечных коллекторов.// Труды второй международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», посвящённой 90-летию акад.С.А.Азимова. Ташкент. 18-19 ноября 2004. с.113...116.
45. Аvezов P.P., Анарбаев А.И., Захидов Р.А. Моделирование двухконтурных систем солнечного теплоснабжения// Гелиотехника, 2004, № 2, с.35...40.
46. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием

солнечной энергии. М.: Мир. 1977, 420 с.

47. Авезов Р.Р., Авезова Н.Р. Методика расчёта площади поверхности двухконтурных гелиоприставок солнечно-топливных котельных.// Материалы международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», посвящённой 15-летию независимости Узбекистана. Ташкент. 26-27 октября 2006. с.48...50.
48. Короли М.А., Валиев А.А. Оценка эффективности использования солнечных приставок к топливным котельным.// Труды международной конференции "Возобновляемые источники энергии и гелиоматериаловедение", Ташкент, 29-30 сентября 2005, с.76...79.
49. Сарнацкий Э.В., Константинов Ю.А., Заварова А.И. и др. Использование солнечной энергии для теплоснабжения зданий. Киев: Будівельник, 1985, 104 с.
50. Бутузов В.А., Мацко А.Н. Разработка и эксплуатация солнечно-топливных котельных// Промышленная энергетика. 1991 №1, с.4...7.
51. Вагапов И.Х. Расчёт коэффициента замещения тепловой нагрузки гелиотезнической части солнечно-топливных систем горячего водоснабжения.// Гелиотехника, 2006, № 3, с.79...82.
52. Мансурхонов Х.И, Авезов Р.Р., Рашидов Ю.К. Оптимизация параметров комбинированных систем солнечного теплоснабжения. Архитектура ва курилиш муаммолари. Магистрантларнинг VII анъанавий конференцияси натижалари бўйича илмий ишлар тўплами. ТАҚИ, Тошкент, 2007, 72-73 б.
53. Захидов Р.А. Стратегия развития возобновляемой энергетики в Узбекистане. Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Труды международной конференции посвящённой 70-летию Физико-технического института НПО «Физика-Солнце», Ташкент, 2013, 288-290 с.
54. Рашидов Ю.К., Султанова Ш.Ю., Рашидова Л.Ю. Саморегулирующиеся теплогидродинамические процессы и устройства на их основе для систем солнечного теплоснабжения. Фундаментальные и прикладные

- вопросы физики. Труды международной конференции посвящённой 70-летию Физико-технического института НПО «Физика-Солнце», Ташкент, 2013, 335-338 с.
55. Захидов Р.А., Анарбаев А.И. Оптимизация параметров топливно-солнечной системы. Фундаментальные и прикладные вопросы физики. Труды международной конференции посвящённой 70-летию Физико-технического института НПО «Физика-Солнце», Ташкент, 2013, 343-345 с.
56. Рашидов Ю.К., Омонов М.А. Повышение эффективности систем солнечного теплоснабжения. Архитектура ва қурилиш муаммолари. Магистрантларнинг XIII-анъанавий анжумани илмий мақолалар тўплами, ТАҚИ, Тошкент, 2013, 187 бет.
57. Рашидов Ю.К., Омонов М.А. Расчёт двухконтурных систем солнечного теплоснабжения. Архитектура ва қурилиш муаммолари. Магистрантларнинг XIV-анъанавий анжумани илмий мақолалар тўплами, ТАҚИ, Тошкент, 2014, бет.
58. Рашидов Ю.К., Икрамов А. Саморегулирующиеся системы солнечного горячего водоснабжения Архитектура ва қурилиш муаммолари. Магистрантларнинг XIII-анъанавий анжумани илмий мақолалар тўплами, ТАҚИ, Тошкент, 2014, 116-117 бет.
59. Рашидов Ю.К., Икрамов А. Расчёт саморегулирующегося гелиоконтура системы солнечного горячего водоснабжения Архитектура ва қурилиш муаммолари. Магистрантларнинг XV-анъанавий анжумани илмий мақолалар тўплами, ТАҚИ, Тошкент, 2015, 99-101 бет.