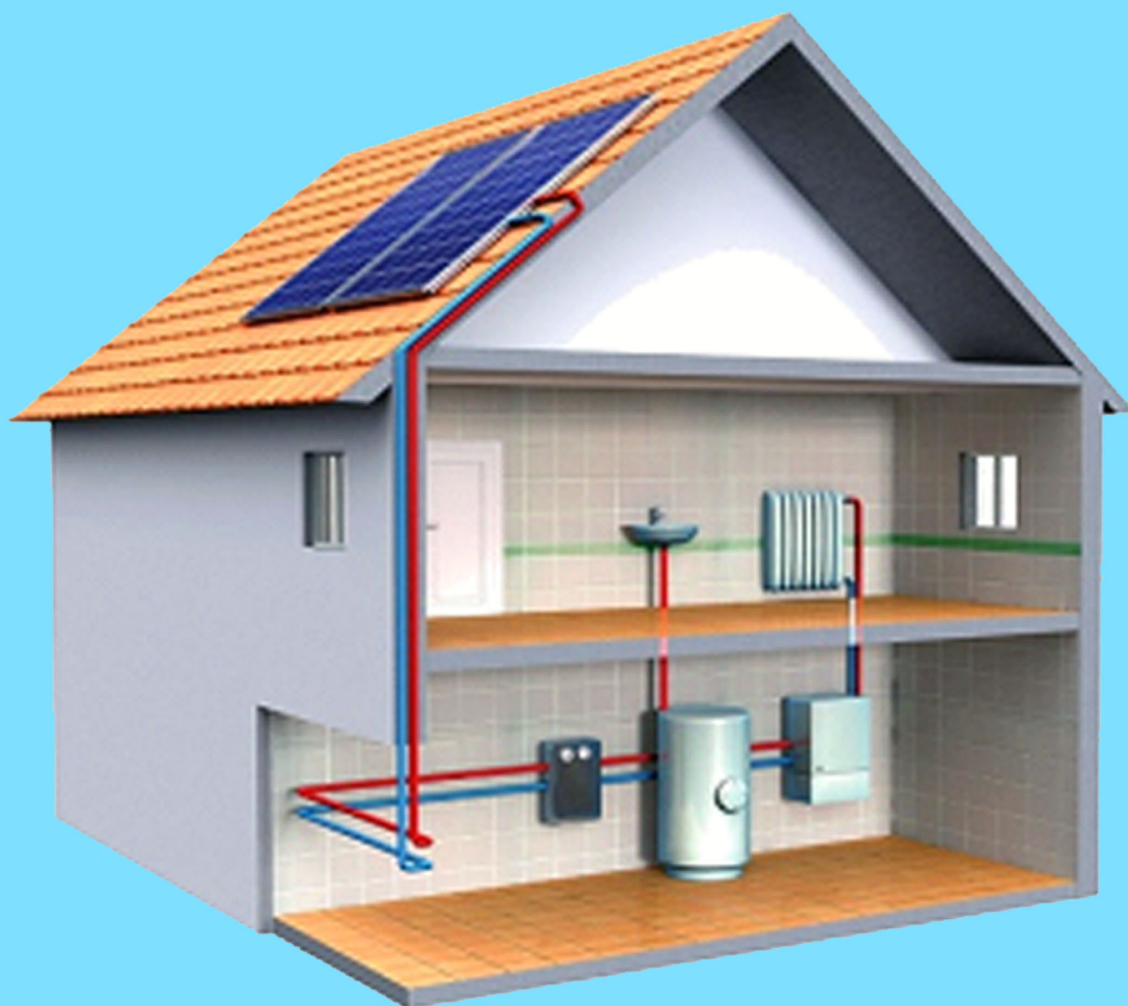


**Р.Р. АВЕЗОВ, Ш.К.НИЯЗОВ
Ф.Ш. КАСИМОВ, А.У.ВОХИДОВ,
Э. Ю. РАХИМОВ**



СОЛНЕЧНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ ЕМКОСТНЫЕ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
ГУЛИСТАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Р.Р. Аvezов, Ш.К.Ниязов
Ф.Ш. Касимов, А.У.Вохидов, Э. Ю. Рахимов

СОЛНЕЧНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ ЕМКОСТНЫЕ

*Под редакцией доктора технических наук,
профессора Н.Р.Аvezовой*

МОНОГРАФИЯ

Гулистон - 2022

КВК:30

УО'К: 6

S- 77

Солнечные водонагреватели емкостные. Монография/ Р.Р.Авезов, Ш.К.Ниязов, Ф.Ш. Касимов, А.У.Вохидов, Э.Ю.Рахимов «Зиё нашриёти», 2022. 112-стр.

В монографии приведены сведения о емкостных солнечных водонагревательных коллекторах с донным поглощением солнечного излучения, который используется в теплые периоды года, для получения горячей воды для нужд потребителей находящихся вдали от централизованных системах горячего водоснабжения. Изложены принцип работы данных коллекторов, их конструкции, особенности применения, освещены методы повышения эффективности и надёжности в сезонных системах солнечного горячего водоснабжения.

Монография предназначена для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских, а также для бакалавриата по дисциплине спец курс «Основы использования солнечной энергии» для специальности 5140200 «Физика», магистров по дисциплине «Возобновляемые источники энергии и устойчивая физика окружающей среды» для специальности 5A140204.

Monografiyada yilning issiq fasllarida markazlashtirilgan issiq suv ta'minoti tizimlaridan uzoqda joylashgan iste'molchilarning ehtiyojlari uchun issiq suv olishda foydalaniladigan quyosh nurlanishini tubidan yutuvchi sig'imli quyosh suv isitgich kollektorlari bo'yicha olib berilgan ilmiy-nazariy, eksperimental tadqiqotlar natijalari to'g'risida ma'lumot keltirilgan. Ushbu kollektorlarning ishlash printsiplari, ularning dizayni, qo'llanilishi xususiyatlari tavsiflangan, mavsumiy quyoshiy issiq suv ta'minoti tizimlarining samaradorligi, ishonchliligini oshirish usullari yoritilgan.

Monografiya ilmiy-tadqiqot ishlarida ilmiy, muhandislik-texnik xodimlar, shuningdek, 5140200 "Fizika" mutaxassisligi bo'yicha "Quyosh energiyasidan foydalanish asoslari" fanidan bakalavriat, "Qayta tiklanuvchi energiya manbalari va fizika" fanlari magistratlari uchun, hamda "atrof-muhitning barqaror fizikasi" 5A140204 ixtisosligi uchun mo'ljallangan.

The monograph provides information on capacitive solar water-heating collectors with bottom absorption of solar radiation, which is used in warm periods of the year to obtain hot water for the needs of consumers located far from centralized hot water supply systems. The principle of operation of these collectors, their design, application features are described, methods of increasing the efficiency and reliability of seasonal solar hot water supply systems are highlighted.

The monograph is intended for scientific, engineering and technical workers in research, as well as for a bachelor's degree in the discipline of a special course "Fundamentals of the use of solar energy" for the specialty 5140200 "Physics", masters in the discipline "Renewable energy sources and sustainable environmental physics" for specialty 5A140204.

Рецензенты: *д-р техн. наук, проф. (ТИИИМСХ-НИУ) А.М. Мирзабаев;*
д-р техн. наук, проф. (Фер ПИ) С.Ф. Эргашев

Утверждено к печати Ученым советом Гулистанского государственного университета (выпуска Протокола № 9, 2022 года)

ISBN 978-9943-8679-7-0

© Р.Р. Авезов, Ш.К. Ниязов и др. 2022

© «Зиё нашриёти», 2022

*Посвящается светлой памяти
доктора технических наук, профессора
Авезова Раббанакула Рахмановича!*

*Texnika fanlari doktori, professor
Avezov Rabbanakul Raxmonovichning yorqin
xotirasiga bag'ishlanadi*

*Dedicated to the bright memory
of the Doctor of Technical Sciences, professor
Avezov Rabbanakul Rakhmanovich*



Авезов Раббанакул Рахмонович - выдающийся ученый в области теплового преобразования и использования солнечной энергии, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Физико-технического института Академии наук РУз и Международного института солнечной энергии, член редколлегии Международного журнала Гелиотехника – Applied Solar Energy.

Имя Раббанакула Рахмоновича Авезова широко известно среди гелиотехников, теплотехников и теплоэнергетиков нашей страны и представителей международной гелиотехнической науки.

Научная деятельность профессора Р.Р.Авезова тесно связана с подготовкой высококвалифицированных специалистов в области теплового преобразования и использования солнечной энергии. Он являлся лидером своеобразной научно-инженерной школы гелиотехники Узбекистана, получившей широкое признание в Узбекистане и странах СНГ, основная научная деятельность которой связана с разработкой и внедрением солнечных тепловых установок, предназначенных для теплоснабжения жилых, коммунально-бытовых и сельскохозяйственных объектов. Под его руководством организовано серийное производство разработанных трёх поколений солнечных водонагревательных коллекторов (1978 - 1990 гг.), общая площадь которых составляет около 40 тыс. кв. м.

Его работу продолжают его ученики в Лаборатории "Солнечных тепловых и энергетических установок" ФТИ АН РУз, а также во многих регионах страны – в Кашкадарьинской, Ферганской, Бухарской и Сырдарьинской областях, где они создали научные лаборатории в данной сфере. Под его руководством защищены больше 25 докторских и кандидатских диссертаций по специальностям «Теоретические основы теплотехники», «Промышленная теплоэнергетика» и «Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии». Один из его учеников, профессор С.Батмунх ныне является академиком Академии наук Монгольской народной Республики, известный специалист в области теплоэнергетики.

Профессор Р.Р.Авезов также являлся одним из основателей научных школ в своей области в странах СНГ и дальнего зарубежья, таких как Монголия, Афганистан, Сирия и др., что способствовало расширению числа исследователей в области использования возобновляемых источников энергии.

В период с 1993 по 2021 годы профессор Р.Р.Авезов активно участвовал в деятельности Специализированных советов при ФТИ АН РУз и ТГТУ в качестве ученого секретаря, заместителя председателя, члена Совета, а также был членом Экспертного Совета ВАК РУз по энергетике.

Он был одним из авторитетных учёных, который обеспечил высокий авторитет и международное признание единственного в своей области в странах СНГ, специализированного Международного журнала «Гелиотехника», который издаётся на английском языке издательством Allerton Press в США под названием «Applied Solar Energy». Он являлся членом редколлегии этого журнала с 1975 по 2021 годы, а в течение 2000-2013 годов ответственным секретарем этого журнала. Кроме этого, Р.Р.Авезов являлся членом редколлегии и рецензентом в ряде

зарубежных научных журналах, таких как «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), Journal of Building Engineering, Applied Thermal Engineering.

В 2003 году многолетняя научная деятельность профессора Р.Р. Авезова была признана Правительством Республики Узбекистан, и он был награжден орденом «Мехнат шухрати» за значительный вклад в развитие науки в Узбекистане, в частности, в направлении преобразования солнечной энергии в тепловую и ее эффективного использования в различных секторах экономики страны.

Одним из важных проектов в его деятельности является разработка дизайна Международного института солнечной энергии на международном уровне, где также была основана научная школа, в которой и по сей день проводятся научно-исследовательские работы в области использования солнечной энергии.

Р.Р.Авезов является выдающимся ученым, автором более 300 научных работ в сфере теплового преобразования и использования солнечной энергии, из них 7 монографий, 10 учебных пособий, 16 патентов и авторских свидетельств на изобретения, более 120 научных статей.

Он был образцовым семьянином и любимым отцом четверых детей, одна из его дочерей продолжает его научный путь – в качестве доктора технических наук, успешно проводя научную деятельность в области использования возобновляемых источников энергии.

Человеческие качества, свойственные ему, такие как активность, жизнерадостность, предприимчивость, а также целеустремленность – были примером для многих. Он останется в наших сердцах надёжным товарищем и мудрым советчиком, наставником, всегда готовым прийти на помощь в любой ситуации. Светлая память об этом замечательном человеке навсегда сохранится в сердцах родных и близких, друзьях и знакомых, учеников и представителей научного сообщества страны, которые его знали, любили и уважали.

*от имени учеников
PhD технических наук
Акмал Вохидов*

ОГЛАВЛЕНИЕ

стр

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ	9
ПРЕДИСЛОВИЕ	11
.	
ВВЕДЕНИЕ	13
ГЛАВА I. ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ЕМКОСТНЫМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ.	16
1.1. Область применения емкостных солнечных водонагревательных коллекторов	16
1.2. Основные конструктивные решения ПСВК с емкостными ПСИ...	17
1.3. Состояние научных исследований по тепловому расчету ПСВК с емкостными ПСИ	25
1.3.1. Определение дневного хода температуры нагреваемой воды	25
ГЛАВА II. ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ЕМКОСТНЫМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДОННЫМ ЛУЧЕПОГЛОЩЕНИЕМ, ИЗГОТОВЛЕННЫМИ ИЗ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ПЛАСТИКОВ.	34
2.1. Исследование приведенного к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК коэффициент суммарных тепловых потерь в окружающую среду емкостного ПСИ, изготовленного из СП с донным поглощением СИ.	35
.....	
2.2. Формирование коэффициента тепловых потерь емкостных ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ, изготовленных из частично прозрачных для ИК излучения пластиков.	36
2.3. Методика определения составляющих суммарного коэффициента	

тепловых потерь емкостного ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ, изготовленных из частично прозрачных для ИК излучения СП.	47
.	
2.4. Определение коэффициента тепловой эффективности емкостного ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ.	48
2.5. Эффективный коэффициент поглощения СИ в емкостных ПСИ ПСВК с донным поглощением излучения.	50
ГЛАВА III. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ЕМКОСТНЫМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДОННЫМ ЛУЧЕПОГ-ЛОЩЕНИЕМ	56
.....	
3.1. Динамика накопления тепла в емкостных ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ.	56
3.2. Моделирование дневных ходов температуры воды и накопления потока полезного тепла ПСВК с емкостными ПСИ с донным поглощением СИ.	60
3.2.1. Исходные данные для определения дневных ходов температуры воды в емкостном ПСИ и динамики накопления потока полезного тепла в нем.	60
3.2.2. Результаты расчетов по определению дневного хода температуры воды в емкостном ПСИ.	63
3.2.3. Результаты расчетов по определению дневных ходов накопления потока полезного тепла в ПСИ и накопленного в нем в течение дня полезного тепла.	63
3.3. Моделирование дневных ходов среднечасовой и среднедневной тепловой эффективностей ПСВК с емкостным ПСИ с донным поглощением СИ.	65

ГЛАВА IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ЕМКОСТНЫМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДОННЫМ ЛУЧЕПОГЛОЩЕНИЕМ ИЗГОТОВЛЕННЫМИ ИЗ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ПЛАСТИКОВ.	82
•	
4.1. Краткое описание ПСВК емкостными ПСИ, изготовленными из СП с донным поглощением солнечного излучения и порядок проведения испытаний.	82
4.2. Методика обработки результатов экспериментальных исследований.	84
4.3. Оценка погрешностей измерений и вычислений.	85
4.4. Результаты натурных экспериментальных исследований и их обсуждение.	86
4.5. Сезонная теплопроизводительность и тепловая эффективность ПСВК с емкостным ПСИ, изготовленными из СП с донным поглощением ПСИ.	94
ЛИТЕРАТУРА	101

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

В данном перечне приведены основные условные обозначения, часто используемые в монографии. Редко встречающиеся обозначения приведены в соответствующих главах.

$\alpha_{нозл}$ - коэффициент лучепоглощения поверхности приемника (%);

K_{np-p-o} - коэффициент тепловых потерь, приведенный к единице площади лучевоспринимающей поверхности ($Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$);

$\eta_{тн}$ - коэффициент тепловой эффективности емкостного поглотителя солнечного излучения (%);

$t_в$ - температуры нагреваемой воды ($^\circ C$);

$Q_{над}$ - потока суммарного солнечного излучения (СИ) на фронтальную поверхность коллектора ($Вт/м^2$);

t_o - температура окружающей среды ($^\circ C$);

$Q_{пол}$ - поток полезно поглощенной энергии солнечного излучения в коллекторе ($кДж/м^2$);

$Q_{пол}$ - величина накопленной в течение светового дня полезно поглощенной энергии ($кДж/м^2$);

W_n , $W_в$ - соответственно, теплоемкости приемника и воды в нем ($Дж/^\circ C$);

$t_{в_0}$ - начальная температура воды в коллекторе в момент времени $\tau - \tau_o$ ($^\circ C$);

$C_{np}^{эфф}$ - приведенная на $1 м^2$ фронтальной поверхности эффективная теплоемкость солнечного коллектора ($кДж/(м^2 \cdot ^\circ C)$);

k_{np-p-o} - приведенная на $1 м^2$ фронтальной поверхности суммарный коэффициент тепловых потерь ограждающих элементов (корпуса) солнечного коллектора ($Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$);

α - угол наклона плоского основания приемника к горизонту (*градус*);

δ - годовое склонение Солнца (*градус*);

φ - географическая широта местности (*градус*);

γ - азимут нормали плоского основания полуцилиндрического приемника относительно южного меридиана (*градус*);

τ_o - момент времени истинного полудня (*час*);

τ - момент текущего времени суток (*час*);

ω - угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси (*градус/час*);

$F_{фр}$ - приведенный к единице площади фронтальной поверхности корпуса коллектора ($м^2$);

C_{np} - приведенная теплоемкость элементов ПСВК ($кДж/(м^2 \cdot ^\circ C)$);

$F_{тн}$ - площади зачерненной поверхности дна ($м^2$);

$q_{mn_{cn}}^{к.л}$ - конвективно-лучистые теплотери с наружной поверхности верхней стенки емкостного ПСИ ($Вт/м^2$);

$q_{mn_{cn}}^{скв.л}$ - сквозные лучистые теплотери от верхней поверхности воды в окружающую среду ($Вт/м^2$);

$Q_{mn_{дн}}$ - тепловые потери от зачерненной поверхности дна контейнера в окружающую среду ($Вт/м^2$);

$Q_{mn_{bc}}$ - тепловые потери от теплой (или горячей) воды через боковые стенки контейнера ($Вт/м^2$);

λ_{ϵ}^H - коэффициент теплопроводности наружного воздуха ($Вт/(м \text{ } ^\circ C)$);

l - определяющий размер наружной теплообменной поверхности СП ($м^2$);

α_{ϵ} - коэффициент поглощения СИ системы «слой воды- зачерненное дно» ($м^2/с$);

$\alpha_{эфф}^{в-д}$ - эффективного коэффициента поглощения системы «слой воды- зачерненное дно» (%);

β_{λ} - коэффициент ослабления (экстинкции) излучения воды ($1/м$);

L - длина пути излучения в слое воды в коллекторе ($м$).

ЕСВК – емкостной солнечный водонагревательный коллектор; ВИЭ – возобновляемые источники энергии; СГВС – системы горячего водоснабжения; ПСВК – плоский солнечный водонагревательный коллектор; СК – солнечный коллектор; СИ – солнечное излучение; СЭ – солнечная энергия; СТЭУ – солнечные тепловые энергетические установки; ПСИ – поглотитель солнечного излучения; СП – светопрозрачный пластик; ИК – инфракрасное (излучение); ТОК – теплоотводящие каналы; СВУ – солнечные водонагревательные установки

Индексы: –верхние: *эфф* – эффективная, *исп* – испарение, *изл* – излучение; *к* – конвективный; *к, л* – конвективный лучистый, *скв, л* – сквозной лучистый, *л* – лучистый, Σ – суммарная, *в-д* – слой воды-зачерненная дно, *уд* – удельная, L - длина пути излучения в слое воды в коллекторе.

–нижние: *погл* – поглощённый, *пр* – приведенный, *тп* – тепловые потери, *в* – воды, *пад* – падающий, *о* – окружающей среды, *пол* – полезный, *дн* – дно, *эфф* – эффективная, *фр* – фронтальная, *опт* – оптический, *сп* – светопрозрачное покрытие, *зап* – заполнения, *бс* – боковые стены, *пв* – поверхности воды, *вп* – воздушная прослойка, *пл* – пленки, *нар* – наружная, *вын* – вынужденный, *нс* – небосвода, *б* – барометрическая; *отр* – отраженный, *п* – поверхность; D – диффузионный; *тр* – точка росы; *ср* – средний; *м* – мокрый

ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное развитие энергетики в мире характеризуется ростом стоимости производства энергии. Наибольшее увеличение стоимости энергии наблюдается в удаленных районах, где в основном используются децентрализованные системы электроснабжения на базе нефти продуктовых ресурсных электростанции, работающих на привозном топливе. Совокупная стоимость электроэнергии в этих районах часто превышает мировых стандартов на цены и достигает 0,25 и более долларов США за 1 кВт/ч.

Мировой опыт показывает, что ряд стран и регионов успешно решают сегодня энергообеспечение на основе развития возобновляемой энергетики. Для интенсификации практического использования возобновляемых энергоресурсов в этих странах законодательно устанавливаются различные льготы для производителей «зеленой» энергии. Однако решающей успех возобновляемой энергетики определяется в конечном счете ее эффективностью в сравнение с другими более традиционными на сегодня энергоустановками топливной энергетики.

В соответствующих постановлениях Кабинета Министров Республики Узбекистан от 8 августа 2017 года № 605 «О внесении изменений и дополнения, а также признании утратившими силу некоторых решений Правительства Республики Узбекистан (постановление Президента Республики Узбекистан от 26 мая 2017 года № ПП–3012 «О Программе мер по дальнейшему развитию возобновляемой энергетики, повышению энергоэффективности в отраслях экономики и социальной сфере на 2017-2021 годы»); от 28 апреля 2018 г. № ПП-3687 «О дополнительных мерах по реализации инвестиционных проектов в области возобновляемых источников энергии»; от 22 июля 2019 г. № 610 «Об утверждении Регламента подключения к единой электроэнергетической системе субъектов предпринимательства, производящих электрическую энергию, в том числе из возобновляемых источников энергии»; от 22 августа 2019 г. № ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», также в соответствии с Указом Президента Республики Узбекистан от 01.02.2019г. №УП-5646 «О мерах по коренному совершенствованию системы управления топливно-энергетической отраслью Республики Узбекистан» образовано Министерство энергетики на которого возложена функция уполномоченного органа по реализации единой государственной политики в области использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Закон Республики Узбекистан «Об использовании возобновляемых источников энергии» от 21.05.2019 г. № ЗРУ-539 и «О государственно-частном партнерстве», которые создают нормативно-правовую основу для ускорения реализации проектов ВИЭ.

Кроме того, постановлением Кабинета Министров от 22.07.2019г. №610 утвержден Регламент подключения к единой электроэнергетической системе

субъектов предпринимательства, производящих электрическую энергию, в том числе из ВИЭ, определяющий основные технические аспекты интеграции объектов ВИЭ в ЕЭС Узбекистана.

В законе Республики Узбекистан от 1 мая 2020 г. О внесении изменений и дополнении в Закон Республики Узбекистан «О рациональном использовании энергии», 10 июня 2020 г. № ПП-4779 «О дополнительных мерах по сокращению зависимости отраслей экономики от топливно-энергетической продукции путем повышения энергоэффективности экономики и задействования имеющихся ресурсов» от 9 апреля 2021 г. № ПП-5063 «О мерах по развитию возобновляемой и водородной энергетики в республике Узбекистан» и в Концепции (2020) обеспечения Республики Узбекистан электрической энергией на 2020-2030 годы.

В связи с чем, на сегодняшний день Министерством энергетики в целях диверсификации структуры генерации в сторону увеличения удельной доли ВИЭ осуществляется комплекс мероприятий, направленных на реализацию инвестиционных проектов в сфере ВИЭ на принципах государственно-частного партнерства (ГЧП).

Внедрение механизмов ГЧП в сферу ВИЭ обеспечит привлечение на рынок генерации прямых иностранных инвестиций ведущих зарубежных компаний, располагающих передовыми инновационными техническими и технологическими решениями, в качестве независимых производителей электроэнергии (НПЭ).

Необходимо отметить, что реализация инвестиционных проектов в сфере ВИЭ на условиях ГЧП имеет множество преимуществ, т.к. весь процесс имплементации проекта (привлечение финансирования, осуществление технико-экономического обоснования, выбор технологий, процесс осуществления логистики, строительные-монтажные работы, эксплуатация энергообъекта в течении жизненного цикла и процесс владения) относится к обязанности инвестора, а задача единого заказчика электрической энергии, т.е. АО «Национальные электрические сети Узбекистана» осуществлять гарантированный закуп выработанной электроэнергии.

Кроме того, в соответствии с постановлением Президента Республики Узбекистан от 22.08.2019г. №ПП-4422 «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии» утверждены долгосрочные целевые параметры развития ВИЭ и план организационно-практических мер дальнейшего развития ВИЭ.

ВВЕДЕНИЕ

В мире серьезными темпами растет объем инвестиций по использованию ресурсов возобновляемых источников энергии, в частности в солнечную энергетику, и последнее занимает одно из ведущих мест по масштабам их использования. Истощение традиционных ископаемых ресурсов в глобальном масштабе требует внедрения в практику устройств, работающих на солнечной энергии [1], которая в свою очередь позволит сэкономить в системах горячего водоснабжения до 60 % первичных энергоресурсов, затрачиваемых в таких системах за счет использования в них высокоэффективных солнечных технологий и этот показатель может быть дополнительно увеличен.

По данным [2], представленной Международной Энергетической Ассоциацией, общая установленная тепловая мощность плоских солнечных водонагревательных коллекторов (ПСВК), используемых в системах горячего водоснабжения, в 2021 году составил 501 ГВт (т.е. 715 млн. м²) и годовой темп роста их использования в период 2011-2021 годов составил 12,85%. Следует отметить, что особое внимание уделяется проблемам использования солнечной энергии в качестве источников тепла в системах горячего водоснабжения жилых зданий, коммунально-бытовых и социальных объектов. В этом направлении принимаются комплексные меры по разработке нормативно-правовых документов и по расширению масштабов применения новых, высокоэффективных конструкций плоских солнечных водонагревательных коллекторов и двухконтурных солнечных и солнечно-топливных систем на их основе.

Для Республики Узбекистан, по данным [3], к 2030 году намечена установка генерируемой мощности энергоустановок на основе солнечной энергии (СЭ) на 8,8 МВт. Для повышения эффективности использования энергоустановок на основе СЭ, т.е. более простых конструкций ПСВК существует два фактора с целью использования их в системах горячего водоснабжения: в первых, плотность солнечного излучения (СИ) по регионам страны достаточен (800-1200 Вт/м²) для теплового преобразования последнего в течение теплого периода года, и во-вторых, предлагаемую установку можно использовать в местах с централизованным энергообеспечением и в местах отдаленных от централизованных систем теплоснабжения объектов жилого, коммунально-бытового и социального назначения.

На основе комплекса выполненных научных исследований по тепловому расчету ПСВК с емкостными поглотителями солнечного излучения и с донным поглощением СИ, и теплоизолированными плоскими основаниями, нами разработаны и испытаны в натуральных условиях опытные образцы солнечных коллекторов рассматриваемого типа.

В нашей республике принимаются масштабные меры по снижению энергопотребления в автономных системах отопления, экономии топливных ресурсов, разработке высокоэффективных солнечных водонагревателей, а также уделяется особое внимание разработке эффективных солнечных устройств, адаптированных к климатическим условиям регионов.

В стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017-2021 годы отмечены задачи «...сокращения энергоемкости и ресурсоемкости экономики, широкое внедрение в производство энергосберегающих технологий, расширение использования возобновляемых источников энергии...»[4]. При выполнении этих задач целесообразно провести исследования в таких направлениях, как разработка научно-технических решений по созданию емкостных солнечных водонагревателей, с донным поглощением солнечного излучения, обосновать их параметры, обеспечивающие экономию энергии и ресурсов.

Исследование в области использования плоских солнечных водонагревателей в системах отопления зданий, повышение энергоэффективности этих систем и создание новых поколений солнечных устройств и обоснование их тепловых параметров У.Бекман, С.Клейн, Ж.Даффи[5], О.С. Попель[7], Р.Б. Байрамов, А.Д. Ушакова, Д.С. Стребков, Б.В. Тарнижевский, А.И. Исманжанов и др.

Производство установок для использования альтернативной энергии солнца за последние 4 года увеличилось в мире в несколько раз, что к 2020 г. за счет солнечной энергии мировые потребности в электроэнергии удовлетворятся на 15-20%[6].

В республике по направлению создания и совершенствованию солнечных энергоэффективных устройств и плоских солнечных водонагревателей и научные исследования их тепловых режимов проводили Р.А. Захидов, Р.Р. Аvezов, Ш.И. Клычев, А.Абдурахманов, Н.Р. Аvezова, Б. Хайриддинов, С.Ф. Эргашев и другие.

Настоящая монография посвящена исследованию по моделированию теплового режима и оптимизации параметров емкостных солнечных водонагревательных коллекторов с донным поглощением солнечного излучения.

В монографии использованы результаты научных и экспериментальных исследований проведенных авторами в Физико-техническом институте АН РУз и Гулистанском государственном университете, в рамках заданий ПФИ-3 «Исследование оптических и теплотехнических характеристик системы «светопрозрачная изоляция – лучепоглощающая теплообменная панель» плоских солнечных тепловых коллекторов»(2007-2011гг.) и ППИ-4 «Разработка и реализация экспресс-методики теплового испытания и определения основных теплотехнических параметров плоских солнечных коллекторов и абсорберов для нагрева жидкого теплоносителя»(2015-2017гг.).

В монографии даны научно-технические основы использования емкостных плоских солнечных водонагревательных коллекторов и показаны возможности их использования для получения горячей (теплой) воды в частных и фермерских хозяйствах в теплый период года.

Монография включает четыре разделов: во введении обосновываются актуальность, востребованность исследования, характеризуются объект и предмет, показано соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики, излагается научная новизна и

практические результаты исследования, раскрываются научная и практическая значимость полученных результатов, внедрение в практику результатов исследования; в первой главе монографии «Обзор исследований по разработке и использованию плоских солнечных водонагревательных коллекторов с емкостными приемниками солнечного излучения» приведен анализ результатов исследований по основным конструктивным решениям плоских солнечных водонагревательных коллекторов (ПСВК) с емкостными поглотителями солнечного излучения (ПСИ), состоянии научных исследований по тепловым расчетам данных коллекторов, определению дневного хода температуры нагреваемой воды; во второй главе монографии «Основные теплотехнические параметры ПСВК с емкостными ПСИ с донным лучепоглощением, изготовленными из светопрозрачных покрытий» приведены результаты исследований по определению основных теплотехнических параметров ПСВК с емкостными ПСИ с донным поглощением солнечного излучения (СИ), изготовленных из светопрозрачных пластиков (СП); в третьей главе монографии «Моделирование нестационарного теплового режима ПСВК с емкостными ПСИ с донным лучепоглощением» приведены результаты исследований нестационарного теплового режима ПСВК с емкостным ПСИ изготовленным из СП, с донным поглощением СИ; четвертая глава монографии «Экспериментальное исследование тепло-производительности и тепловой эффективности ПСВК с емкостными ПСИ с донным лучепоглощением изготовленными из СП» посвящена результатам сравнительных экспериментальных исследований в натуральных условиях температурного режима и тепловой эффективности вышеуказанных солнечных коллекторов.

ГЛАВА I. ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РАЗРАБОТКЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ЕМКОСТНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Плоские солнечные водонагревательные коллекторы (ПСВК) являются основными элементами солнечных систем горячего водоснабжения (ССГВС). Они в основном отличаются по конструкции, технологии изготовления их приемников солнечного излучения (ПСИ).

ПСВК условно могут быть разделены на два типа: с проточными и емкостными ПСИ. ПСВК с проточными ПСИ представляют собой уложенные на теплоизолированный плоский ящик (корпус) тонкие зачерненные металлические листы, снабженные теплоотводящими каналами (ТОК) по которым циркулирует нагреваемая вода. Поток СИ, прошедший через СПП корпуса, поглощается ПСИ и преобразуется в тепло. Небольшая часть последнего через ограждающие элементы корпуса теряется в окружающую среду, а основная часть передается к воде, нагреваемой в их ТОК.

В ПСВК с проточными ПСИ, с целью повышения их тепловой эффективности, в основном используются материалы с высоким коэффициентом теплопроводности, такие как медь, алюминий и нержавеющей сталь.

Нагретая в проточных ПСИ вода может непосредственно передаваться к потребителям (днем) или накапливаться в теплоизолированных баках-аккумуляторах (для использования в ночные часы суток).

Основным недостатком ПСВК с металлическим ПСИ, несмотря на их высокую эффективность и температуру получаемой горячей воды (60-70°C), является большая удельная металлоемкость (15÷20 кг/м² у американских и 30÷35 кг/м² у европейских производителей) [8, 9, 10, 11] и дороговизна. Удельная стоимость ПСВК с проточными ПСИ среднего качества (т.е. без применения селективного покрытия на их лучепоглощающей поверхности) составляет 250÷300 долларов США а высококачественных – до 500÷600 долларов США за 1 м² площади.

В связи с тем, что вопросы разработки, создания и исследования ПСВК с проточными ПСИ подробно рассмотрены в работах [12-22], в данной главе приведен краткий обзор исследований по разработке и использованию ПСВК с емкостными ПСИ.

§1.1. Область применения емкостных солнечных водонагревательных коллекторов.

Производственные комплексы любого направления и масштаба дома, коттеджи, дачи, сельскохозяйственные предприятия, учреждения здравоохранения: больницы, поликлиники, санатории, профилактории, центры здоровья и др., гостинично-туристические комплексы, спортивно-оздоровительные комплексы: бассейны открытые и закрытые, стадионы, туристические базы, зоны отдыха, детские учреждения: детские сады, школы, центры детского творчества, летние лагеря и др., торгово-развлекательные

комплексы, небольшие автономные магазины, рестораны, кафе, столовые и другие пункты общественного питания, мобильные социально ориентированные пункты, офисы, объекты железнодорожного и автомобильного транспорта, портов, МЧС и пр., автомойки, автозаправочные станции, теплицы и еще многие разнообразные объекты.

Солнечные водонагреватели позволяют решить целый ряд вопросов:

автономное горячее водоснабжение (круглогодичное или сезонное); поддержка полного или дежурного отопления для помещений любой площади; оптимизация существующих систем горячего водоснабжения и отопления; подогрев воды в закрытых или открытых бассейнах; обогрев теплиц; использование горячей воды в технологических целях.

Преимущества солнечных установок: Уменьшение затрат на обогрев здания и на горячую воду (по тарифам): затраты на нагрев горячей воды -60%, затраты на отопление -30% в год. Автономность источника тепловой энергии. Оптимизация и уменьшение эксплуатационных затрат также при отоплении и ГВС зданий и в случае перебоев в электро- и в газоснабжении. Увеличение срока службы основной или вспомогательной отопительной системы: уже имеющегося бойлера или газового котла - от 2 раз, т.к. дает возможность до 97% уменьшить его нагрузку на существующую систему; Возможность интегрирования в существующую систему теплоснабжения и горячего водоснабжения. Сохранение природы и экологии в целом, защита здоровья людей за счет отсутствия загрязнения окружающей среды. К 2030 г. солнечные электростанции позволят снизить ежегодный уровень выбросов CO₂ в мире на 1,6 млрд. тонн, что эквивалентно выбросам 450 тепловых электростанций (к 2011 г. – около 0,2 млрд).

Использование солнечных установок в режиме ГВС, покрытие потребностей в ГВС за счет солнечной энергии, применение солнечных установок для сезонного ГВС нецелесообразно там, где неотапливаемый период составляет не менее 5 месяцев. Рекомендуемая площадь СК в данном режиме составляет 1 м² на одного человека. Эффективное использование солнечных установок круглогодично для ГВС рекомендовано повсеместно южнее 60° с. ш. как в европейской, так и в азиатской части России. Объем и тепловая нагрузка ГВС унифицирована СНиПами и определяется в расчете на одного человека (50-70 л). Рекомендуемая площадь СК на одного человека составляет 1,0–1,5 м².

§1.2. Основные конструктивные решения ПСВК с емкостными ПСИ

В ПСВК с емкостными ПСИ, в отличие от таковых с проточными ПСИ, функция ПСИ и бака-аккумулятора горячей воды совмещены, и они могут быть изготовлены из теплостойких неметаллических материалов, например, из теплостойких пластиков. В связи с тем, что в ПСВК рассматриваемого типа функции ПСИ, и бак-аккумулятор горячей воды совмещены, их часто называют аккумуляционными [8, 63, 64, 65, 66].

ПСВК, как с проточными, так и с емкостными ПСИ, без светопрозрачного покрытия корпуса принято называть абсорбционными.

В ПСВК с емкостными ПСИ отсутствуют проблемы улучшения теплового контакта между зачерненным тонким листом и ТОК, поиска материалов с высоким коэффициентом теплопроводности, оптимизации межтрубного расстояния, которые присущи ПСВК с проточным ПСИ. Емкостные ПСИ ПСВК, как уже констатировано выше, могут быть изготовлены из теплостойких неметаллических материалов.

ПСВК рассматриваемого типа могут быть выполнены с тепло-изоляционными корпусами со СП и без них. ПСВК с емкостными ПСИ с открытой поверхностью нагреваемой воды и без тепловой изоляции дна и боковых стенок (рис.1.1*а*) могут быть использованы для получения теплой воды температурой до $30\div 35^{\circ}\text{C}$ в летнее время года. Температура теплой воды может быть повышена на $3\div 5^{\circ}\text{C}$ путем теплоизоляции донную часть коллектора (рис.1.1 *б*). Вследствие больших тепловых потерь с открытой поверхности данного коллектора путем испарения, как показали результаты наших экспериментальных исследований [25], при теплоизоляции дна и боковых стенок контейнера и зачернения дна последнего максимальное значение температуры теплой воды в условиях нашей Республики в августе месяце может быть поднято до 42°C . Дневные потери нагреваемой воды за счет испарения в течение светового дня при этом составили 5 л/м^2 (т.е. 10 %).

Существенное повышение температуры получаемой воды в ПСВК с емкостными ПСИ может быть достигнуто за счет исключения тепловых потерь с его открытой поверхности путем использования закрытых резервуаров из неметаллических листовых материалов с зачерненной наружной поверхностью (рис. 1.1 *в* и *г*). Подобные ПСВК широко используется в Японии для подогрева воды к вечерним ваннам [34]. Тепловые потери ПСВК, принципиальные схемы которых приведены на рис. 1.1 *в* и *г*, при прочих равных условиях в два с лишним раза меньше, чем у ПСВК, принципиальные схемы которых приведены на рис. 1.1 *а* и *б*.

Как показали результаты натуральных экспериментов, проведенных А.К. Бааджом [23] и Н.Р. Аvezовой [24], максимальное значение температуры нагреваемой воды в коллекторах рассматриваемого типа в зависимости от удельного объема воды в них (отнесенного к единице площади лучепоглощающей поверхности) в условиях нашей Республики может быть доведено до $45\div 50^{\circ}\text{C}$.

б

а

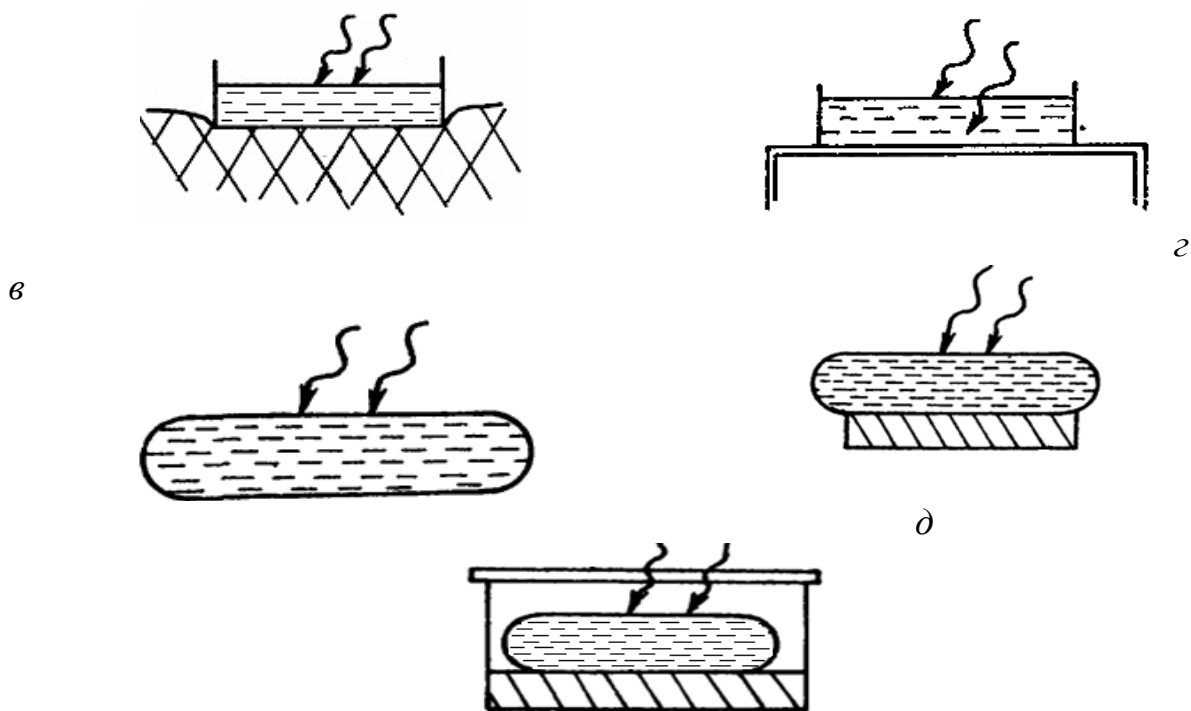


Рис. 1.1. Конструктивные решения ПСВК с емкими приемниками ПСИ:
а и *б* – емкие ПСИ с открытой поверхностью нагреваемой воды без и с донной тепловой изоляцией, соответственно; *в* и *г* емкие ПСИ в виде закрытого резервуара без и с донной тепловой изоляцией, соответственно; *д* – емкий ПСИ в виде закрытого резервуара и размещенный в плоском ящике (корпуса) с теплоизолированными дном и боковыми стенками, покрытом сверху СП.

Температура нагреваемой воды в коллекторах с емкими ПСИ может быть существенно повышена путем тепловой изоляции дна и боковых стенок их корпусов и применения СПП, с помощью которых, как правило, создается известный парниковый эффект.

В ПСВК с емкостными приемниками с открытой поверхностью нагреваемой воды для уменьшения тепловых потерь поверхности воды в работе [26- 27] предложено применение тонкого слоя масла (рис.1.2.).

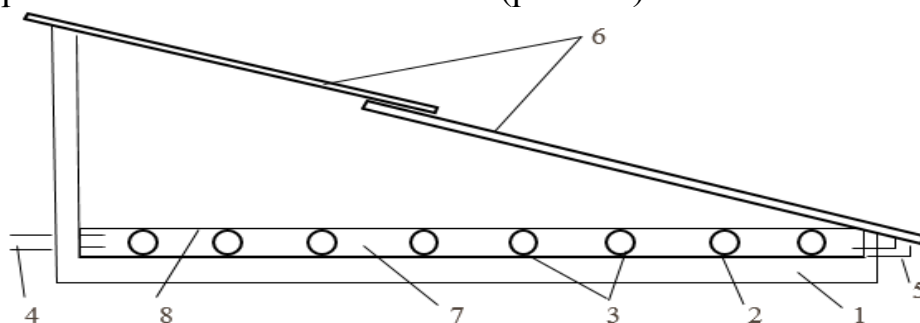


Рис.1.2. Принципиальная схема солнечного змеевикового водо-водонагревателя.
1 - железобетонный бассейн; *2*- гидроизоляция; *3* - трубы змеевика; *4*- труба для слива воды; *5* - труба для выхода излишка воды; *6* - стекло; *7* - вода; *8* - масляная пленка.

Для предотвращения испарения влаги с открытой поверхности ПСИ в работе [28] предложено применение нагревательного элемента, выполненного в виде поплавка, лежащего на поверхности нагреваемой жидкости и имеющего борты

(желоба), которые помещены в камеру, заполненную маслом (рис.1.3.). Масло в желобе исключает контакт поверхности нагреваемой воды с окружающей средой. Наружная поверхность нагревательного элемента (поплавка) обращенная к СПП покрыта черным лаком.

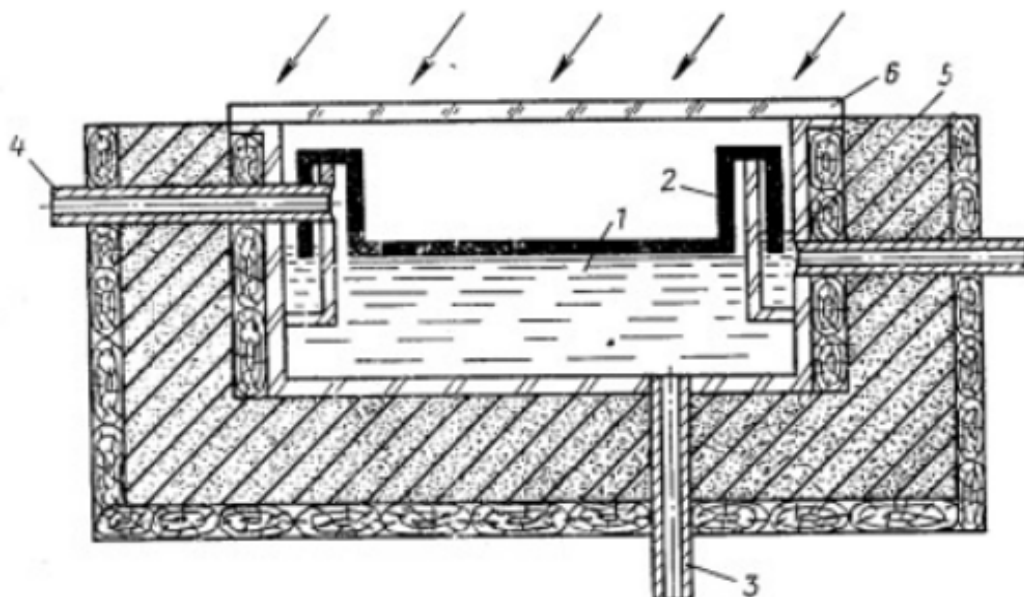


Рис. 1.3. Принципиальная схема ПСВК с металлическим поплавком на поверхности воды: 1- противень (контейнер) для воды, 2- поплавок (нагревательный элемент), 3 и 4 –патрубки для подвода и отвода горячей воды.

ПСВК с емкостными ПСИ явились предметом научных исследований [29, 30, 31, 32, 33]. Они представляют собой металлические или пластиковые контейнеры четырехугольной формы толщиной от 100 до 200 мм, уложенные в теплоизолированный корпус с однослойным плоским СПП из оконного стекла. Поверхность контейнера, обращенная к СПП, как лучепоглощающая, окрашена в черный цвет.

Рассмотрим конструктивные решения и результаты экспериментальных исследований солнечных коллекторов рассматриваемого типа в системах горячего водоснабжения.

В Индии (г. Джодпуре, ($\varphi=26,5^\circ \text{с.ш}$) проведены круглогодичные испытания двух солнечных водонагревателей с плоскими емкостными ПСИ четырехугольной формы из гальванизированной листовой стали толщиной 2 мм и габаритными размерами 1,12 x 0,80 x 0,1 м³ с внутренним объемом 0,09 м³ каждый [29]. Корпуса коллекторов, донная часть которых теплоизолирована стекловолокном толщиной 5 см, изготовлены из мягкой листовой стали. Для уменьшения выпучиваемости приемников под статическим давлением воды, нагреваемой в них, последние, с верхней и нижней сторон закреплены стальными прутками. С целью обеспечения максимального прихода солнечной радиации на лучевоспринимающую поверхность коллекторов в течение года, последние ориентированы на юг под углом 43° к горизонту. Опыты, проведенные с 1 января по 31 декабря 1973 г. позволили получить следующие результаты: при заполнении коллекторов холодной водой с температурой 15°С в 8 ч утра и заборе из них горячей воды в 16 ч вечера в декабре, январе и феврале месяцах –

максимальное значение температуры, получаемой от них горячей воды составляло $50\div 60^{\circ}\text{C}$, а в летние месяцы $55\div 70^{\circ}\text{C}$ при дневной сумме прихода суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность от 14,6 (зимой) до 24,8 тыс. $\text{кДж}/\text{м}^2$ (летом). Разность максимальных значений температур нагреваемой в коллекторах воды (16 ч) и окружающей среды (15 ч) доходила до $25\div 27^{\circ}\text{C}$. Тепловая эффективность коллекторов при температуре получаемой из них горячей воды 60°C составляла $38\div 40\%$. Оптимальное значение толщины слоя воды в емких приемниках коллекторов рассматриваемого типа, на основе выполненных соответствующих расчетов, рекомендовано выбирать $\sim 0,1$ м. При удельной стоимости подобного типа коллекторов в Индии 46,7 долларов США за 1 м^2 площади, стоимость единицы тепловой энергии, полученной из них, в 5 раз меньше, чем стоимость электроэнергии, которая в 1973 г в Индии составляла 0,053 долларов США за $1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

Коллектор аналогичного типа с габаритными размерами $2,2 \times 1,17 \times 0,19 \text{ м}^3$ был всесторонне исследован в 1978-1982 гг. в Туркмении (г. Ашхабад, $\varphi=38^{\circ}\text{с.ш.}$) [30, 31, 32]. Емкостной ПСИ четырехугольной формы изготовлен из листовой стали толщиной 2 мм. Площадь фронтальной поверхности коллектора $2,57 \text{ м}^2$, а лучепоглощающей поверхности ПСИ $2,35 \text{ м}^2$. Внутренний объем ПСИ 152 л. При средних значениях температур окружающей среды $24\div 35^{\circ}\text{C}$, исходной (водопроводной) воды $21\div 29^{\circ}\text{C}$ и дневной сумме прихода суммарной радиации на фронтальную поверхность коллектора $22,3\div 27,4$ тыс. $\text{Дж}/\text{м}^2$ (летом) значение температуры получаемой из коллектора горячей воды составляло $63\div 68^{\circ}\text{C}$, а значение тепловой эффективности при этом $30 \div 48 \%$. Весной и осенью, в результате снижения температуры окружающей среды (до $10 \div 16^{\circ}\text{C}$) и исходной воды (до $11\div 16^{\circ}\text{C}$), температура получаемой из коллектора горячей воды снижалась до $36\div 52^{\circ}\text{C}$. Стоимость производства 1 м^3 горячей воды в солнечных коллекторах рассматриваемого типа для сезонных сельскохозяйственных потребителей составляла 0,45 руб. (в ценах 1987 г.), что в 1,91 и 4,11 раза ниже себестоимости горячей воды, получаемой с помощью топливного котла ВНИИСТО-Мч и автоматического газового водонагревателя АГВ-120 соответственно [30].

Для солнечных коллекторов рассматриваемого типа наряду с емкостными приемниками четырехугольной формы [29], предложены варианты емкостных приемников цилиндрической формы с черной или селективной лучепоглощающей поверхностью с применением отражателей солнечного излучения различной формы, размещенных как внутри, теплоизолированного корпуса коллектора (рис.1.4.) [15]. Тепловая эффективность коллекторов данного типа достигает 60% и более.

Для небольшого повышения температуры нагреваемой с помощью солнечной энергии воды по сравнению с температурой окружающей среды, наряду с солнечными коллекторами с емкостными приемниками и теплоизолированными корпусами, представляет интерес применение абсорбционных солнечных коллекторов с емкостными приемниками с минимальной тепловой изоляцией или

без нее [30]. Коллекторы подобного типа с емкостными приемниками цилиндрической формы из пластика широко применяются в Японии для подогрева воды к вечерним ваннам.

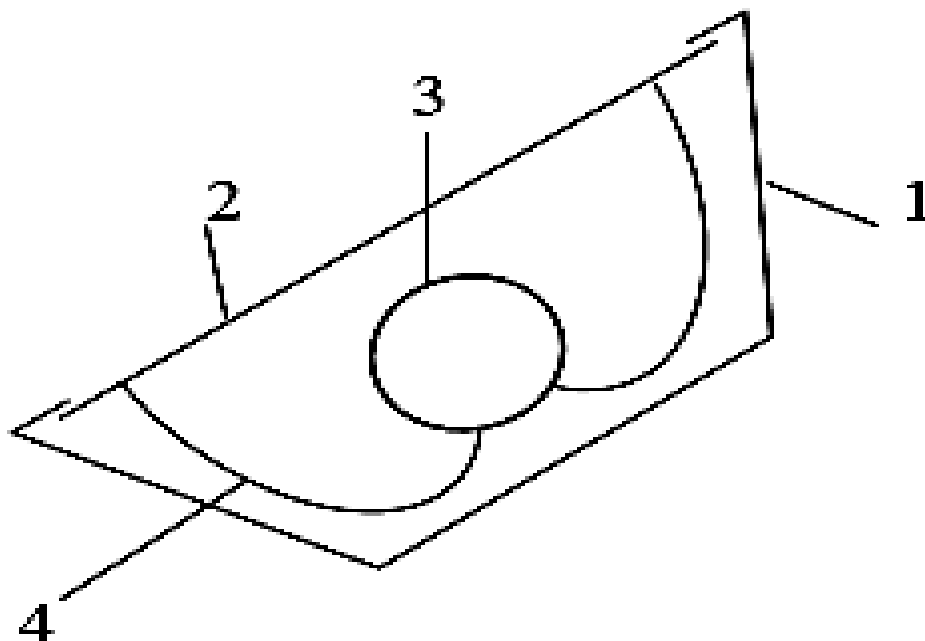


Рис.1.4. Компактный солнечный водонагреватель емкостного типа:
1 - корпус; 2 - остекление; 3 - емкость; 4 - отражатель

Результаты разработки и исследования температурного режима абсорбционных солнечных коллекторов с емкостными приемниками цилиндрической формы приведены в работе [23, 35].

Абсорбционный солнечный коллектор с емкостным приемником цилиндрической формы ($d = 0,3 \text{ м}$; $l = 1,5 \text{ м}$), расположенный в направлении меридиана под углом 30° к горизонту [35]. По результатам натурных исследований данного коллектора, проведенных в условиях г. Бухары, авторы пришли к заключению, что при нагреве воды в нем до $40\div 45^{\circ}\text{C}$ тепловая эффективность коллекторов рассматриваемого типа может составлять не более 15 %, а при нагреве до 50°C - менее 10 %. Как показывают результаты анализа экспериментальных исследований коллекторов подобного типа, проведенные за последние годы, и результаты соответствующих расчетов [23], заключение авторов [35] о низкой тепловой эффективности исследованного ими абсорбционного солнечного коллектора с емкостным приемником цилиндрической формы (10÷15% при температуре нагрева воды до $40\div 50^{\circ}\text{C}$) является необоснованным.

В работе [36] приведены результаты исследования бытового абсорбционного солнечного водонагревателя с приемником конической формы из стального листа толщиной 1 мм, диаметром основания 1 м, высотой 0.35 м и внутренним объемом 110 л. Как показывают результаты испытаний данного коллектора в условиях г. Ферганы, максимальное значение температуры нагреваемой с их помощью воды летом достигает до $50\div 55^{\circ}\text{C}$, а весной и осенью – до $35\div 37^{\circ}\text{C}$. К сожалению, в работе [36] отсутствует информация о параметрах окружающей среды (приход

солнечной радиации, температура окружающей среды и скорость ветра) в период испытаний и о тепловой эффективности обследованного ими коллектора.

Результаты исследований по разработке и оптимизации конструктивных параметров и расположения относительно сторон света абсорбционных солнечных коллекторов с емкостными приемниками в виде цилиндрического кольцевого зазора, изготовленных из листовой стали толщиной 2 мм и листового полиэтилена низкого давления толщиной 5 мм, приведены в работе [23]. Оба коллектора имеют одинаковые габаритные размеры: высота 1,2 м и наружный диаметр 0,4 м. Лучепоглощающая поверхность обоих коллекторов для прямой солнечной радиации по 0,754 м² каждая. Внутренние диаметры цилиндрических стенок коллекторов 0,308 м из стали и 0,326 м из пластика (полихлорвинила). Значения внутреннего объема на единицу боковой лучепоглощающей поверхности для прямой солнечной радиации составляют 80 л/м² для металлического и 65,7 л/м² для пластиковых коллекторов.

Согласно результатам проведенных лабораторных испытаний, в июле 1995г. при среднедневной температуре окружающей среды 30,5÷36,0°С, среднедневной скорости ветра 3,5÷5,0 м/с и температуре холодной воды 16÷18°С температура горячей воды в коллекторах в 16 ч вечера составляла: 54,5÷56,5°С в вертикально расположенном, 61,6÷63,5°С в горизонтально расположенном в меридиональном направлении и 57,5÷58°С в горизонтально расположенном в экваториальном направлении коллекторах. Тепловая эффективность к 16 ч вечера составляла в среднем 0,43÷0,48 для металлического и 0,33 ÷ 0,39 для пластикового коллекторов. Отсюда видно, что теплотехнические показатели рассмотренных коллекторов близки к аналогичным показателям ПСВК среднего качества с теплоизолированными корпусами, с однослойным СПП и проточными листотрубными приемниками [37].

Следует отметить, что для абсорбционных солнечных водонагревательных коллекторов с емкостными ПСИ цилиндрической формы такие относительно высокие значения температуры нагрева воды (54÷63°С), в первую очередь получены благодаря правильному выбору объема воды (т.е. толщины цилиндрического кольцевого зазора). Так, если в коллекторах рассматриваемого типа в качестве емкостных приемников были бы использованы цилиндрические емкости, а не емкости в виде кольцевого зазора цилиндрической формы, то значение внутреннего объема на единицу площади боковой лучепоглощающей поверхности коллектора для прямой солнечной радиации составляло бы 200 л/м². В таких условиях, как показывают расчеты, воду в коллекторах удалось бы нагреть лишь до 32÷35°С. В теплое время года при указанных пределах температуры нагрева воды в солнечных коллекторах рассматриваемого типа их тепловыми потерями в окружающую среду можно пренебречь. Следовательно, значение тепловой эффективности коллекторов в таких случаях должно быть не меньше, чем значение коэффициента лучепоглощения поверхности приемника ($\alpha_{\text{пол}}$).

Для повышения температуры воды в коллекторах рассматриваемого типа путем снижения удельного объема воды (на единицу площади освещаемой прямым солнечным излучением боковой поверхности коллектора) в работе [24] предложены и исследованы абсорбционные солнечные коллекторы с емкими приемниками полуцилиндрической формы без донной тепловой изоляции плоского основания (рис.1.5.). Коллекторы с емкими ПСИ полуцилиндрической формы, плоские основания которых имеют угол наклона к горизонту 30° , были расположены в меридиональном и экваториальном направлениях.



Рис.1.5. Общий вид абсорбционного солнечного водонагревательного коллектора с емкими теплоприемниками полуцилиндрической формы.

Для проведения сравнительных испытаний изготовлены опытные образцы абсорбционных солнечных коллекторов с емкими полуцилиндрическими приемниками в количестве 4 шт. с одинаковыми внутренними объемами (67,9 л каждый), в двух из которых плоские основания теплоизолированы древесностружечной плитой толщиной 1,5 м; диаметр основания – 0,344 м (в соответствии с оптимизационными расчетами); площадь боковой лучепоглощающей поверхности – $0,81 \text{ м}^2$, площадь поверхности плоского основания – $0,516 \text{ м}^2$; удельный объем на единицу площади плоского основания – $131,6 \text{ л/м}^2$, а на единицу площади боковой лучепоглощающей поверхности приемника – $83,8 \text{ л/м}^2$. Лучепоглощающая поверхность приемников окрашена черной матовой краской на пентофталатной основе с коэффициентом интегрального лучепоглощения $0,94 \div 0,96$.

Согласно результатам ориентировочных технико-экономических расчетов, при удельной стоимости коллекторов рассматриваемого типа 20 долларов США (\$) за м^2 площади лучепоглощающей поверхности, стоимость солнечной тепловой энергии составляет: $1,36 \text{ \$/ГДж}$, полученной в коллекторе №3 и $1,49 \text{ \$/ГДж}$ – в коллекторе №1, что соответственно на 25 и 14 % ниже стоимости тепла, получаемого из традиционных теплоисточников, которая на 1 октября 2003 г. по городу Ташкенту составляло 1700 сум/ГДж .

Одним из главных результатов работы [24] является выявление возможностей их использования в сезонных СГВС и бесспорное преимущество ориентации их боковой лучепоглощающей поверхности в меридиональном направлении.

§1.3. Состояние научных исследований по тепловому расчету ПСВК с емкостными ПСИ

Несмотря на массовость применения плоских солнечных водонагревательных коллекторов с емкостными ПСИ в сезонных системах горячего водоснабжения, число публикаций по данному направлению, по сравнению с исследованиями традиционных коллекторов с проточными ПСИ, малочисленно.

Основными задачами научных исследований ПСВК с емкостными ПСИ, как у проточных ПСИ являются:

- определение основных теплотехнических параметров;
- изучение их нестационарного теплового режима;
- тепловая оптимизация внутреннего объема;
- определение ресурсных показателей в сезонных СГВС

Задача изучения нестационарного теплового режима коллекторов рассматриваемого типа, как правило, сводится к определению дневного изменения (хода) температуры нагреваемой в них воды в зависимости от дневного изменения прихода солнечного излучения (основного энергоисточника), температуры окружающей среды и от их внутреннего объема.

Основными теплотехническими параметрами ПСВК с емкостными ПСИ являются приведенный к единице площади лучевоспринимающей поверхности коэффициент тепловых потерь (K_{np-p-o}) и коэффициент тепловой эффективности емкостного ПСИ ($\eta_{тн}$). При установлении расчетных выражений по определению значения этих параметров в зависимости от внешних метеорологических условий и режимов их эксплуатации в большинстве случаев пользуются методами математического моделирования их тепловых режимов.

§1.3.1. Определение дневного хода температуры нагреваемой воды

Задача установления зависимости дневного хода температуры нагреваемой воды (t_g) в ПСВК с емкостными ПСИ от дневного хода поступления потока суммарного СИ на фронтальную поверхность коллектора ($q_{над}$), и изменения температуры окружающей среды (t_o) без учета ее стратификации рассмотрена в [38]. По характеру дневного хода (t_g) можно затем выявить закономерности динамики накопления полезно поглощенной энергии солнечного излучения в емкостных ПСИ ($q_{пол}$), а по конечному значению (t_g) в баке-аккумуляторе - величину накопленной в нем в течение светового дня полезно поглощенной

энергии ($Q_{пол}$). Далее, пользуясь известным отношением для тепловой эффективности солнечного коллектора, можно установить дневной ход мгновенной (средней за определенный малый промежуток времени) эффективности коллектора. Среднедневную эффективность коллектора при этом можно определить по величине конечного значения (t_g), и интегрального значения ($q_{над}$) в течение дня.

В работе [29] на основе решения дифференциального уравнения теплового баланса плоского солнечного коллектора с емким приемником четырехугольной формы и теплоизолированным корпусом предложены выражения для определения дневного хода температуры нагреваемой в нем воды в зависимости от ее объема в коллекторе, прихода суммарной солнечной радиации и изменения температуры окружающей среды. К сожалению, из-за некорректного представления отдельных составляющих и соответствующих обозначений, подход автора по выводу дифференциального уравнения теплового баланса

$$X \frac{dt_g}{d\tau} + Y t_g = Z \quad (1.1)$$

для коллекторов рассматриваемого типа нельзя считать достоверным. В уравнении (1.1) через X , Y и Z соответственно обозначены параметры

$$X = W_g + W_n + (K_c + K_{дн}) \frac{F_{\phi p}}{2}, \quad (1.2)$$

$$Y = (K_c + K_{дн}) F_{\phi p}, \quad (1.3)$$

$$Z = I_{над}^{\Sigma} (\tau\alpha)_{\phi\phi} F_{\phi p} + (K_c + K_{дн}) \frac{F_{\phi p}}{2} \left(\frac{dt_o}{d\tau} + 2t_o \right), \quad (1.4)$$

где W_n и W_g - соответственно, теплоемкости приемника и воды в нем; $I_{над}^{\Sigma}$ - поверхностная плотность потока суммарного СИ на плоскость фронтальной поверхности коллектора; $(\tau\alpha)_{\phi\phi}$ - эффективная лучепоглощающая способность поверхности приемника; $\frac{dt_g}{d\tau}$ и $\frac{dt_o}{d\tau}$ - соответственно, темпы изменения температуры воды в приемнике и окружающей среды.

Первые две составляющие правой части уравнения (1.2), т.е. W_n и W_g , как правило, имеют размерность Дж/°С, а третья $-(K_c + K_{дн}) \frac{F_{\phi p}}{2}$ Вт/°С. Суммирование таких разноразмерных физических величин недопустимо. Также недопустимо суммирование температуры (t_o , °С) и темпа изменения температуры окружающей среды $\frac{dt_o}{d\tau}$, $\frac{град}{час}$ в (1.4).

Решение дифференциального уравнения (1.1) согласно [29] имеет вид

$$t_g = \frac{Z}{Y} + \left(t_{g_0} - \frac{Z}{Y} \right) e^{\frac{Y(t-\tau_0)}{X}}, \quad (1.5)$$

где t_{ϵ_0} - начальная температура воды в коллекторе в момент времени $\tau - \tau_0$.

Отметим, что для солнечных коллекторов с емкими ПСИ, в том числе и для рассматриваемого типа, постоянная времени, определяемая по [29]

$$\tau_n = \frac{W_c + W_n}{(K_c - K_{\partial n}) F_{\phi p}}, \quad (1.6)$$

При $W_c + W_n = 376,8 \text{ кДж/}^\circ\text{C}$ и $(K_c + K_{\partial n}) * F_{\phi p} = 5,95 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$ составляет 17,6 часов.

Естественно, в течение указанного временного интервала значения $I_{\text{над}}^\Sigma$ и t_o , входящие в (1.1) через (1.4), меняются существенно. С математической точки зрения в таких условиях интегрирование дифференциального уравнения (1.1), обычными способами невозможно.

Для установления аналитической зависимости дневного хода (t_ϵ) от ($q_{\text{над}}$) и (t_o) в [38] уравнение теплового баланса для рассматриваемых типов солнечных коллекторов представлено в виде

$$c_{np} \frac{dt_\epsilon}{d\tau} = \eta_{mn} \left[\eta_{\text{онт}} q_{\text{над}} - k_{np_{p-o}} (t_\epsilon - t_o) \right], \quad (1.7)$$

где $c_{np}^{\text{эфф}}$ - приведенная на 1 м^2 фронтальной поверхности эффективная теплоемкость солнечного коллектора; $k_{np_{p-o}}$ - приведенный на 1 м^2 фронтальной поверхности суммарный коэффициент тепловых потерь ограждающих элементов (корпуса) солнечного коллектора; $\eta_{\text{онт}}$ - оптическая эффективность системы СПП корпуса - лучепоглощающая поверхность теплоприемника солнечного коллектора; $dt_\epsilon/d\tau$ - скорость изменения среднеобъемной температуры в теплоприемнике.

В отличие от солнечных коллекторов с проточными теплоприемниками, в исследуемых солнечных коллекторах объем воды, отнесенный на единицу фронтальной поверхности коллектора, составляет $40 \div 100 \text{ л/м}^2$. При этом, как показывают относительно несложные расчеты по методике [37], соответствующие значения ($c_{np}^{\text{эфф}}$) для указанных типов солнечных коллекторов находятся в пределах $192 \div 436 \text{ кДж/(м}^2\text{}^\circ\text{C)}$. Доля теплоемкости воды в теплоприемнике (φ) составляет $82 \div 90\%$ от эффективной теплоемкости коллектора ($c_{np}^{\text{эфф}}$). При $k_{np_{p-o}} = 7,0 \div 8,0 \text{ Вт/(м}^2\text{}^\circ\text{C)}$ (для коллекторов с однослойным СПП и без селективного лучепоглощающего покрытия на поверхности теплоприемника) значения «постоянной времени» коллектора с емкими теплоприемниками согласно [43] составляет

$$\tau_{\text{не}} = \frac{c_{np}^{\text{эфф}}}{k_{np_{p-o}} \eta_{mn}} = 7,62 \div 15,14 \text{ ч}. \quad (1.8)$$

Естественно, в течение указанного, временного интервала значения ($q_{\text{над}}$) и (t_o) в (1.7) меняются существенно, и интегрирование (1.7) в данных

условиях, как уже отмечено выше, невозможно.

В связи с этим для установления зависимости дневного хода (t_g) в солнечных коллекторах с емкостными теплоприемниками от дневного хода поступления потока суммарного СИ на фронтальную поверхность коллектора и изменения температуры окружающей среды в [38] использован метод последовательных интервалов и получено расчетное выражение

$$t_{\epsilon_i} = t_{\epsilon_1} \frac{1 - 0,5 \frac{\eta_{mn} k_{np} p-o}{\varphi c_{np}^{\epsilon\phi\phi}} \Delta\tau_{(i-1)-i}}{1 + 0,5 \frac{\eta_{mn} k_{np} p-o}{\varphi c_{np}^{\epsilon\phi\phi}} \Delta\tau_{(i-1)-i}} + \frac{0,5 \frac{\eta_{mn} k_{np} p-o}{\varphi c_{np}^{\epsilon\phi\phi}} \left[\frac{q_{noz\lambda_{i-1}} + q_{noz\lambda_i} + t_{0_{i-1}} + t_{0_i}}{k_{np} p-o} \right] \Delta\tau_{(i-1)-i}}{1 + 0,5 \frac{\eta_{mn} k_{np} p-o}{\varphi c_{np}^{\epsilon\phi\phi}} \Delta\tau_{(i-1)-i}}, \quad (1.9)$$

где $\bar{q}_{noz\lambda_{0-1}}$, $\bar{t}_{0_{0-1}}$ и $\bar{t}_{\epsilon_{0-1}}$ - соответственно средние значения $q_{noz\lambda}$, t_0 и t_g за интервал времени $\Delta\tau_{0-1}$.

Дневной ход приращения потока полезно поглощенного солнечного тепла в емкостном ПСИ

$$q_{noz(i-1)-i} = \frac{Q_{noz(i-1)-i}}{F_{\phi p}} = \varphi c_{np}^{\epsilon\phi\phi} (t_{\epsilon_i} - t_{\epsilon_{i-1}}). \quad (1.10)$$

где

$$\varphi = \frac{(mc_p)_{\epsilon}}{c_{np}^{\epsilon\phi\phi}}. \quad (1.11)$$

Мгновенная (усредненная за интервал времени $\Delta\tau_{(i-1)-i}$) эффективность коллектора при этом

$$\dot{\eta}_{(i-1)-i} = \frac{\varphi c_{np}^{\epsilon\phi\phi} (t_{\epsilon_i} - t_{\epsilon_{i-1}})}{q_{nad(i-1)-i} \Delta\tau_{(i-1)-i}}. \quad (1.12)$$

Расчетно-теоретические исследования тепловых режимов ПСВК с емкостными ПСИ, выполнены в работах [29, 38]. Основной целью этих исследований явилась изучение закономерностей протекания в них процессов преобразования энергии СИ в низкопотенциальное тепло с учетом дневной нестационарности прихода суммарной солнечной радиации и температуры окружающей среды и на этой основе определение динамики изменения температуры нагреваемой с их помощью воды и их тепловой эффективности.

В работе [23] приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований абсорбционных солнечных коллекторов с емкостными приемниками цилиндрической формы. Одним из важнейших результатов этой работы является совершенствование методов расчета среднеинтегральных потоков прямого (\bar{q}_{nad}^{np}) и рассеянного (\bar{q}_{nad}^p) СИ на боковые лучепоглощающие поверхности цилиндрических приемников и установление соответствующих расчетных формул для их определения:

$$\bar{q}_{nad}^{np} = q_{\perp} \sqrt{M^2 + N^2}, \quad (1.13)$$

$$\bar{q}_{nad}^p = 0,5 [\alpha q_{nad,\epsilon}^{np} + (1 + \alpha) q_{nad,\epsilon}^p] \quad (1.14)$$

где

$$M = C \cos \alpha + (A \cos \gamma + B \sin \gamma) \sin \alpha, \quad (1.15)$$

$$N = B \cos \gamma + A \sin \gamma, \quad (1.16)$$

$$C = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega(\tau_o - \tau) + \sin \delta \sin \varphi, \quad (1.17)$$

$$A = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega(\tau_o - \tau) - \sin \delta \sin \varphi, \quad (1.18)$$

$$B = \cos \delta \sin \omega(\tau_o - \tau). \quad (1.19)$$

где α - угол наклона плоского основания приемника к горизонту; δ - годовое склонение Солнца; φ - географическая широта местности; γ - азимут нормали плоского основания полуцилиндрического приемника относительно южного меридиана; τ_o - момент времени истинного полудня; τ - момент текущего времени суток; ω - 15 град/час – угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси.

В отличие от [30], где оптимальное значение искомого параметра внутреннего объема емкостных ПСИ определено опытным путем, в работе [23] значение искомого параметра для абсорбционных водонагревателей солнечных коллекторов цилиндрической формы определено расчетным путем.

В работе [24] предложен метод расчета потока суммарного СИ на боковую поверхность абсорбционных солнечных водонагревателей с емкостными ПСИ полуцилиндрической формы.

Для определения значения потока прямого СИ, падающего на боковые поверхности $q_{nad,\delta}^{np}$ приемников излучения рассматриваемой формы предложены выражения:

- для приемников, расположенных в направлении меридиана –

$$q_{nad,\delta}^{\Sigma} = \frac{q_{\perp}}{\pi} \left\{ C \cos \alpha + A \sin \alpha + \sqrt{(C \cos \alpha + A \sin \alpha)^2 + B^2} + (0,5\pi - \cos \alpha) a \cos i_2 + \right. \\ \left. + \frac{q_{nad,\varepsilon}^d}{q_{\perp}} [0,5\pi + \cos \alpha + (0,5\pi - \cos \alpha) a] \right\}, \quad (1.20)$$

- для приемников, расположенных в направлении экватора –

$$q_{nad,\delta}^{\Sigma} = \frac{q_{\perp}}{\pi} \left\{ C \cos \alpha + A \sin \alpha + \sqrt{C^2 + A^2} + (0,5\pi - \cos \alpha) a \cos i_2 + \right. \\ \left. + \frac{q_{nad,\varepsilon}^d}{q_{\perp}} [0,5\pi + \cos \alpha + (0,5\pi - \cos \alpha) a] \right\}, \quad (1.21)$$

где

$$\cos i_2 = \frac{q_{nad,\varepsilon}^d}{q_{\perp}} = \cos \delta \cos \varphi \cos \omega(\tau_o - \tau) + \sin \delta \sin \varphi. \quad (1.22)$$

(i_2 - угол падения прямого солнечного излучения на поверхность горизонтально расположенного плоского приемника).

Для определения значения температуры горячей воды на выходе из змеевика, загруженного в противне с водой емкостного ПСИ ПСВК в [26] предложена формула

$$t_e = t_n \left(1 - e^{-\frac{\gamma l}{m_1}} \right) + t_o e^{-\frac{\gamma l}{m_1}} \quad (1.23)$$

где t_e - температура воды, выходящей из змеевика; t_n - температура воды в противне; m_1 - масса воды, протекающей в единицу времени; l - длина трубы; t_o - температура воды, поступающей в змеевик.

$$\gamma = \frac{\pi K_\ell}{C} \quad (1.24)$$

где K_ℓ - коэффициент теплопередачи единицы длины трубы; C - удельная теплоемкость воды.

Результаты экспериментальных исследований, выполненных автором [26], подтверждают достоверность расчетно-теоретических исследований.

За последние годы выполнено большое число научных исследований по моделированию тепловых режимов ПСВК аккумуляционного типа, т.е. с емкостными ПСИ с учетом влияния термической стратификации [8, 39, 40, 41], включая с встроенными теплообменниками [42].

Как показывает анализ результатов исследований по [8, 39, 40, 41, 42] численному моделированию процесса термической стратификации в баках-аккумуляторах ПСВК аккумуляционного типа идеализированная двумерная модель позволяет более точно оценить тепловое состояние и режимных параметров коллекторов рассматриваемого типа.

Процесс термической стратификации в квадратном коллекторе площадью 1 м^2 и объемом 50 л рассмотрен в [39]. Идеализация модели состояла в том, что поток тепла в течение времени прогрева бака считался постоянным (хотя значение его и варьировалось в диапазоне от 50 до 600 Вт/м^2), время процесса не превышало нескольких часов, и задача решалась в двумерном приближении. Эксперименты на макете СВУ показали, что в наклонном баке в течение 4-5 час устанавливается практически линейное распределение температуры по высоте, причём постоянный градиент температуры в баке, расположенном под углом 60° к поверхности земли, устанавливается медленней, чем у баков, располагавшихся под меньшими углами. Это объясняется изменением числа Грасгофа, характерным размером в котором выступала вертикальная проекция бака. В [39] даже делается вывод, что увеличение наклона настолько существенно повышает теплоотдачу от поглощающей панели в воду, что угол установки бака-аккумулятора должен на $5-10^\circ$ превышать широту местности, что противоречит тому факту, что в летнее время с точки зрения максимума поступления СИ на приёмную поверхность СВУ этот угол должен быть примерно на 15° меньше широты. Результаты явно свидетельствуют о необходимости оптимизации угла наклона к горизонту приёмных поверхностей таких установок [39].

В работе [39] исследование по моделированию нестационарного теплового режима ПСВК с емкостными ПСИ выполнялись методом контрольного объёма в двумерном приближении. Выбиралась сетка такого качества, при котором дискретизация переставала влиять на результаты расчёта. Достоверность

результатов количественно проверялась по энергетическим балансам и качественно – путём сравнения с литературными данными и оценкой получаемых значений критериев подобия. При выборе сетки плотность теплового потока принималась постоянной $q = 1 \text{ кВт/м}^2$, баки располагались под углом $\phi = 60^\circ$, начальная температура воды принималась одинаковой по всему объёму и равной 293 К, время прогрева составляло 1 час.

В работе [41] предложена двумерная численная модель солнечного водонагревателя аккумуляционного типа. Модель верифицирована путем сравнения результатов моделирования с трехмерными расчетами и экспериментом. Полученная картина течения позволила подтвердить правомерность использования при моделировании течения жидкости в ПСВК с емкостными ПСИ зонной модели и предложить упрощенную модель установки, результаты расчета по которой хорошо согласуются с результатами численного моделирования.

Баки-аккумуляторы с емкостными ПСИ могут работать при значительной степени стратификации, когда вода в верхней части бака имеет более высокую температуру, чем в нижней. Существующие математические модели стратифицированных баков можно разделить на два типа. Модели первого типа основаны на многосекционном приближении (зонная модель), в котором бак разбивается по высоте на A зон (секций), и для каждой секции записывается уравнение энергетического баланса; в результате получается система из N обыкновенных дифференциальных уравнений, решив которую можно найти температуры в зонах в функции времени. В моделях второго типа используется приближение режима идеального вытеснения, когда отслеживаются и регистрируются размер, температура и положение сегментов с разной температурой [41].

Таким образом, в работах [8, 39, 40, 41, 42] баки-аккумуляторы ПСВК с емкостными ПСИ моделируются с применением зонной модели с небольшим числом зон. Вместе с тем, в СВУ аккумуляционного типа контур солнечного коллектора отсутствует, а нагрев воды в баке осуществляется по всей его высоте. Такие условия отличаются от положенных в основу зонной модели, что делает необходимой оценку ее применимости к бакам установок аккумуляционного типа и разработку упрощенной модели такой установки. Из-за большого времени моделирования, сравнимого с продолжительностью реального процесса, при численном моделировании, как правило, рассматривается лишь короткое (не более суток) время работы установки. При этом моделируемая СВУ обычно рассматривается как работающая без нагрузки.

Методически интересным является подход, развитый в [41] применительно к вертикальному цилиндрическому водяному баку-аккумулятору. Для верификации, построенной двумерной численной модели использованы экспериментальные данные, сама же она служила для оценки точности одномерной зонной модели и определения допустимого количества зон.

Целью настоящей работы также является создание численной модели СВУ аккумуляционного типа и ее верификация, а также разработка и верификация

упрощенной модели установки.

В [42] также, выполнено численное моделирование свободного конвективного теплосъёма в стратифицированном наклонном баке-аккумуляторе со встроенным теплообменником, изучено влияние расхода теплоносителя и угла установки бака на теплопередачу. Изучена возможность объединения нескольких подобных баков в батарею: при малом числе баков их последовательное соединение в батарее оказывается предпочтительней параллельного вследствие существенного выигрыша в производительности. Возможность использования ПСВК аккумуляционного типа, в конструкциях которых совмещаются солнечный коллектор и бак-аккумулятор, существенно ограничена прочностью бака, объём которого обычно составляет около 100 л. Баки, выдерживающие давление водопроводной воды (~ 1 МПа), обычно представляют собой батарею из 8×10 металлических труб диаметром 120-450 мм, соединённых трубами малого диаметра. Увеличение диаметра трубчатых емкостей требует увеличения толщины стенки, но позволяет сократить число емкостей в установке до одной, однако в таких установках необходимо применять концентраторы. Использование в конструкции ПСВК с емкостными ПСИ секционированных трубчатых емкостей приводит также к появлению газовых мешков, сокращающих объём верхней части бака, последовательное соединение труб создаёт цепочку местных гидравлических сопротивлений, а непосредственный нагрев потребляемой воды в коллекторе сопряжён с дегазацией и образованием отложений [42].

Следует отметить, что несмотря на оригинальности исследований по моделированию тепловых режимов ПСВК аккумуляционного типа [8, 39, 40, 41, 42] в них не уделено должного внимания задачам экспериментальной проверки полученных расчетно-теоретических результатов и возможности их реализации в практике. Тем не менее, они представляют очередной «шаг вперед» в области моделирования тепловых процессов в ПСВК с емкостными ПСИ.

ПСВК с емкостными ПСИ отличаются от ПСВК с проточными ПСИ прежде всего простотой конструктивного исполнения. ПСИ солнечных водонагревателей рассматриваемого типа могут быть изготовлены из неметаллических теплоустойчивых материалов. Они могут быть использованы в локальных сезонных СГВС для нужд населения регионов, расположенных ниже географической широты местности $40 \div 45^\circ$. Температура получаемой с их помощью горячей воды при удельной нагрузке $50 \div 70$ л/м² может достигать до $50 \div 60^\circ\text{C}$ для ПСВК со СП и $40 \div 45^\circ\text{C}$ без них.

Выполнено большое число научных исследований по конструктивному улучшению и изучению формирования тепловых режимов коллекторов рассматриваемого типа. Несмотря на это, сравнительно мало внимания уделено вопросам создания и исследования ПСВК с емкостными ПСИ из СПП с донным поглощением СИ.

Недостаточно изучены механизмы формирования коэффициентов тепловых потерь через СП и тепловой эффективности ПСИ ПСВК рассматриваемого типа.

Не изучен механизм формирования эффективной поглощательной способности емкостного ПСИ с донным поглощением СИ, в которой учитывается частичное поглощение и преобразование в тепло СИ в слое воды в них.

Несмотря на отдельные недостатки научных исследований в области разработки, теплового расчета и использования ПСВК с емкостными ПСИ, полученные результаты представляют большой интерес в целях расширения масштабов их практического применения.

Без подобного ознакомления с результатами этих исследований и их анализа, вряд ли можно было ставить и решить задачи, поставленные перед данной монографией, главными из которых являются:

- разработка и обоснование параметров конструкции плоских солнечных водонагревательных коллекторов с емкостными поглотителями солнечного излучения, изготовленных из светопрозрачных пластиков с донным поглощением солнечного излучения;

- определение основных теплотехнических параметров плоских солнечных водонагревательных коллекторов рассматриваемого типа;

- моделирование тепловых режимов и оптимизация основных теплотехнических показателей плоских солнечных водонагревательных коллекторов рассматриваемого типа;

- проведение тепловых испытаний опытных и опытно-производственных образцов коллекторов рассматриваемого типа в натуральных условиях и определение их ресурсных показателей.

ГЛАВА II. ОСНОВНЫЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ЕМКОСТНЫМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДОННЫМ ЛУЧЕПОГЛОЩЕНИЕМ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ПЛАСТИКОВ

ПСВК с емкостными поглотителями солнечного излучения ПСИ, изготовленные из светопрозрачных пластиков, с донным поглощением СИ представляют собой неглубокие (толщиной до 0,1 м) горизонтально расположенные плоские теплоизолированные контейнеры с зачерненным с внутренней стороны дном [44]. Нагреваемая вода находится в плоском резервуаре толщиной 0,05÷0,07 м, изготовленном из светопрозрачного пластика, с патрубками для подвода холодной и отвода горячей (или теплой) воды. СИ, прошедшее сквозь верхнюю и нижнюю светопрозрачные стенки резервуара и слой нагреваемой в нем воды, поглощается внутренней зачерненной поверхностью дна корпуса коллектора и преобразуется в тепло, которое передается к нагреваемой воде.

В связи с тем, что поглощенный и преобразованный в тепло поток СИ к нагреваемой воде передается со стороны дна контейнера, солнечные коллекторы рассматриваемого типа называются как ПСВК с емкостными ПСИ с донным поглощением СИ.

Основными теплотехническими параметрами водонагревательных коллекторов рассматриваемого типа, показывающими степень их энергетического совершенства, и влияющие на их тепловую эффективность, как и у других традиционных ПСВК являются:

- приведенный к единице площади фронтальной поверхности корпуса коллектора суммарный коэффициент тепловых потерь (K_{np-p-o}^{Σ}) и разности среднерабочей температуры зачерненной поверхности теплоприемника и температуры окружающей среды ($t_p - t_o$);

- коэффициент тепловой эффективности ПСИ, характеризующий эффективность переноса тепла от зачерненной поверхности дна корпуса к нагреваемой в рассматриваемом теплоприемнике воды ($\eta_{тн}$);

- приведенная к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК эффективная поглощательная способность суммарного СИ (далее эффективная приведенная поглощательная способность), характеризующая его оптическую эффективность, которая определяется произведением эффективной интегральной поглощательной способности суммарного СИ зачерненной поверхности дна корпуса ($\alpha_{p\text{эфф}}$) на приведенную к единице площади фронтальной поверхности коллектора эффективной пропускательной способности суммарного СИ слоев СП и нагреваемой воды в коллекторе ($\tau_{сп\text{эфф}}$), т.е. $\eta_o = (\alpha_p \tau_{сп})_{\text{эфф}}$;

-приведенная к единице площади фронтальной поверхности корпуса суммарная теплоемкость (далее приведенная теплоемкость) элементов ПСВК (C_{np}), характеризующая тепловую инерционность данного коллектора.

Кроме указанных выше основных теплотехнических параметров ПСВК существует ряд их производных параметров (комплексов), значения которых могут быть определены через значения их основных теплотехнических параметров в различных комбинациях, такие как, $\eta_{mn}K_{np\ p-o}$, $\eta_{mn}(\alpha_p\tau_{cn})_{эфф}$, $\frac{C_{np}}{K_{np\ p-o}}$ и другие. В отличие от традиционных ПСВК с металлическими проточными ПСИ СИ для ПСВК с емкостными ПСИ изготовленными из СП с донным поглощением СИ из-за частичной проницаемости стенок резервуара и верхнего покрытия корпуса наряду с конвективно-лучистыми теплопотерями характерны сквозные лучистые теплопотери с верхней поверхности воды в резервуаре в небосвод.

§2.1. Приведенный к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК коэффициент суммарных тепловых потерь в окружающую среду емкостного ПСИ, изготовленного из СП с донным поглощением СИ

Суммарные тепловые потери в окружающую среду ПСВК с емкостными ПСИ, изготовленные из частично проницаемого для ИК излучения светопрозрачного пластика, с донным поглощением СИ, в соответствии с рис.2.1. складывается из тепловых потерь через СП ($F_{cn}q_{mn_{cn}}$), дно ($F_{дн}q_{mn_{дн}}$) и боковые стенки ($F_{бс}q_{mn_{бс}}$) его корпуса, т.е.

$$\Sigma Q_{mn} = F_{cn}q_{mn_{cn}} + F_{дн}q_{mn_{дн}} + F_{бс}q_{mn_{бс}}, \tag{2.1}$$

где F_{cn} , $F_{дн}$ и $F_{бс}$ - соответственно, площади теплообменных поверхностей СП, дна и боковых стенок корпуса рассматриваемого ПСВК; $q_{mn_{cn}}$, $q_{mn_{дн}}$ и $q_{mn_{бс}}$ соответственно, удельные тепловые потери емкостного ПСИ через СП, дна и боковых стенок корпуса коллектора.

В свою очередь, значение $q_{mn_{cn}}$ в (2.1) складывается из кондуктивно-конвективно-лучистых тепловых потерь в окружающую среду от внутренней зачерненной поверхности контейнера, имеющую температуру t_p , через стенки резервуара, слоя воды в нем, и воздушную прослойку ($q_{mn_{cn}}^{к,л}$) и сквозных лучистых тепловых потерь с поверхности теплой (или горячей) воды через частично проницаемые для ИК излучения стенки резервуара и СП корпуса $q_{mn_{cn}}^{скв.л}$, т.е.

$$q_{mn_{cn}} = q_{mn_{cn}}^{к,л} + q_{mn_{cn}}^{скв.л} \tag{2.2}$$

Значения $q_{mn_{cn}}^{к,л}$, $q_{mn_{cn}}^{скв.л}$, $q_{mn_{дн}}$ и $q_{mn_{бс}}$ в (2.1) и (2.2) определяются из выражений

$$q_{mn_{cn}}^{K,L} = K_{cn_{p-o}}^{K,L} (t_p - t_o); \quad (2.3)$$

$$q_{mn_{cn}}^{CKB,L} = K_{\beta-HC}^{CKB,L} (t_{\beta} - t_{HC}); \quad (2.4)$$

$$q_{mn_{\partial H}} = K_{\partial H_{p-o}} (t_p - t_o); \quad (2.5)$$

$$q_{mn_{\partial c}} = K_{\partial c_{p-o}} (\bar{t}_{\beta} - t_o). \quad (2.6)$$

При написании выражения (2.6) учтено, что в ПСВК рассматриваемого типа тепловые потери емкостного ПСИ через боковые стенки корпуса определяется по разности средней температуры теплой (или горячей) воды в резервуаре \bar{t}_{β} и окружающей среды (t_o).

Подставляя (2.2), (2.5) и (2.6) в (2.1) с учетом значений $q_{mn_{cn}}^{K,L}$ по (2.3) и $q_{mn_{cn}}^{CKB,L}$ по (2.4), входящих в (2.2) и разделив полученное на площадь фронтальной поверхности корпуса ПСВК ($F_{\phi p}$) и разности температур ($t_p - t_o$), получим выражения для определения приведенного к единице площади фронтальной поверхности корпуса ПСВК ($F_{\phi p}$) и разности температур внутренней зачерненной поверхности дна корпуса (контейнера) коллектора (t_p) и окружающей среды (t_o) суммарного коэффициента тепловых потерь в окружающую среду емкостного ПСИ от зачерненной поверхности дна контейнера, где поглощается и преобразуется в тепло энергия СИ

$$K_{np_{p-o}}^{\Sigma} = a \left(K_{cn_{p-o}}^{K,L} + K_{\beta-HC}^{CKB,L} \frac{t_{\beta} - t_{HC}}{t_p - t_o} \right) + \beta K_{\partial H_{p-o}} + c K_{\partial c_{p-o}} \frac{\bar{t}_{\beta} - t_o}{t_p - t_o}, \quad (2.7)$$

где

$$a = \frac{F_{cn}}{F_{\phi p}}; \quad \beta = \frac{F_{\partial H}}{F_{\phi p}}; \quad c = \frac{F_{\partial c}}{F_{\phi p}}, \quad (2.8)$$

$$K_{np_{p-o}}^{\Sigma} = \frac{\Sigma Q_{mn}}{F_{\phi p}}. \quad (2.9)$$

§2.2. Формирование коэффициента тепловых потерь через СП емкостных ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ, изготовленных из частично прозрачных для ИК излучения СП

Основными составляющими суммарного коэффициента тепловых потерь ПСВК рассматриваемого типа являются $K_{cn_{p-o}}^{K,L}$ и $K_{\beta-HC}^{CKB,L}$, на долю которых приходится более чем 80÷85 % значения $K_{np_{p-o}}^{\Sigma}$

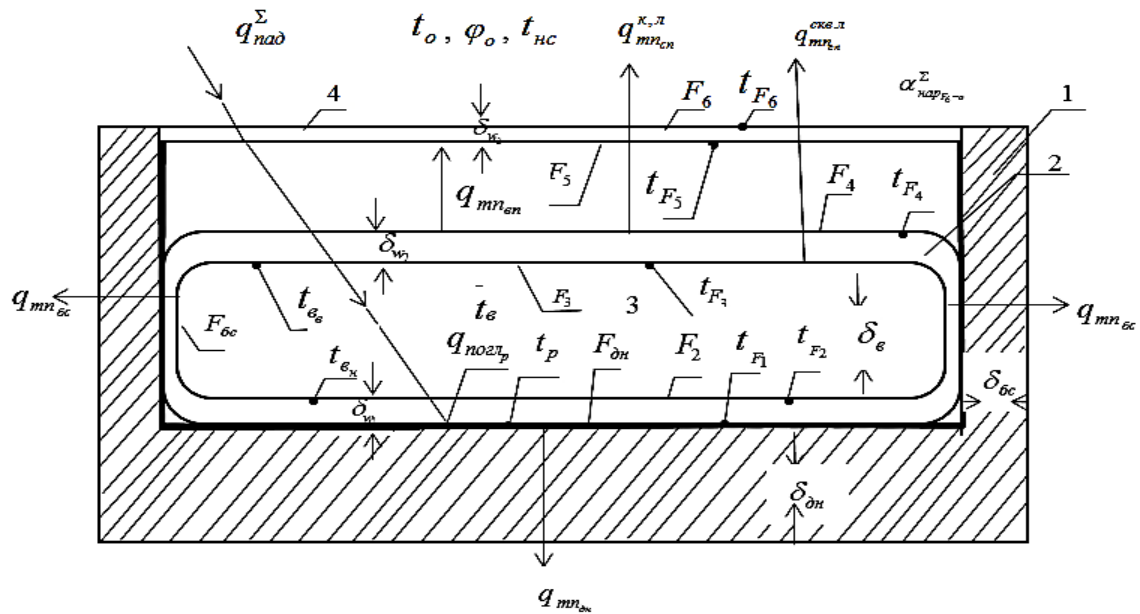


Рис.2.1. Принципиальная расчетная тепловая схема для определения значений составляющих суммарного коэффициента тепловых потерь ПСВК с емкостными ПСИ из СПП, частично проницаемого для ИК излучения с донным поглощением СИ: 1 – корпус ПСВК; 2- резервуар (контейнер) для воды, изготовленный из СП, частично проницаемого для ИК излучения; 3-нагреваемая вода; 4 – верхнее СП корпуса: $q_{mn_{cn}}^{k,l}$ -конвективно-лучистые теплотопотери с наружной поверхности верхней стенки емкостного ПСИ; $q_{mn_{cn}}^{skv,l}$ - сквозные лучистые теплотопотери от верхней поверхности воды в окружающую среду (небосвод) через частично проницаемое для ИК излучения верхней стенки емкостного ПСИ и СП корпуса; $q_{mn_{dn}}$ - тепловые потери от зачерненной поверхности дна контейнера в окружающую среду; $q_{mn_{bc}}$ - тепловые потери от теплой (или горячей) воды через боковые стенки контейнера.

Для определения значений $K_{сп-р-о}^{k,l}$ и $K_{в-нс}^{skv,l}$ в (2.7) пользуемся принципиальной расчетной тепловой схемой, приведенной на рис. 2.1.

В соответствие с принципиальной расчетной тепловой схемой, приведенной на рис.2.1., суммарное термическое сопротивление системы «зачерненное дно корпуса коллектора – окружающая среда» (ΣR) складывается из термических сопротивлений стенок пленочного резервуара с водой (R_{w_1}, R_{w_2}), слоя воды в нем (R_e), замкнутой воздушной прослойки заключенного между наружной поверхностью верхней стенки резервуара и внутренней поверхностью основного слоя СП, корпуса коллектора (R_{cn}), отделяющего последнего от окружающей среды, и наружной поверхности основного слоя СП ($R_{нар}^{\Sigma}$), т.е.

$$\Sigma R = R_{nl_1} + R_{e_w} + R_{nl_2} + R_{en} + R_{cn} + R_{нар}^{\Sigma} \quad (2.10)$$

В свою очередь значение термических сопротивлений в (2.10) определяются из выражений

$$R_{nl_1} = \frac{\delta_{w_1}}{\lambda_{w_1}}, \quad (2.11)$$

$$R_e = \frac{1}{K_{e_{F_2-F_3}}}, \quad (2.12)$$

$$R_{nl_2} = \frac{\delta_{w_2}}{\lambda_{w_2}}, \quad (2.13)$$

$$R_{en} = \frac{1}{K_{en_{F_4-F_5}}} \quad (2.14)$$

$$R_{cn} = \frac{\delta_{w_3}}{\lambda_{w_3}}, \quad (2.15)$$

$$R_{нар_{F_6-o}}^{\Sigma} = \frac{1}{\alpha_{нар_{F_6-o}}^{\Sigma}}, \quad (2.16)$$

где δ_{w_1} , δ_{w_2} и δ_{w_3} - соответственно, толщины пленочных стенок резервуара с водой и светопрозрачного покрытия корпуса; λ_{w_1} , λ_{w_2} и λ_{w_3} -соответственно, коэффициенты теплопроводности материала пленочных стенок резервуара с водой и светопрозрачного покрытия корпуса; $\delta_{\delta_{F_2-F_3}}$ -толщина слоя воды в резервуаре между поверхностями F_2 и F_3 ; $\delta_{en_{F_4-F_5}}$ - толщина воздушной прослойки между поверхностями F_4 и F_5 ; λ_{en} - коэффициент теплопроводности слоя воздуха в замкнутой воздушной прослойке; $\alpha_{нар_{F_6-o}}^{\Sigma}$ - суммарный (конвективный и лучистый) коэффициент теплообмена между наружной поверхностью СП (F_6) и окружающей средой.

Наряду с указанными составляющими суммарного термического сопротивления ($\sum R_{F_6-o}$) для ПСВК рассматриваемого типа характерна сквозная лучистая составляющая тепловых потерь от теплой (или горячей) воды в резервуаре в окружающую среду (небосвод) вследствие частичной прозрачности пленочных стенок резервуара для инфракрасного излучения.

Для ПСВК рассматриваемого типа, пластиковый резервуар и СП корпуса которого изготовлены из полимерных пленок имеющих одинаковые толщины и коэффициенты теплопроводности, выражение (2.10) с учетом значений его членов по (2.11) – (2.16) и равенства значений F_2 , F_3 , F_4 , F_5 , может быть представлено в виде

$$K_{c_{p-o}}^{к,л} = \frac{1}{\sum R_{к,л}} = \left(\frac{3\delta_{nl}}{\lambda_{nl}} + \frac{1}{K_{\delta_{F_2-F_3}}} + \frac{1}{K_{en_{F_4-F_5}}} + \frac{1}{\alpha_{нар_{F_6-o}}^{\Sigma}} \right)^{-1}, \quad (2.17)$$

где $K_{\delta_{F_2-F_3}}$ - коэффициент теплопередачи через слой воды в резервуаре; $K_{F_4-F_5}$ - коэффициент теплопередачи через замкнутую воздушную прослойку.

Переходим к определению значений отдельных составляющих выражения (2.17). При толщине полимерных пленок (δ_{nl}) 0,0005 м (0,5 мм) и их

коэффициенте теплопроводности (λ_{nl}) $1,0 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ [43], значение $\frac{3\delta_{nl}}{\lambda_{nl}}$ в (2.17) составляет $0,0015 \text{ (м}^2\cdot^\circ\text{С)}/\text{Вт}$.

Значение толщины слоя воды в горизонтально расположенном резервуаре (δ_ϵ) в зависимости от периодов года может колебаться от $0,05 \text{ м}$ (в мае, июне и сентябре месяцах) до $0,07 \text{ м}$ (в июле и августе месяцах).

Значение $K_{\epsilon_{F_2-F_3}}$ в (2.17) для горизонтального слоя воды, нагреваемой снизу, в соответствии с [45] определяется из критериального уравнения

$$K_{\epsilon_{F_2-F_3}} = Nu_\epsilon \frac{\lambda_\epsilon}{\delta_{\epsilon_{F_2-F_3}}}, \quad (2.18)$$

где

$$\overline{Nu}_\epsilon = 1,0 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra_{\delta_\epsilon}} \right]^0 + \left[\left(\frac{Ra_{\delta_\epsilon}}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^0 + 2 \left(\frac{Ra_{\delta_\epsilon}^{1/3}}{140} \right)^{1 - \ln(Ra_{\delta_\epsilon}^{1/3}/140)} \quad (2.19)$$

- теплообменное число Нуссельта, представляющее собой коэффициент естественной конвекции в горизонтальном слое воды при подводе тепла снизу (т.е. со стороны дна резервуара);

$$Ra_{\delta_\epsilon} = \frac{\beta_\epsilon g (t_{F_2} - t_{F_3}) \delta_{\epsilon_{F_2-F_3}}^3 Pr_\epsilon}{\nu_\epsilon^2}, \quad (2.20)$$

- число Релея для слоя воды в резервуаре; λ_ϵ , β_ϵ , ν_ϵ^2 , Pr_ϵ - коэффициент теплопроводности, объемный коэффициент расширения, коэффициент кинематической вязкости и число Прандтля для воды при ее средней температуре (t_ϵ), определяемой по

$$\overline{t}_\epsilon = 0,5(t_{F_2} + t_{F_3}). \quad (2.21)$$

$g = 9,80665 \text{ м}^2/\text{с}$ ускорение Земной гравитации (свободного падения).

Значение $K_{\epsilon_{F_4-F_5}}$ в (2.17) определяется из

$$K_{\epsilon_{F_4-F_5}} = \alpha_{\epsilon_{F_4-F_5}}^k + \alpha_{\epsilon_{F_4-F_5}}^l, \quad (2.22)$$

где

$$\alpha_{\epsilon_{F_4-F_5}}^k = Nu_{\epsilon_{F_4-F_5}} \frac{\lambda_{\epsilon_{F_4-F_5}}}{\delta_{\epsilon_{F_4-F_5}}}. \quad (2.23)$$

- конвективный составляющий коэффициент теплопередачи через замкнутую воздушную прослойку;

$$\overline{Nu}_{\epsilon_{F_4-F_5}} = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra_{\delta_{\epsilon_{F_4-F_5}}}} \right]^0 + \left[\left(\frac{5830}{Ra_{\delta_{\epsilon_{F_4-F_5}}}} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^0, \quad (2.24)$$

- теплообменное число Нуссельта, представляющее собой коэффициент естественной конвекции в горизонтальной замкнутой воздушной прослойке при

подводе тепла снизу; $\alpha_{\text{en}_{F_4-F_5}}^{\text{л}}$ - лучистый составляющий коэффициента теплопередачи через замкнутую воздушную прослойку;

$$Ra_{\delta_{\text{en}}} = \frac{\beta_{\text{вд}} g(t_{F_6} - t_{F_5}) \delta_{\text{en}_{F_4-F_5}}^3 \text{Pr}_{\text{вд}}}{\nu_{\text{en}}} \quad (2.25)$$

- число Рэлея для замкнутой воздушной прослойки контейнера.

При значениях $\frac{1708}{Ra_{\delta_e}} > 1$ и $\frac{Ra_{\delta_e}}{5830} - 1 < 1$, а также $\frac{1708}{Ra_{\delta_{\text{en}}}} > 1$ и $\frac{Ra_{\delta_{\text{en}}}}{5830} - 1 < 1$

значения членов в квадратных скобках критериальных уравнений (2.19) и (2.24), в соответствии с [47], принимаются равными нулю.

Значение лучистого составляющего коэффициента теплопередачи через замкнутую воздушную прослойку $\alpha_{\text{en}_{F_4-F_5}}^{\text{л}}$ в (2.22), как правило, определяется из общеизвестного выражения

$$\alpha_{\text{en}_{F_4-F_5}}^{\text{л}} = \varepsilon_{\text{np}_{F_4-F_5}} \sigma (T_{w_2}^2 + T_{w_1}^2) (T_{w_2} + T_{w_1}), \quad (2.26)$$

где

$$\varepsilon_{\text{np}_{F_4-F_5}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{w_1}} + \frac{1}{\varepsilon_{w_2}} - 1 \right)^{-1}. \quad (2.27)$$

- приведенный коэффициент излучения в замкнутой воздушной прослойке. При $\varepsilon_{w_1} = \varepsilon_{w_2} = 0,25$ [52], значение ε_{np} в расчетах может быть принято за 0,143.

Значение $\alpha_{\text{нар}_{F_6-o}}^{\Sigma}$ в (2.17) складывается из конвективного $\alpha_{\text{нар}_{F_6-o}}^{\text{к}}$ и лучистого $\alpha_{\text{нар}_{F_6-o}}^{\text{л}}$ составляющих, т.е.

$$\alpha_{\text{нар}_{F_6-o}}^{\Sigma} = \alpha_{\text{нар}_{F_6-o}}^{\text{к}} + \alpha_{\text{нар}_{F_6-o}}^{\text{л}}, \quad (2.28)$$

Значение лучистого составляющего суммарного коэффициента тепловых потерь от наружной поверхности СП корпуса ПСВК в окружающую среду ($\alpha_{\text{нар}_{F_6-o}}^{\text{л}}$) в (2.28) в соответствии с [48] может быть определено из выражения [37]

$$\alpha_{\text{нар}_{F_6-o}}^{\text{л}} = \varepsilon_{F_6} \sigma (T_{F_6}^2 + T_{\text{нс}}^2) (T_{F_6} + T_{\text{нс}}) \frac{t_{F_6} - t_{\text{нс}}}{t_{F_6} - t_o}, \quad (2.29)$$

где ε_{F_6} - коэффициент излучения верхнего СП корпуса ПСВК; $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ - постоянная Стефана-Больцмана; $T_{\text{нс}}$ - температура небосвода.

При написании (2.29) допущено, что значение коэффициента излучения небосвода ($\varepsilon_{\text{нс}}$) равно 1.

Значение эффективной температуры небосвода ($T_{\text{нс}}, t_{\text{нс}}$) в (2.29) в зависимости от температуры окружающей среды (T_o, t_o) и температуры точки

росы наружного воздуха (t_{mp}) и момента времени текущей сутки (z) в соответствии с может быть определено из

$$T_{nc} = T_o \left[0,711 + 0,0056t_{mp} + 0,000073t_{mp}^2 + 0,013 \cos \omega z \right]^{0,25}, \quad (2.30)$$

где $\omega = 15 \text{ рад/час}$ - угловая скорость вращения Земли вокруг своей оси (значение z отсчитывается от момента времени полуночи (00 ч)).

Значение температуры точки росы наружного воздуха (t_{mp}) в (2.30) в зависимости от температуры (t_o) и относительной влажности (φ_o) воздуха определяющей среды может быть определено из выражения

$$t_{mp} = 235 - \frac{\lg \varphi_o + \frac{7,45t_o}{235 + t_o}}{7,45 - \left(\lg \varphi_o \frac{7,45t_o}{235t_o} \right)}. \quad (2.31)$$

Значение температуры верхнего СПП корпуса ПСВК (t_{F_6}) с одной стороны зависит от температуры наружной поверхности верхней стенки пластикового резервуара (t_{F_4}) и коэффициента теплопередачи через замкнутую воздушную прослойку ($K_{F_4-F_5}$), с другой стороны – от температуры среды (t_o) и суммарного коэффициента теплообмена между наружной поверхностью СП (F_6) и окружающей средой ($\alpha_{нарF_6-o}^\Sigma$) и определяется итерационным методом по выражению

$$t_{F_6} = t_o + \frac{q_{вн}(t_{F_4} - t_o)}{\alpha_{нарF_6-o}^\Sigma}, \quad (2.32)$$

где

$$q_{mn_{вн}} = K_{внF_4-F_5}(t_{F_4} - t_{F_5}). \quad (2.33)$$

- тепловой поток через замкнутую воздушную прослойку.

В существующей практике для расчета конвективного составляющего суммарного коэффициента тепловых потерь от наружной поверхности СП корпуса ПСВК в окружающую среду ($\alpha_{нарF_6-o}^k$) в (2.28) повсеместно принимается размерное выражение Мак Адамса [43]

$$\alpha_{нарF_6-o}^k = 5,7 + 3,8\mathcal{G}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}) \quad (2.34)$$

где \mathcal{G} – скорость ветра в м/с.

Предполагают, что в выражении (2.34) учитываются свободная конвекция и излучение [49]. В связи с тем, что выражение (2.34) получено на основе экспериментов в аэродинамической трубе для плоской пластины площадью $0,5 \text{ м}^2$, остается неизвестным возможность применения его для СП, имеющих площади фронтальных поверхностей $2-3 \text{ м}^2$.

Обобщая результаты исследований, выполненных различными авторами в работе [51] для определения значения $\alpha_{нарF_6-o}^k$ предложены выражения:

$$\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa}-o}^{\kappa} = (6,43 + 3,57g) \left(1 - \frac{\alpha A}{90^\circ}\right) \quad \text{при} \quad g \leq 5 \text{ м/с} \quad (2.35)$$

и

$$\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa}}^{\kappa} = 7,7g \left(1 - \frac{\alpha A}{90^\circ}\right) \quad \text{при} \quad g \geq 5 \text{ м/с} \quad (2.36)$$

где α - угол наклона поверхности СП к горизонту.

Согласно [51] значение коэффициента А в (2.35) и (2.36) может быть принято равным 0,25.

Как показывали результаты поиска по выбору выражения для определения значения $\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa}-o}^{\kappa}$, наряду с вынужденной, следует учесть влияние свободной конвекции, возникающей благодаря разности температур на наружной поверхности СП и окружающей среды.

Значение конвективного составляющего ($\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa}}$) коэффициента суммарного теплообмена ($\alpha_{нар_{F_6}^{\Sigma}}$) в (2.28) в соответствии с [48]

$$\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa}}^{\kappa} = \left[\left(\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa,вын}}^{\kappa} \right)^2 + \left(\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa,л}}^{\kappa} \right)^2 \right]^{0,5}, \quad (2.37)$$

где

$$\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa,вын}}^{\kappa} = Nu_{вын} \frac{\lambda_g^H}{\ell}, \quad (2.38)$$

- составляющий $\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa}}$, обусловленный вынужденной конвекцией на наружной поверхности стенки СП ПСВК; λ_g^H - коэффициент теплопроводности наружного воздуха; ℓ - определяющий размер наружной теплообменной поверхности СП;

$$\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa,св}}^{\kappa} = Nu_{св} \frac{\lambda_g^H}{\ell}, \quad (2.39)$$

- составляющий $\alpha_{нар_{F_6}^{\kappa}}$, обусловленный свободной конвекцией на наружной поверхности стенки СП ПСВК;

Значения чисел $Nu_{вын}$ в (2.38) в соответствии с [49] определяется из

$$Nu_{вын} = 0,86 Re^{0,5} Pr^{0,33} \quad (2.40)$$

где

$$Re = \frac{g \cdot \ell}{\nu_g^H} \quad (2.41)$$

- гидродинамическое число Рейнольдса; ν_g^H - коэффициент кинематической вязкости воздуха; Pr - число Прандтля.

Значение $Nu_{св}$ в (2.39) в соответствии с [50] определяется из

$$Nu_{св}^{0,5} = 0,825 + \frac{0,387 Ra_{a_t}^{0,167}}{\left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr} \right)^{0,5625} \right]^{0,2963}} \quad (2.42)$$

где

$$Ra_{\ell,\gamma} = Gr_{\ell} Pr \quad (2.43)$$

- число Релея;

$$Gr_{\ell,\gamma} = \frac{\beta_{\theta}^H (t_{F_6} - t_o) \ell^3}{\nu_{\theta}^H} \cos \gamma \quad (2.44)$$

- число Граскофа; γ - угол наклона наружной теплообменной поверхности стенки СП относительно вертикальной поверхности;

В связи с тем, что в горизонтально расположенных ПСВК значение γ равно 1, и следовательно $\cos \gamma = 0$. В силу этого обстоятельства значение второго члена правой части выражения (2.42) равно нулю, а значение $Nu_{ce} = (0,825)^2 = 0,681$.

Подставляя полученное таким образом значение Nu_{ce} (2.39), получим

$$\alpha_{нарF_6}^{к,св} = 0,681 \frac{\lambda_{\theta}^H}{\ell} \quad (2.45)$$

Значения ℓ в (2.39)-(2.41) и (2.45) определяется из отношения

$$\ell = \frac{4F}{P} \quad (2.46)$$

(F и P –соответственно, площадь поверхности и периметр СП).

При выполнении численных расчетов по определению значения $K_{сп_{p-o}}^{к,л}$ и $K_{\theta}^{св,л}$ в (2.7) в соответствие с принципиальной тепловой схемой, приведенный на рис. 2.1, может быть допущено равенство площадей поверхностей F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 и F_6 .

В связи с тем, что поверхность лучепоглощения контейнера, имеющая температуру t_p , и наружную поверхность нижней стенки емкостного поглотителя имеющую температуру t_{F_1} , с точки зрения теплового контакта сопряжены между собой, в выполнение теплотехнических расчетов допускается равенство t_p и t_{F_2} . Благодаря сопряженности внутренней поверхности нижней стенки емкостного ПСИ донного слоя воды также можно допустить равенство t_{F_2} и t_{θ_n} .

Аналогичным образом допускается равенство значений t_{F_3} и t_{F_4} .

Для определения значения $K_{\theta-nc}^{св,л}$ в (2,7) пользуемся выражением для определения значения сквозного лучистого составляющего тепловых потерь поверхности воды в пластиковом резервуаре $q_{\theta-nc}^{св,л}$ с учетом коэффициентов пропускания инфракрасного излучения верхней стенки пластикового резервуара (τ_{nl_2}), пластикового СП корпуса коллектора (τ_{nl_3}) и коэффициента пропускания слоя пыли и грязи на наружной поверхности СП (τ_{nc})

$$q_{\theta-nc}^{св,л} = \tau_{nl_2} \tau_{nl_3} \tau_{nc} \varepsilon_{np_{\theta-nc}} \left(T_{\theta}^4 - T_{nc}^4 \right), \quad (2.47)$$

где

$$\varepsilon_{np_{\varepsilon-nc}} = \left(\frac{1}{\varepsilon_{\varepsilon}} + \frac{1}{\varepsilon_{nc}} - 1 \right)^{-1} \quad (2.48)$$

-приведенный коэффициент излучения системы «верхняя поверхность воды-прозрачное покрытие»; $\varepsilon_{\varepsilon} = 0,96$ - коэффициент излучения воды.

Значения τ_{nl_2} и τ_{nl_3} для тепличной полиэтиленовой пленки типа С2 согласно паспортным данным в расчетах могут быть приняты за τ_{nc} - по результатам опытов [12, 24] - 0,9. Значение излучательной способности небосвода, как условие абсолютно черного тела может быть принято за 1.

При $t_{\varepsilon} = 46^{\circ}C$ и $t_{nc} = 14,35^{\circ}C$ (при $t_o = 35^{\circ}C$ и $\varphi_o = 0,2$) и $\varepsilon_{\varepsilon} = 0,96$ значение $\alpha_{\varepsilon-nc}^{скв.л}$, определенное по (2.47), составляет $42,38 \text{ Вт/м}^2$.

Значение коэффициента тепловых потерь от поверхности нагреваемой в пластиковом резервуаре воды, обусловленного сквозными лучистыми потерями в небосвод ($K_{\varepsilon-nc}^{скв.л}$) отнесенного к разности температур ($t_p - t_o$) и определенное из отношения

$$K_{\varepsilon-nc}^{скв.л} = \frac{q_{\varepsilon-nc}^{скв.л}}{t_p - t_o}, \quad (2.49)$$

при $t_p = 48^{\circ}C$, $t_o = 35^{\circ}C$, составляет $3,303 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}C)$.

Таким образом суммарное значение коэффициента тепловых потерь ($K_{c-p-o}^{к.л} + K_{\varepsilon-nc}^{скв.л} \frac{t_{\varepsilon} - t_{nc}}{t_p - t_o}$) в (2.7) составляет $6,394 \text{ Вт/(м}^2 \cdot ^{\circ}C)$.

Приводим пример расчета по определению значений $K_{c-p-o}^{к.л}$ и $K_{\varepsilon}^{скв.л}$ в (2.7). Расчет выполним для средних эксплуатационных условий коллектора рассматриваемого типа с учетом результатов лабораторных испытаний их опытных образцов [25].

Обозначим через F_p - площадь теплообменной поверхности зачерненного дна контейнера. В качестве исходных данных пользуемся результатами измерений температуры окружающей среды (t_o), относительной влажности наружного воздуха φ_o , скорости ветра (\mathcal{G}) и приход суммарного СИ на горизонтальную поверхность ($q_{над}^{\Sigma}$).

Для составления результатов расчетных и экспериментальных исследований в качестве расчетных дней выбраны 14, 17 и 20 июля 2017 г.

14 июля 2017 г. в 12 ч дня согласно данным лабораторных измерений в натуральных условиях $t_o = 35^{\circ}C$ и $\varphi_o = 0,2$. Значение \mathcal{G} изменялось в интервале от 2,5 до 3,0 м/с. Толщина слоя воды в резервуаре (δ_{ε}) 0,06 м.

Согласно результатам измерений значения t_p с помощью термопар в момент времени 12 ч. 14 июля 2017 г. составляло 48°C , а средней температуры воды в резервуаре (\bar{t}_e) 47°C . Из условия сопряженности поверхностей $F_{\text{он}}$ и F_1 , а также равенства F_1 и F_2 , значений температур воды в нижнем слое (t_{e_n}) принимаем равным (t_p), т.е. 48°C . Температура воды в верхнем слое (t_{e_v}) согласно (2.21) принимаем 46°C . В соответствие с этим значения t_{F_2} и t_{F_3} также могут быть приняты равным 48 и 46°C .

Значения β_e , ν_e , a_e , λ_e и Pr_e согласно [46] при $\bar{t}_e = 47^\circ\text{C}$ составляют:

$$\beta_e = 4,335 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}; \nu_e = 0,58175 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, a_e = 0,156 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \lambda_e = 64,475 \cdot 10^{-2} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}) \text{ и } \text{Pr}_e = 3,7292.$$

При значениях $t_{F_2} = 48^\circ\text{C}$, $t_{F_3} = 46^\circ\text{C}$, $\delta_e = 0,06 \text{ м}$, $\text{Pr}_e = 3,7292$ и $\nu_e = 0,58175 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ соответствующее значение числа Релея Ra_{e_e} , определенное из (2.20), составляет $202365,5 \cdot 10^{-2}$. Значение отношения $\frac{1708}{Ra_{e_e}}$ в (2.19) при этом составляет 0,0000844, что в 11848,34 раза меньше, чем 1 и в связи с этим в дальнейших расчетах можно пренебречь. Значение членов

$$\left[\left(\frac{Ra_{e_e}}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \text{ и } \left[2 \left(\frac{Ra_{e_e}^{1/3}}{140} \right)^{1 - \ln(Ra_{e_e}^{1/3}/140)} \right] \text{ в (2.19) при этом составляют } 14,141 \text{ и } 2,4983,$$

соответственно. Значение числа Нуссельта (Nu_{e_e}) определенное по (2.19), при этом составляет 19,0793. Это означает, что благодаря возникновению естественной конвекции в горизонтальном слое воды при подводе тепла снизу теплопередача через слой воды в 19,08 раза больше, по сравнению со случаем, когда тепловой поток к нагреваемой воде передается сверху (т.е. когда отсутствует свободная конвекция).

Значение коэффициента теплопередачи через слой нагреваемой в резервуаре воды ($K_{e_{F_2-F_3}}$), определенное из (2.18), при этом составляет $205,023 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{C})$.

Аналогичным образом определяется значение кондуктивно-конвективного составляющего коэффициента теплопередачи через замкнутую воздушную прослойку коллектора $\alpha_{en_{F_4-F_5}}^k$. При значениях $t_{F_4} = 46^\circ\text{C}$, $t_{F_5} = 38^\circ\text{C}$ (по результатам итерационных расчетов) значение \bar{t}_{en} , определен по

$$\bar{t}_{en} = 0,5(t_{F_4} - t_{F_5}), \quad (2.50)$$

составляет $42^{\circ}C$. При $\bar{t}_{en} = 42^{\circ}C$ согласно [46] $\beta_e = 31,7309 \cdot 10^{-4} K^{-1}$;
 $\nu_{en} = 17,158 \cdot 10^{-6} m^2/c$, $a_e = 0,156 \cdot 10^{-6} m^2/c$, $a_{en} = 24,58 \cdot 10^{-6} m^2/c$,
 $Pr_e = 0,698$ и $\lambda_{en} = 2,774 \cdot 10^{-2} Wm/(m^2 \cdot c)$.

При толщине замкнутой воздушной прослойки (δ_{en}) $0,025 m$ значение числа Рэлея (Ra_{en}) в рассматриваемой прослойке составляет 9222,21, а числа Нуссельта (\overline{Nu}_{en}) 2,338. Значение $\alpha_{en_{F_4-F_5}}^k$, определенное (2.23) при этом составляет $2,595 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$.

Значение лучистого составляющего коэффициента теплопередачи через замкнутую воздушную прослойку коллектора $\alpha_{en_{F_4-F_5}}^l$, определенное из выражения (2.26) при $\varepsilon_{w_2} = 0,25$ [52] и следовательно $\varepsilon_{np_{F_4-F_5}} = 0,143$, $T_{F_4} = 319,15K$ и $T_{F_5} = 311,15K$ составляет $1,014 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$. Значение $K_{en_{F_4-F_5}}$, определенное по (2.22), при этом составляет $3,609 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$.

Значение конвективного составляющего суммарного коэффициента теплообмена наружной поверхности СП ($\alpha_{нар_{F_6-o}}^k$) в (2.28), при изменении скорости ветра (\mathcal{G}) от $2,5$ до $3,5 m/c$, $t_o = 35^{\circ}C$ и $\alpha = 0^{\circ}$ согласно расчетам, выполненных по формулам (2.39) (с соответствующим учетом критериальных уравнений (2.40) и (2.45), составляет $15,35 \div 18,92 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$.

Значение лучистого составляющего суммарного коэффициента теплообмена наружной поверхности СП ($\alpha_{нар_{F_6-o}}^l$) в (2.28) при эффективной температуре небосвода (t_{nc}), $14,35^{\circ}C$ определенной по (2.30) при $t_o = 35^{\circ}C$, $\varphi_o = 0,2$ в момент времени светового дня (τ) $12 ч$), составляет $6,6 \div 9,18 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$

Значение $\alpha_{нар_{F_6-o}}^{\Sigma}$, определенное по (2.28) колеблется в интервале от $21,95 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ (при $\mathcal{G} = 2,5 m/c$) до $28,10 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$ (при $\mathcal{G} = 3,5 m/c$). Среднее значение $\alpha_{нар_{F_6-o}}^{\Sigma}$ в дальнейших расчетах (при $\mathcal{G} = 3,0 m/c$) может быть принято, как среднее значение между $21,95$ и $28,10 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$, за $25,025 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$, что хорошо согласуется с результатами расчетов, выполненных для традиционных ПСВК [43, 37, 24].

Значение $K_{c_{p-o}}^{k-l}$, определенное по (2.17) при $\frac{3\delta_{nl}}{\lambda_{nl}} (0,0015 (m^2 \cdot ^{\circ}C)/Wm)$, $K_{6_{F_2-F_3}}$ ($205,023 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$), $K_{en_{F_4-F_5}}$ ($3,609 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$) и $\alpha_{нар_{F_6-o}}^{\Sigma}$ ($25,025 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$), составляет $3,091 Wm/(m^2 \cdot ^{\circ}C)$.

§2.3. Методика определения составляющих суммарного коэффициента тепловых потерь емкостного ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ, изготовленными из частично прозрачных для ИК излучения СПП

Наряду с определением значений $K_{сн_{p-o}}^{κ,λ}$, $K_{в-нс}^{скв.λ}$ для ПСВК рассматриваемого типа представляет интерес определения значений $K_{бс_{p-o}}$, $K_{дн_{p-o}}$ входящих в (2.7). Принципиальная расчетная схема для определения значений $K_{бс_{p-o}}$ и $K_{дн_{p-o}}$ приведена на рис. 2.1.

В соответствии с рис.2.1. значение $K_{бс_{p-o}}$ в (2.7) определяется из известного из курса теплопередачи [48]

$$K_{бс_{p-o}} = \left(\frac{\delta_{бс}}{\lambda_{бс}} + \frac{1}{\alpha_{нар}^{\Sigma}} \right)^{-1} \tag{2.51}$$

где $\delta_{бс}$, $\lambda_{бс}$ - соответственно, толщина и коэффициент теплопроводности материала боковой стенки корпуса; $\alpha_{нар}^{\Sigma}$ -коэффициент суммарного теплообмена между наружной поверхностью боковой стенки корпуса и окружающей средой.

При толщине боковой стенки корпуса коллектора $\delta_{бс}$ (0,05м), коэффициенте теплопроводности $\lambda_{бс}$ (0,05 Вт/(м · °С)) и $\alpha_{нар}^{\Sigma} = 15,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ (т.к. значение $\alpha_{нар}^{\Sigma}$ на $10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ меньше, чем значение $\alpha_{нар_{F_6-o}}^{\Sigma}$, которое равно $\approx 25 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$) значение $K_{бс_{p-o}}$, определенное по (2.51) составляет $0,937 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$. Значение коэффициента c в (2.7), определяемое из отношения площади фронтальной поверхности в плане ($F_{бс}$) к площади фронтальной поверхности рассматриваемого коллектора ($F_{фр}$) для ПСВК рассматриваемого типа, в котором $F_{фр} = 5,303 \text{ м}^2$ периметр среднего поперечного сечения боковых стенок корпуса в плане ($P_{бс}$) 12,1 м и $\delta_{бс} = 0,05 \text{ м}$ составляет $c = 0,114$, а значение $c_{бс} K_{бс_{p-o}}$ при этом составляет $0,107 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$.

Таким образом, значение $c K_{бс_{p-o}}$ в (2.7) с учетом значений $\bar{t}_в = 47^\circ \text{С}$, $t_o = 35^\circ \text{С}$, $t_p = 48^\circ \text{С}$, $c = 0,114$ и $K_{бс_{p-o}} = 0,937 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ составляет $0,104 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$. Дно корпуса коллектора изготовлено из бетонной плиты толщиной ($\delta_б$) 0,05м с коэффициентом теплопроводности ($\lambda_б$) $0,84 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$ и теплоизолировано камышитовой плитой толщиной ($\delta_{кн}$) 0,072м с коэффициентом теплопроводности ($\lambda_{кн}$) $0,05 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°С})$. Согласно [37] значение коэффициента тепловых потерь через донную тепловую изоляцию (с учетом термического сопротивления бетонной плиты) может быть определено по формуле

$$K_{\text{дн}p-o} = \left(\frac{\delta_{\bar{\sigma}}}{\lambda_{\bar{\sigma}}} + \frac{\delta_{\text{кн}}}{\lambda_{\text{кн}}} \right)^{-1}. \quad (2.52)$$

При указанных выше значениях $\delta_{\bar{\sigma}}$, $\lambda_{\bar{\sigma}}$, $\delta_{\text{кн}}$, $\lambda_{\text{кн}}$ значение $K_{\text{дн}p-o}$ составляет 0,667 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$. Значение коэффициентов a и b , входящих в (2.7) равны и определяются из отношений площади теплообменных поверхностей воды в пластиковом резервуаре ($F_{\bar{\sigma}}$) и слоя тепловой изоляции дна корпуса коллектора ($F_{\text{дн}}$) к площади фронтальной поверхности корпуса коллектора ($F_{\text{фр}}$) и составляет 0,943.

Результаты исследований по определению значений $K_{\text{сн}p-o}^{\text{к,л}}$, $K_{\text{в-нс}}^{\text{скв,л}}$, $K_{\text{дн}p-o}$, $K_{\text{бс}p-o}$, выполненных в разделах 2.1, 2.2, 2.3 позволяют определить суммарное значение $K_{\text{нр}p-o}$.

$$\text{При значениях } a=b=0,943, \quad c=0,114, \quad \left(K_{\text{сн}p-o}^{\text{к,л}} + K_{\text{с}p-o}^{\text{скв,л}} \frac{t_{\bar{\sigma}} - t_{\text{нс}}}{t_p - t_o} \right) = K_{\text{дн}p-o} = 0,667 \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С}),$$

$K_{\text{бс}p-o} = 0,937 \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, $\bar{t}_{\bar{\sigma}} - t_o = 12^\circ\text{С}$ и $t_p - t_o = 13^\circ\text{С}$ значение $K_{\text{нр}p-o}$ определенное по (2.7) составляет 6,766 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$.

§2.4. Определение коэффициента тепловой эффективности емкостного ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ

Как отмечено выше, коэффициент тепловой эффективности ПСИ коллектора рассматриваемого типа ($\eta_{\text{тн}}$), характеризует эффективность переноса тепла от зачерненной поверхности дна корпуса к нагреваемой в нем воде.

В соответствие с [37] значение $\eta_{\text{тн}}$ для плоских ПСИ, имеющих ширину B , может быть определено из выражения

$$\eta_{\text{тн}} = \left(1 + \frac{BK_{\text{нр}p-o}}{\lambda_w \nu_3} + \frac{BK_{\text{нр}p-o}}{\alpha_{\text{квн}} \nu_4} \right)^{-1}, \quad (2.53)$$

где ν_3 и ν_4 –соответственно, средний и нижний периметры ширины дна ПСИ.

Для ПСИ, принципиальная расчетная тепловая схема которого приведена на рис.2.1, с большой точностью можно допустить равенство ν , ν_3 и ν_4 и в связи с этим для ПСИ рассматриваемого типа может быть представлено в виде

$$\eta_{\text{тн}} = \left[1 + K_{\text{нр}p-o}^{\Sigma} \left(\frac{\delta_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_{\text{квн}}} \right) \right]^{-1}, \quad (2.54)$$

где δ_w и λ_w - соответственно, толщина и коэффициент теплопроводности нижней стенки пластикового ПСИ; $\alpha_{\text{квн}}$ -коэффициент теплоотдачи от внутренней поверхности нижней стенки ПСИ к нагреваемой в нем воде.

Методика определения значения, приведенного к единице фронтальной поверхности корпуса ПСВК коэффициента суммарных тепловых потерь от его зачерненного дна K_{np-p-o}^{Σ} изложена в разделе 2.1.

Как следует из (2.54), значение $\eta_{тн}$ при прочих равных условиях (имеются в виду δ_w , λ_w и K_{np-p-o}^{Σ}) в основном зависит от $\alpha_{\kappa_{вн}}$ -коэффициента теплоотдачи от внутренней поверхности нижней стенки ПСИ к нагреваемой в нем воды.

Для определения значения $\alpha_{\kappa_{вн}}$ для горизонтального слоя неподвижной воды в диапазоне излучения числа Прандтля (Pr) от 0,6 до 2000 (тепло передается к нагреваемой воде снизу) пользуемся критериальными уравнениями, предложенными в [53, 54] т.е.

$$\overline{Nu} = 0,96Ra_{\ell}^{\frac{1}{6}} \quad \text{при} \quad 1 \leq Ra_{\ell} \leq 200, \quad (2.55)$$

$$\overline{Nu} = 0,54Ra_{\ell}^{\frac{1}{4}} \quad \text{при} \quad 200 \leq Ra_{\ell} \leq 8 \cdot 10^6, \quad (2.56)$$

$$\overline{Nu} = 0,15Ra_{\ell}^{\frac{1}{3}} \quad \text{при} \quad 8 \cdot 10^6 \leq Ra_{\ell} \leq 3 \cdot 10^{10}, \quad (2.57)$$

где

$$\overline{Nu} = \frac{\alpha_{\kappa_{вн}} \ell}{\lambda_{\epsilon}} \quad (2.58)$$

- число Нуссельта;

$$Ra_{\ell} = \frac{\beta_{\epsilon} g (t_c - t_{\infty}) \ell^3 Pr}{\nu_{\epsilon}^2} \quad (2.59)$$

- число Рэлея;

$$\ell = \frac{F_n}{P_n} = \frac{A \cdot B}{2(A+B)} \quad (2.60)$$

- определяющей размер поверхности воды в ПСИ (A и B – соответственно, длина и ширина дна емкостного ПСИ); λ_{ϵ} и ν_{ϵ} - соответственно, коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воды при ее средней температуре, определяемой из

$$\overline{t_{\epsilon}} = 0,5(t_c - t_{\infty}), \quad (2.61)$$

(t_c и t_{∞} - соответственно, температуры внутренней поверхности нижней стенки резервуара ПСИ и воды вдали от этой поверхности); β_{ϵ} - коэффициент объемного расширения воды при $\overline{t_{\epsilon}}$.

При ширине (B) и длине (A) резервуара ПСИ, соответственно 1 и 5 м значение ℓ , определенное по (2.60), равно 0,417 м. При $t_c = 48^{\circ}C$ и $t_{\infty} = 47^{\circ}C$ значение $\overline{t_{\epsilon}}$, определенное по (2.61), составляет $47,5^{\circ}C$. При $\overline{t_{\epsilon}} = 47,5^{\circ}C$ значения β_{ϵ} , ν_{ϵ} и Pr , входящие в (2.59) составляют $4,335 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}C$; $0,58175 \cdot 10^{-6} м^2 / с$ и 3,7292. Значение числа Ra_{ℓ} , определенное по (2.59), составляет $3,406 \cdot 10^8$.

В связи с тем, что значение Ra_ℓ , определенное таким образом, находится в диапазоне его изменения от $8 \cdot 10^6$ до $3 \cdot 10^{10}$, для расчета значения $\alpha_{\kappa_{\text{вн}}}$ пользуемся выражениями (2.58) и (2.57), т.е.

$$\alpha_{\kappa_{\text{вн}}} = \overline{Nu} \frac{\lambda_g}{\ell} = 0,15 Ra_\ell^{\frac{1}{3}} \frac{\lambda_g}{\ell}, \quad (2.62)$$

При значениях $Ra_\ell = 3,406 \cdot 10^8$, $\lambda_g = 64,475 \cdot 10^{-2} \text{ Bm}/(\text{M} \cdot ^\circ\text{C})$ (при $\bar{t}_g = 47^\circ\text{C}$) и $\ell = 0,417 \text{ м}$ значение $\alpha_{\kappa_{\text{вн}}}$, определенное по (2.62), составляет $162,0 \text{ Bm}/(\text{M}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

При значениях $\delta_w = 0,0005 \text{ м}$, $\lambda_w = 1,0 \text{ Bm}/(\text{M} \cdot ^\circ\text{C})$, $K_{\text{нрр-о}}^\Sigma = 6,766 \text{ Bm}/(\text{M}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ значение $\eta_{\text{тп}}$, определенное из (2.54) составляет 0,9568.

Представляет интерес сопоставление значений $\alpha_{\kappa_{\text{вн}}}$ и $\eta_{\text{тп}}$ для ПСИ рассматриваемого типа, когда к неподвижному слою воды в резервуаре тепло подводится сверху.

Согласно [45], тепловой поток к воде направлен сверху вниз значение $\alpha_{\kappa_{\text{вн}}}$ определяется из критериальных уравнений

$$\overline{Nu} = 0,68 Ra_\ell^{0,2} \quad \text{при} \quad 3 \cdot 10^5 \leq Ra_\ell \leq 10^8, \quad (2.63)$$

$$\overline{Nu} = 0,27 Ra_\ell^{0,25} \quad \text{при} \quad 10^8 \leq Ra_\ell \leq 3 \cdot 10^{10}, \quad (2.64)$$

Согласно результатам расчетов, при $Ra_\ell = 3,406 \cdot 10^8$ значение $\alpha_{\kappa_{\text{вн}}}$ определенное по формуле (2.62), составляет $64,75 \text{ Bm}/(\text{M}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, что в 2,5 раза меньше по сравнению со случаем, когда тепловой поток к горизонтальному слою неподвижной воде подводится снизу, что хорошо подтверждается с данными [55].

При $\alpha_{\kappa_{\text{вн}}} = 64,75 \text{ Bm}/(\text{M}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и $K_{\text{нрр-о}}^\Sigma = 6,766 \text{ Bm}/(\text{M}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ значение $\eta_{\text{тп}}$, определенное по (2.54), составляет 0,9026, что на 6% выше по сравнению со случаем, когда тепловой поток к горизонтальному слою воды в резервуаре подводится сверху. Указанное обстоятельство свидетельствует о преимуществе ПСВК с емкостным ПСИ с донным поглощением СИ по сравнению с по токовым лицевым поглощением СИ.

§2.5. Эффективный коэффициент поглощения СИ в емкостных ПСИ ПСВК с емкостными ПСИ с донным поглощением излучения

В отличие от традиционных ПСВК, ПСИ которых поглощают СИ лицевой зачерненной поверхностью, в емкостных ПСИ, изготовленных из СПИ, СИ главным образом поглощается зачерненной поверхностью дна корпуса, которая сопряжена с наружной поверхностью нижней стенки ПСИ.

По этой причине механизм формирования коэффициента поглощения СИ в ПСИ рассматриваемого типа несколько отличается от таковых у традиционных ПСИ. Главное отличие заключается в частичном поглощении СИ, прошедшего через верхнюю светопрозрачную стенку ПСИ, слоем воды в нем с коэффициентом поглощения СИ (α_g) и учет его в тепловом балансе данного

ПСИ. Обозначим эффективный коэффициент поглощения системы «слой воды-зачерненное дно» через $\alpha_{эфф}^{\delta-\delta}$.

Основой методики расчета по определению значения $\alpha_{эфф}^{\delta-\delta}$ являются известные методы по определению потери энергии за счет отражения и поглощения в зеркальных солнечных установках с лицевым прозрачным защитным покрытием [56, 58]. Принципиальная расчетная схема которой для определения $\alpha_{эфф}^{\delta-\delta}$ в солнечных коллекторах рассматриваемого типа приведена на рис. 2.2.

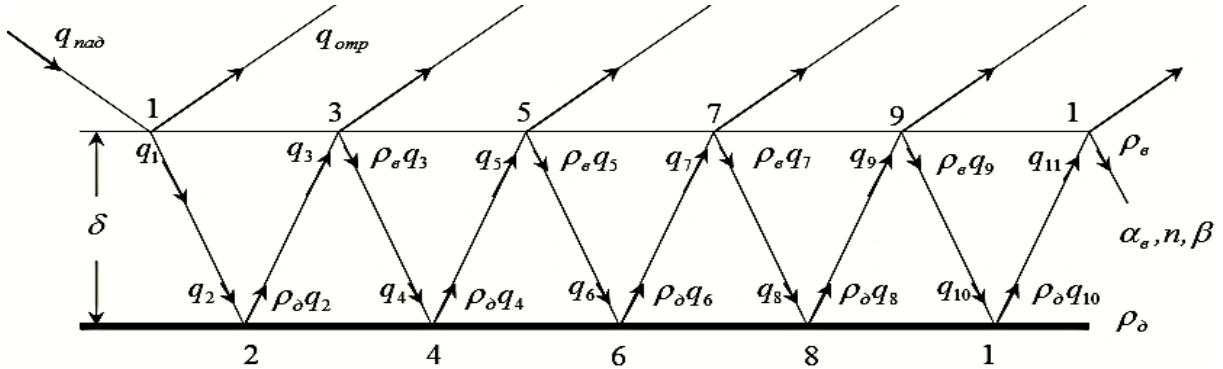


Рис.2.2. Принципиальная расчетная схема для определения $\alpha_{эфф}^{\delta-\delta}$ в системе «вода – зачерненное дно» емких лотковых СВК; δ -толщина слоя воды; ρ_e и ρ_d -соответственно, коэффициенты отражения поверхности воды и зачерненного дна; α_e, n, β -соответственно, коэффициенты поглощения, преломления и ослабления СИ воды; $q_{над}$ и $q_{отр}$ - соответственно, поверхностные плотности потоков падающего на открытую поверхность воды в коллекторе и отраженного от нее СИ.

В соответствии с этой схемой, значения поверхностной плоскости потока поглощенного СИ - $q_{ногл}^{\delta-\delta}$ и эффективного коэффициента поглощения СИ на его основе в системе «вода –зачерненное дно» $\alpha_{эфф}^{\delta-\delta}$ коллекторов, определяется суммой ряда, учитывающего многократные внутренние отражения СИ между открытой поверхностью воды и поверхностью зачерненного дна

$$\begin{aligned}
 q_{ногл}^{\delta-\delta} = & q_1 - q_2 + (\rho_d q_2 - q_3) + (\rho_e q_3 - q_4) + (\rho_d q_4 - q_5) + \\
 & + (\rho_e q_5 - q_6) + (\rho_d q_6 - q_7) + (\rho_e q_7 - q_8) + \dots \\
 & + (1 - \rho_d) q_2 + (1 - \rho_d) q_4 + (1 - \rho_d) q_6 + (1 - \rho_d) q_8 + \dots, \quad (2.65)
 \end{aligned}$$

где $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ поверхностные плотности потоков СИ в условных 1, 2, 3, ... q_n на поверхности воды и зачерненной поверхности дна коллектора.

В соответствии с рис.2.2., значения $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ определяются из выражений

$$q_1 = (1 - \rho_e) q_{над}, \quad (2.66)$$

$$q_2 = (1 - \alpha_e) q_1 = (1 - \alpha_e) (1 - \rho_e) q_{над}, \quad (2.67)$$

$$q_3 = \rho_d (1 - \alpha_e) q_2 = \rho_d (1 - \alpha_e)^2 (1 - \rho_e) q_{над}, \quad (2.68)$$

$$q_4 = \rho_\epsilon(1-\alpha_\epsilon)q_3 = \rho_\epsilon\rho_\delta(1-\alpha_\epsilon)^3(1-\rho_\epsilon)q_{nad}, \quad (2.69)$$

$$q_5 = \rho_\delta(1-\alpha_\epsilon)q_4 = \rho_\epsilon\rho_\delta^2(1-\alpha_\epsilon)^4(1-\rho_\epsilon)q_{nad}, \quad (2.70)$$

$$q_6 = \rho_\epsilon(1-\alpha_\epsilon)q_5 = \rho_\epsilon^2\rho_\delta^2(1-\alpha_\epsilon)^5(1-\rho_\epsilon)q_{nad}, \quad (2.71)$$

$$q_7 = \rho_\delta(1-\alpha_\epsilon)q_6 = \rho_\epsilon^2\rho_\delta^3(1-\alpha_\epsilon)^6(1-\rho_\epsilon)q_{nad}, \quad (2.72)$$

$$q_8 = \rho_\epsilon(1-\alpha_\epsilon)q_7 = \rho_\epsilon^3\rho_\delta^3(1-\alpha_\epsilon)^7(1-\rho_\epsilon)q_{nad}, \quad (2.73)$$

На основе значений q_1, q_2, q_3, \dots определяемыми по выражениям (2.66), (2.67), (2.68) ... для значений разностей $q_1 - q_2, (\rho_\delta q_2 - q_3), (\rho_\delta q_3 - q_4), \dots$, а также $(1 - \rho_\delta)q_2, (1 - \rho_\delta)q_4, (1 - \rho_\delta)q_6, \dots$ в (2.65) имеем

$$q_1 - q_2 = \alpha_\epsilon(1 - \rho_\epsilon)q_{nad}, \quad (2.74)$$

$$\rho_\delta q_2 - q_3 = \rho_\delta \alpha_\epsilon(1 - \rho_\epsilon)(1 - \alpha_\epsilon)q_{nad}, \quad (2.75)$$

$$\rho_\epsilon q_3 - q_4 = \rho_\delta \rho_\epsilon \alpha_\epsilon(1 - \rho_\epsilon)(1 - \alpha_\epsilon)^2 q_{nad}, \quad (2.76)$$

$$\rho_\delta q_4 - q_5 = \rho_\delta^2 \rho_\epsilon \alpha_\epsilon(1 - \rho_\epsilon)(1 - \alpha_\epsilon)^3 q_{nad}, \quad (2.77)$$

$$\rho_\epsilon q_5 - q_6 = \rho_\delta^2 \rho_\epsilon^2 \alpha_\epsilon(1 - \rho_\epsilon)(1 - \alpha_\epsilon)^4 q_{nad}, \quad (2.78)$$

$$\rho_\delta q_6 - q_7 = \rho_\delta^3 \rho_\epsilon^2 \alpha_\epsilon(1 - \rho_\epsilon)(1 - \alpha_\epsilon)^5 q_{nad}, \quad (2.79)$$

$$\rho_\epsilon q_7 - q_8 = \rho_\delta^3 \rho_\epsilon^3 \alpha_\epsilon(1 - \rho_\epsilon)(1 - \alpha_\epsilon)^6 q_{nad}, \quad (2.80)$$

$$(1 - \rho_\delta)q_2 = (1 - \alpha_\epsilon)(1 - \rho_\epsilon)(1 - \rho_\delta)q_{nad} \quad (2.81)$$

$$(1 - \rho_\delta)q_4 = \rho_\epsilon \rho_\delta(1 - \alpha_\epsilon)^3(1 - \rho_\epsilon)(1 - \rho_\delta)q_{nad} \quad (2.82)$$

$$(1 - \rho_\delta)q_6 = \rho_\epsilon^2 \rho_\delta^2(1 - \alpha_\epsilon)^5(1 - \rho_\epsilon)(1 - \rho_\delta)q_{nad} \quad (2.83)$$

$$(1 - \rho_\delta)q_8 = \rho_\epsilon^3 \rho_\delta^3(1 - \alpha_\epsilon)^7(1 - \rho_\epsilon)(1 - \rho_\delta)q_{nad} \quad (2.84)$$

Подставляя значений $(q_1 - q_2), (\rho_\delta q_2 - q_3), \rho_\delta q_3 - q_4, \dots$ из (2.75) – (2.76) ... и $(1 - \rho_\delta)q_{nad_2}, (1 - \rho_\delta)q_{nad_4}, (1 - \rho_\delta)q_{nad_6}, \dots$ из (2.81-2.84) ... в (2.65), получим

$$q_{ногл}^{6-\delta} = \alpha_\epsilon(1 - \rho_\epsilon) \left[1 + \rho_\delta(1 - \alpha_\epsilon) + \rho_\delta \rho_\epsilon(1 - \alpha_\epsilon)^2 + \rho_\delta^2 \rho_\epsilon^2(1 - \alpha_\epsilon)^3 + \rho_\delta^2 \rho_\epsilon^2(1 - \alpha_\epsilon)^4 + \right. \\ \left. + \rho_\delta^3 \rho_\epsilon^2(1 - \alpha_\epsilon)^5 + \rho_\delta^3 \rho_\epsilon^3(1 - \alpha_\epsilon)^6 + \rho_\delta^4 \rho_\epsilon^3(1 - \alpha_\epsilon)^7 + \rho_\delta^4 \rho_\epsilon^4(1 - \alpha_\epsilon)^8 + \dots \right] q_{nad} + \\ + (1 - \alpha_\epsilon)(1 - \rho_\epsilon)(1 - \rho_\delta) \left[1 - \rho_\delta \rho_\epsilon(1 - \alpha_\epsilon)^2 + \rho_\delta^2 \rho_\epsilon^2(1 - \alpha_\epsilon)^4 + \rho_\delta^3 \rho_\epsilon^3(1 - \alpha_\epsilon)^6 + \dots \right] q_{nad} \quad (2.85)$$

Перепишем (2.86) в виде

$$q_{ногл}^{6-\delta} = \alpha_\epsilon(1 - \rho_\epsilon) \left\{ 1 + \rho_\delta(1 - \alpha_\epsilon) \left[1 + \rho_\delta \rho_\epsilon(1 - \alpha_\epsilon)^2 + \rho_\delta^2 \rho_\epsilon^2(1 - \alpha_\epsilon)^4 + \rho_\delta^3 \rho_\epsilon^3(1 - \alpha_\epsilon)^6 + \dots \right] + \right. \\ \left. + \rho_\delta \rho_\epsilon(1 - \alpha_\epsilon)^2 \left[1 + \rho_\delta \rho_\epsilon(1 - \alpha_\epsilon)^2 + \rho_\delta^2 \rho_\epsilon^2(1 - \alpha_\epsilon)^4 + \rho_\delta^3 \rho_\epsilon^3(1 - \alpha_\epsilon)^6 + \dots \right] \right\} q_{nad} + \\ + (1 - \alpha_\epsilon)(1 - \rho_\epsilon)(1 - \rho_\delta) \left[1 - \rho_\delta \rho_\epsilon(1 - \alpha_\epsilon)^2 + \rho_\delta^2 \rho_\epsilon^2(1 - \alpha_\epsilon)^4 + \rho_\delta^3 \rho_\epsilon^3(1 - \alpha_\epsilon)^6 + \dots \right] q_{nad}. \quad (2.86)$$

В связи с тем, что

$$1 + \rho_\delta \rho_\epsilon(1 - \alpha_\epsilon)^2 + \rho_\delta^2 \rho_\epsilon^2(1 - \alpha_\epsilon)^4 + \rho_\delta^3 \rho_\epsilon^3(1 - \alpha_\epsilon)^6 + \dots =$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} [\rho_{\delta} \rho_{\epsilon} (1 - \alpha_{\epsilon})^2]^n = [1 - \rho_{\delta} \rho_{\epsilon} (1 - \alpha_{\epsilon})^2]^{-1}, \quad (2.87)$$

решение (2.86) может быть представлено в виде

$$q_{\text{погл}}^{\epsilon-\delta} = \frac{(1 - \rho_{\epsilon}) \{ \alpha_{\epsilon} [1 + \rho_{\delta} (1 - \alpha_{\epsilon})] + (1 - \alpha_{\epsilon}) (1 - \rho_{\delta}) \}}{1 - \rho_{\delta} \rho_{\epsilon} (1 - \alpha_{\epsilon})^2} q_{\text{над}}. \quad (2.88)$$

После некоторых алгебраических преобразований выражение (2.88) может быть представлено в удобном для практического использования виде

$$q_{\text{погл}}^{\epsilon-\delta} = (1 - \rho_{\epsilon}) \frac{1 - \rho_{\delta} (1 - \alpha_{\epsilon})^2}{1 - \rho_{\delta} \rho_{\epsilon} (1 - \alpha_{\epsilon})^2} q_{\text{над}}. \quad (2.89)$$

Выражение для $\alpha_{\text{эфф}}^{\epsilon-\delta}$, полученное на основе известного отношения

$$\alpha_{\text{эфф}}^{\epsilon-\delta} = \frac{q_{\text{погл}}^{\epsilon-\delta}}{q_{\text{над}}}, \quad (2.90)$$

при этом имеем вид

$$\alpha_{\text{эфф}}^{\epsilon-\delta} = (1 - \rho_{\epsilon}) \frac{1 - \rho_{\delta} (1 - \alpha_{\epsilon})^2}{1 - \rho_{\delta} \rho_{\epsilon} (1 - \alpha_{\epsilon})^2}. \quad (2.91)$$

Значение α_{ϵ} в (2.86) в зависимости от длины волны монохроматического излучения на основании закона Бугера [46] определяется из выражения

$$\alpha_{\epsilon, \lambda} = 1 - e^{-\beta_{\lambda} L}, \quad (2.92)$$

где β_{λ} – коэффициент ослабления (экстинкции) излучения воды; L – длина пути излучения в слое воды в коллекторе.

Значение β_{λ} в (2.92) в видимом диапазоне СИ определили расчетным путем на основе экспериментальных измерений [59] по определению показателя экстинкции воды (k) по выражению

$$\beta_{\lambda} = \frac{4\pi k}{\lambda}, \quad (2.93)$$

где λ – длина волны излучения.

Результаты расчетов по определению β_{λ} в видимой области спектра СИ приведены на рис.2.3. Среднее значение α_{ϵ} в указанном диапазоне длины волны излучения при этом определяется из [62]

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{\int E_{\lambda} (1 - e^{-\beta_{\lambda} L}) d\lambda}{\int E_{\lambda} d\lambda} \quad (2.94)$$

Как следует из (2.91), для определения значения эффективного коэффициента поглощения СИ системы «вода-зачерненное дно» наряду с α_{ϵ} требуются соответствующие значения ρ_{ϵ} и ρ_{δ} .

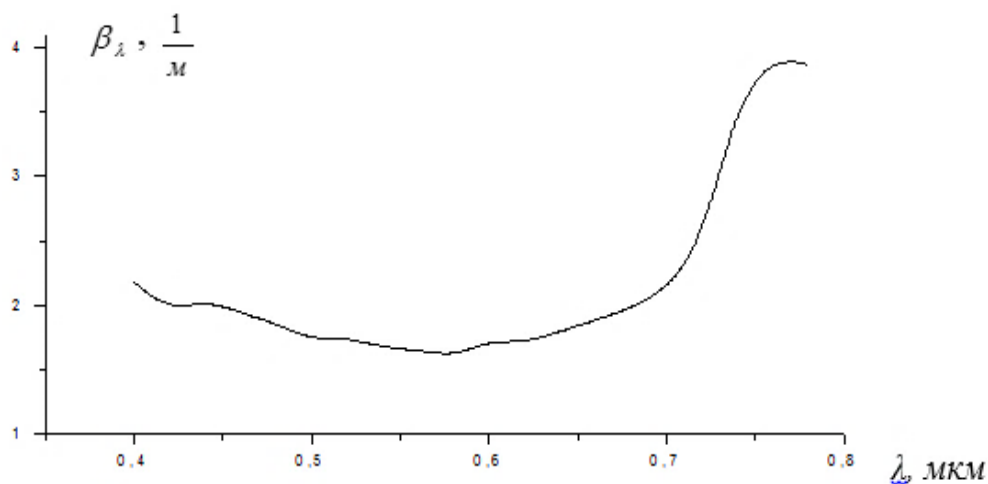


Рис.2.3. Спектральная зависимость коэффициента ослабления воды β_λ от длины волны излучения в видимом диапазоне(λ).

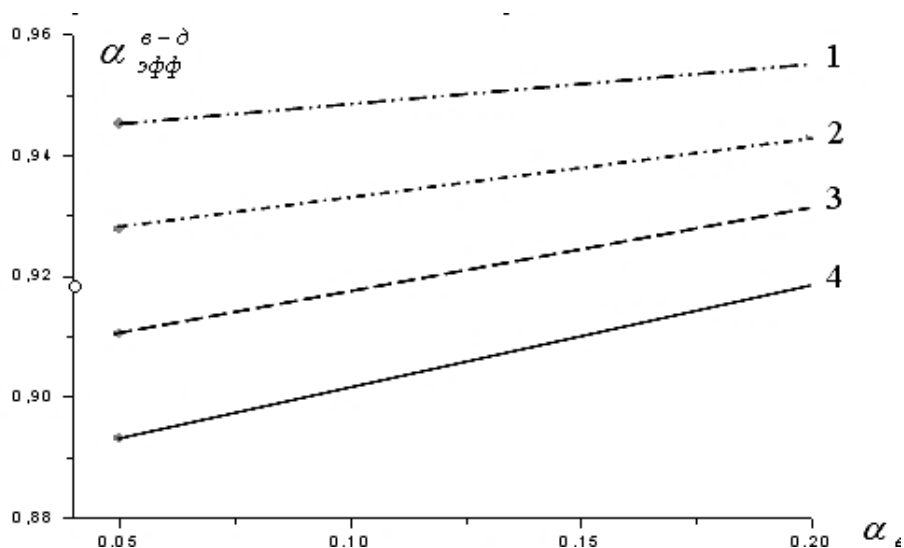


Рис. 2.4. Зависимости $\alpha_{эфф}^{\epsilon-\delta}$ от α_ϵ и α_δ при нормальном падении СИ на поверхность воды ($\rho_\epsilon=0,02$): 1,2,3 и 4 –соответственно, при $\rho_\delta=0,04$; 0,06; 0,08 и 0,10.

Зависимости $\alpha_{эфф}^{\epsilon-\delta}$ от α_ϵ и ρ_δ при $\rho_\epsilon = 0,02$ приведены на рис. 2.4.

Из анализа графиков по рис.2.4. следует, что при прочих равных условиях (имеется в виду ρ_ϵ) как и ожидалось, значение $\alpha_{эфф}^{\epsilon-\delta}$ в основном определяется значением коэффициента отражения СИ зачерненной поверхности дна коллектора ($\rho_\delta = 1 - \alpha_\delta$). Так, например, при $\rho_\epsilon = 0,02$ и $\alpha_\epsilon = 0,1$ изменение α_δ от 0,90 до 0,96 приводит к соответствующему росту значения $\alpha_{эфф}^{\epsilon-\delta}$ от 0,9120 до 0,9489 т.е. на 5,2 %. В то же время при $\alpha_\delta = 0,94$ изменение значения α_ϵ от 0,05 до 0,20 или $\beta\delta$ - от 0,51 до 0,223 (где β –коэффициент ослабления излучения воды; δ - толщина слоя воды в резервуаре), т.е. в 4 раза приводит к соответствующему росту значения $\alpha_{эфф}^{\epsilon-\delta}$ от 0,9279 до 0,9431 (т.е. всего лишь на 1,63 %).

Как видно, при формировании значения $\alpha_{эфф}^{\delta-d}$ в емких лотковых солнечных коллекторах с открытой поверхностью воды решающее значение имеет коэффициент поглощения зачерненной поверхности дна.

В данной главе изучена закономерность формирования коэффициента тепловых потерь емкостных ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ и частично прозрачными для ИК излучения стенками и СП, предложено выражение и выполнены тепловые расчеты по определению его значения; предложено выражение и выполнены расчеты по определению коэффициента тепловой эффективности емкостного ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ; изучено влияние направления теплового потока подводимого от зачерненной поверхности емкостного ПСИ, на нагреваемой в нем горизонтальный слой воды на коэффициент теплоотдачи; установлено, что подвод теплового потока на горизонтальный слой воды снизу приводит к повышению коэффициента тепловой эффективности емкостных ПСИ ПСВК на 6 % по сравнению с подводом тепла сверху, также предложено расчетное выражение для определения эффективного коэффициента поглощения СИ системы «слой воды – зачерненное дно» в емкостных лотковых СВК с открытой поверхностью испарения.

ГЛАВА III. МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ЕМКОСТНЫМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДОННЫМ ЛУЧЕПОГЛОЩЕНИЕМ

Отличительная особенность ПСВК с емкостными ПСИ по сравнению с проточными ПСИ – накопление в них полезно поглощенной СЭ в течение светового дня. По этой причине тепловые процессы, происходящие в коллекторах рассматриваемого типа являются нестационарными.

Нестационарность тепловых процессов в ПСВК с емкостными ПСИ обусловлены как с нестационарностью прихода основного теплоисточника СИ и изменением температуры окружающей среды.

Из-за чрезмерной сложности исследований нестационарных тепловых процессов в ПСВК с емкостными ПСИ экспериментальным способом в натуральных условиях, в последние годы большое внимание уделяется расчетным способам, основанных на математическом моделировании тепловых процессов, происходящих в них, и с последующей численной реализацией (т.е. применением методов вычислительного эксперимента). Адекватность расчетных исследований могут быть подтверждены сопоставлением полученных результатов с результатами краткосрочных испытаний рассматриваемых коллекторов в натуральных условиях.

§3.1. Динамика накопления тепла ПСВК с емкостных ПСИ с донным поглощением СИ

Задачи установления зависимости динамики накопления тепла в солнечных коллекторах с емкими теплоприемниками от дневного хода поступления потока суммарного СИ на фронтальную поверхность коллектора $Q_{над}$ и изменения температуры окружающей среды t_o может быть сведена к нахождению зависимости дневного хода среднеобъемной температуры теплой (или горячей) воды t_e в рассматриваемых типах теплоприемников от указанных параметров без учета ее стратификации. По характеру дневного хода t_e можно затем выявить закономерности динамики накопления полезно поглощенной энергии солнечного излучения в емких теплоприемниках солнечных коллекторов $Q_{пол}$, а по конечному значению t_e в баке-аккумуляторе - величину накопленной в нем в течение светового дня полезно поглощенной энергии $Q_{пол}$. Далее, пользуясь известным отношением для тепловой эффективности солнечного коллектора, устанавливаем дневной ход мгновенной (средней за определенный малый промежуток времени) эффективности коллектора. Среднедневную эффективность коллектора при этом рассчитываем по величине конечного значения t_e и

интегрального значения $Q_{над}$ в течение дня.

Для установления аналитической зависимости дневного хода t_e от $Q_{над}$ и t_o необходимо решить дифференциальное уравнение теплового баланса для рассматриваемых типов солнечных коллекторов

$$c_{np} \frac{dt_e}{d\tau} = \eta_{mn} \left[q_{ногл}^{\beta-\delta} - k_{np-p-o}^{\Sigma} (t_e - t_o) \right], \quad (3.1)$$

где c_{np} - приведенная на 1 м^2 фронтальной поверхности эффективная теплоемкость солнечного коллектора; k_{np-p-o}^{Σ} - приведенный на 1 м^2 фронтальной поверхности суммарный коэффициент тепловых потерь ограждающих элементов (корпуса) солнечного коллектора; $\frac{dt_e}{d\tau}$ - темп изменения среднеобъемной температуры в теплоприемнике.

В отличие от солнечных коллекторов с проточными теплоприемниками в исследуемых солнечных коллекторах объем воды, отнесенный на единицу фронтальной поверхности коллектора, составляет $40 \div 100 \text{ л/м}^2$. При этом, как показывают относительно несложные расчеты по методике [37], соответствующие значения c_{np} для указанных типов солнечных коллекторов находятся в пределах $192 \div 436 \text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{°C)}$. Доля теплоемкости воды в теплоприемнике $82 \div 90 \%$ от эффективной теплоемкости коллектора. При $k_{np-p-o}^{\Sigma} = 7,0 \div 8,0 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$ (для коллекторов с однослойным СПП и без селективного лучепоглощающего покрытия на поверхности ПСИ) и $\eta_{omn} = 0,90 \div 0,92$ [38] значения "постоянной времени" коллектора c_{np} с емкими теплоприемниками

$$\tau_{нс} = \frac{c_{cn}}{k_{np-p-o}^{\Sigma} \eta_{mn}} = 8,5 \div 16,4 \text{ ч}. \quad (3.2)$$

Естественно, в течение указанного временного интервала значения $q_{над}$ и t_o (3.1) меняются существенно, и интегрирование (3.1) в данных условиях невозможно.

В связи с этим для установления зависимости дневного хода t_e в солнечных коллекторах с емкостными ПСИ от дневного хода поступления потока суммарного СИ на фронтальную поверхность коллектора и изменения температуры окружающей среды пользуемся методом последовательных интервалов [38, 105; 106].

Основная идея его в том, что изменение любой функции (в данном случае $q_{ногл}^{\beta-\delta} / k_{np-p-o}^{\Sigma} + t_o$) разбивается на интервалы, в каждом из которых ее значение принимается постоянным. Реальная кривая заменяется ломаной ступенчатой таким образом, чтобы площади под кривой и под соответствующими участками

ломаной линии были равновеликими. Исходя из изложенного, в любом текущем интервале, например, в первом, граничная функция $q_{нозл}^{s-d} / k_{np-p-o} + t_o$ постоянна. Распределение среднеобъемной температуры в теплоприемнике в конце рассматриваемого (первого) интервала времени будет начальным распределением среднеобъемной температуры в теплоприемнике для следующего (второго) интервала времени, где вновь значение граничной функции принимается постоянным. Распределение среднеобъемной температуры в теплоприемнике в конце второго интервала времени будет начальным для третьего интервала времени, где опять же принимается постоянство значения граничной функции в интервале. Последовательная совокупность всех квазипостоянных величин аппроксимирует реальную кривую. Степень приближения (аппроксимации) зависит от величины интервала разбиения и определяется реальным видом функции, т.е. $\eta_{онт} q_{над} / k_{np} + t_o = f(\tau)$.

Согласно методу последовательных интервалов поток полезно поглощенной СЭ, накопленной водой в емком теплоприемнике, в начальный (первый) интервал времени, равный $\Delta\tau_{o-1} = \tau_1 - \tau_o$, в соответствии с (3.1)

$$q_{нозл_{o-1}} = \varphi c_{np} (t_{e1} - t_{e0}) = \eta_{онт} k_{np} \left(\frac{\bar{q}_{нозл}}{k_{np-p-o}} + \bar{t}_o - \bar{t}_e \right)_{0-1} \Delta\tau_{o-1} \quad (3.3)$$

где

$$\bar{q}_{нозл} = \eta_{онт} \cdot \bar{q}_{над} \quad (3.4)$$

- поток поглощенной лучепоглощающей поверхностью теплоприемника суммарного СИ; φ - доля теплоемкости воды в теплоприемнике от приведенной эффективной теплоемкости коллектора c_{np} ; $\bar{q}_{нозл_{o-1}}$, $\bar{t}_{o_{o-1}}$ и $\bar{t}_{e_{o-1}}$ за интервал времени $\Delta\tau_{o-1}$.

В свою очередь

$$\bar{q}_{нозл_{o-1}} = 0,5(q_{нозл_o} + q_{нозл_1}) , \quad (3.5)$$

$$\bar{t}_{o_{o-1}} = 0,5(t_{o_o} - t_{o_1}) , \quad (3.6)$$

$$\bar{t}_{e_{o-1}} = 0,5(t_{e_o} - t_{e_1}) , \quad (3.7)$$

где $q_{нозл_o}$, t_{o_o} , t_{e_o} - соответственно, значения $q_{нозл}$, t_o и t_e в момент времени τ_o , $q_{нозл_1}$, t_{o_1} и t_{e_1} - в момент времени τ_1 .

При поэтапном интегрировании (3.1) требуется условия постоянства граничной функции в рассматриваемом интервале, и текущее распределение среднеобъемной температуры воды в теплоприемнике в конце соответствующего интервала времени должно быть начальным условием для последующего интервала.

Интегрируя (3.1) в пределах временных интервалов $\Delta\tau_{o-1}$, $\Delta\tau_{1-2}$, $\Delta\tau_{2-3}$, ...,

$\Delta\tau_{(i-1)-i}$, с учетом средних значений $q_{nozл}/k_{np} + t_o$ а также распределения среднеобъемной температуры воды в теплоприемнике в указанных временных интервалах имеем систему уравнений

$$t_{\theta_1} = t_{\theta_0} e^{-\frac{\eta_{mn}k_{np}\Delta\tau_{0-1}}{\varphi c_{np}}} + 0,5 \left(1 - e^{-\frac{\eta_{mn}k_{np}\Delta\tau_{0-1}}{\varphi c_{np}}} \right) \left(\frac{q_{nozл_0} + q_{nozл_1}}{k_{np}} + t_{o_0} + t_{o_1} \right), \quad (3.8)$$

$$t_{\theta_2} = t_{\theta_1} e^{-\frac{\eta_{mn}k_{np}\Delta\tau_{1-2}}{\varphi c_{np}}} + 0,5 \left(1 - e^{-\frac{\eta_{mn}k_{np}\Delta\tau_{1-2}}{\varphi c_{np}}} \right) \left(\frac{q_{nozл_1} + q_{nozл_2}}{k_{np}} + t_{o_1} + t_{o_2} \right), \quad (3.9)$$

$$t_{\theta_3} = t_{\theta_2} e^{-\frac{\eta_{mn}k_{np}\Delta\tau_{2-3}}{\varphi c_{np}}} + 0,5 \left(1 - e^{-\frac{\eta_{mn}k_{np}\Delta\tau_{2-3}}{\varphi c_{np}}} \right) \left(\frac{q_{nozл_2} + q_{nozл_3}}{k_{np}} + t_{o_2} + t_{o_3} \right), \quad (3.10)$$

$$t_{\theta_i} = t_{\theta_{i-1}} e^{-\frac{\eta_{mn}k_{np}\Delta\tau_{(i-1)-i}}{\varphi c_{np}}} + 0,5 \left(1 - e^{-\frac{\eta_{mn}k_{np}\Delta\tau_{(i-1)-i}}{\varphi c_{np}}} \right) \left(\frac{q_{nozл_{i-1}} + q_{nozл_i}}{k_{np}} + t_{o_{i-1}} + t_{o_i} \right), \quad (3.11)$$

Дневной ход приращения потока полезно поглощенного солнечного тепла в емком теплоприемнике может быть определено из

$$q_{nozл_{(i-1)-i}} = \frac{Q_{nozл_{(i-1)-i}}}{F_{\phi p}} = \varphi c_{np} (t_{\theta_i} - t_{\theta_{i-1}}) \quad (3.12)$$

где

$$\varphi = \frac{(mc_p)_B}{c_{np}} \quad (3.13)$$

Мгновенная (осредненная за интервал времени $\Delta\tau_{(i-1)-i}$) эффективность коллектора при этом

$$\eta_{(i-1)-i}^* = \frac{\varphi c_{np} (t_{\theta_i} - t_{\theta_{i-1}})}{q_{nozл_{(i-1)-i}} \Delta\tau_{(i-1)-i}} \quad (3.14)$$

Если учесть, что

$$(mc_p)_B = (V_B \rho c_p)_B / F_{mn}^{\theta H} \quad (3.15)$$

и

$$\delta_B = V_B / F_{mn}^{\theta H} \quad (3.16)$$

то (3.14) можно переписать в более удобном для практического использования виде

$$\eta_{(i-1)-i}^* = \frac{(\delta \cdot \rho c_p)_B (t_{\theta_i} - t_{\theta_{i-1}})}{q_{nozл_{(i-1)-i}} \Delta\tau_{(i-1)-i}}, \quad (3.17)$$

где V_B – внутренней объем (для воды) емкого теплоприемника; δ_B - толщина слоя воды в рассматриваемом теплоприемнике.

Количество накопленного в течение светового дня (или за определенный промежуток времени светового дня) полезно поглощенного солнечного тепла и

соответствующее значение средней (или за определенный промежуток времени светового дня) эффективности коллектора определяются из выражений

$$q_{пол_{o-1}} = (\delta \rho c_p) (t_{\theta_i} - t_{\theta_o}) \quad (3.18)$$

$$\eta_{o-1}^* = \frac{a_B (\delta \cdot \rho c_p)_B (t_{\theta_i} - t_{\theta_o})}{\sum_{i=1}^n q_{над_{(i-1)-i}} \Delta \tau_{(i-1)-i}} \quad (3.19)$$

где

$$a_B = F_{mn}^{вн} / F_{фр} \quad (3.20)$$

отношение внутренней (смачиваемой части) лучепоглощающей поверхности теплоприемника $F_{mn}^{вн}$ к фронтальной поверхности коллектора $F_{фр}$.

§3.2. Моделирование дневных ходов температуры воды и накопления потока полезного тепла в ПСВК с емкостными ПСИ и с донным поглощением СИ

Анализ результатов исследований, выполненных в разделе 3.2, показывает, что задача изучения динамики накопления полезной тепловой энергии в ПСВК рассматриваемого типа в конечном итоге сводится к моделированию дневного хода температуры воды в их ПСИ. Как следует из выражений (3.8) – (3.11), исходными данными для расчета дневного хода температуры воды (t_{θ}) в ПСИ ПСВК рассматриваемого типа является: температура окружающей среды (t_o), исходной воды (t_{θ_o}) и поверхностная плотность потока СИ, поглощенного в системе «слой воды–зачерненное дно» емкостного ПСИ ПСВК рассматриваемого типа ($q_{нозл_o}$) в момент времени светового дня (τ_o), а также из изменения в течение светового дня, т.е. t_{o_1} , t_{θ_1} и $q_{нозл_1}$ в момент времени τ_1 ; t_{o_2} , t_{θ_2} и $q_{нозл_2}$ в момент времени τ_2 и т.д., т.е. $t_{o_{i-1}}$, $t_{\theta_{i-1}}$ и $q_{нозл_{i-1}}$ в момент времени τ_{i-1} .

Методика определения значений K_{np-p-o}^{Σ} и η_{mn} в ПСВК рассматриваемого типа приведены в разделах 2.2 - 2.4.

§3.2.1. Исходные данные для определения дневных ходов температуры воды в емкостном ПСИ и динамики накопления потока полезного тепла в нем

Расчетные исследования по определению дневных ходов температуры воды (t_{θ}) и накопления полезного тепла ($q_{пол}$) в ПСВК рассматриваемого типа выполним для характерных дней трех летних месяцев года (т.е. 15.VI; 15.VII и 15.VIII), которые могут быть использованы для определения среднемесячной и сезонной теплопроизводительности коллектора. Значения толщины слоя воды в ПСИ (δ_{θ}) на основе результатов предварительных экспериментов приняты 0,05 и 0,07 м допуская граничные значения φ в формуле (3.12) равной единице, т.е. $C_{np} = (mc_p)_{\theta}$.

Как следует из решения (3.11), при прочих равных условиях (имеются в виду η_{mn} и $K_{np, p-o}$), исходными данными для определения дневного хода t_o являются: дневные ходы температура воздуха окружающей среды (t_o) и поверхностная плотность потока суммарного СИ, поглощенного ПСИ рассматриваемого коллектора ($q_{погл}$).

На рис. 3.1 и 3.2 приведены среднемесячные дневные ходы температуры окружающей среды t_o и поверхностной плотности падающего на фронтальную поверхность коллектора суммарного СИ - $q_{над}^{\Sigma}$ для выбранных характерных дней года по данным [78].

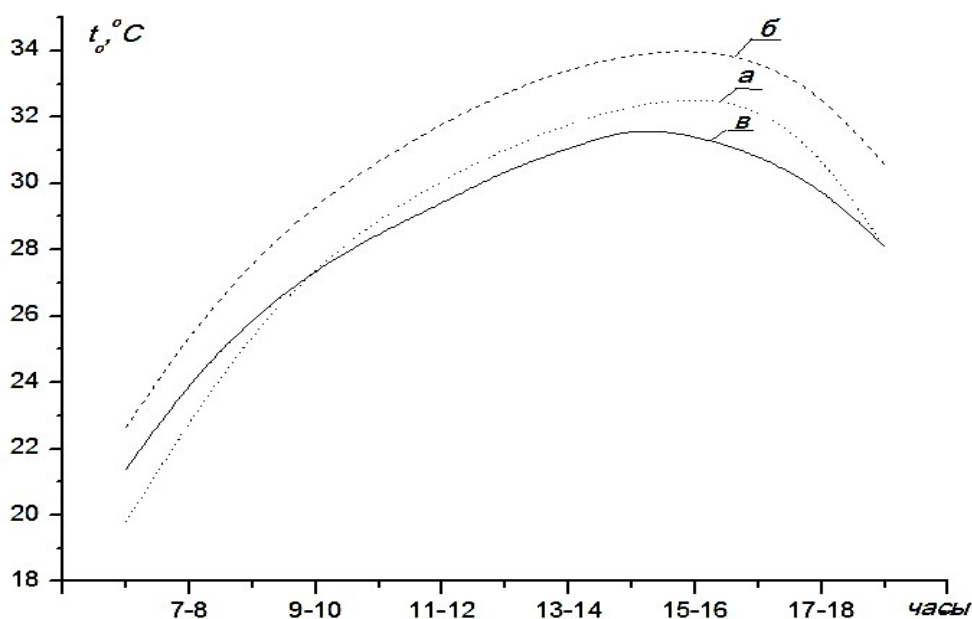


Рис. 3.1. Среднемесячные дневные ходы t_o : а, б и в – соответственно для 15.VI, 15.VII, 15.VIII.

Как видно из анализа графиков по рис. 3.1. и 3.2, максимальные значения t_o приходится к 15-16 часам светового дня и составляют 31°C , $34,05^{\circ}\text{C}$ и $32,6^{\circ}\text{C}$ максимальные значения $q_{над}^{\Sigma}$ приходится к $12^{30} - 13^{00}$ часам светового дня и составляют, соответственно, $911,11 \text{ Вт/м}^2$, $916,67 \text{ Вт/м}^2$ и $872,22 \text{ Вт/м}^2$.

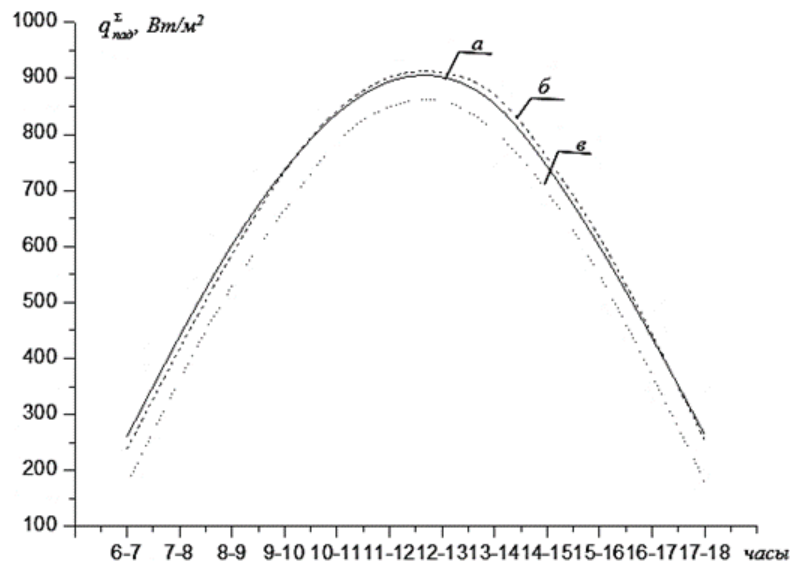


Рис. 3.2. Среднемесячные дневные ходы $q_{над}^{\Sigma}$ на фронтальную поверхность коллектора: а, б и в – соответственно, для 15.VI, 15.VII, 15.VIII.

Из сопоставления графиков по рис. 3.1 и 3.2 следует что, самые максимальные значения t_o ($34,05^{\circ}C$) и $q_{над}^{\Sigma}$ ($916,67 \text{ Вт/м}^2$) приходятся на 15.VII.

Дневные ходы поверхностных плотностей потоков поглощенного суммарного СИ ($q_{погл}^{\delta-d}$), определены на основе (3.4), с учетом значения оптической эффективности системы «СП корпуса – зачерненное дно ПСИ»

$$\eta_o = \tau \alpha_{эфф}^{\delta-d} \quad (3.21)$$

и результатов расчетных исследований, по определению значений $\alpha_{эфф}^{\delta-d}$, выполненных в разделе § 2.5.

Расчеты по определению $q_{погл}^{\delta-d}$ выполнены для значений толщины слоя воды (δ_e) 0,05 м и 0,07 м.

Результаты расчетов по определению $q_{погл}^{\delta-d}$ для трех летних месяцев (т.е. 15.VI, 15.VII и 15.VIII) при значениях δ_e 0,05 м и 0,07 м. приведены на рис. 3.3.

Как следует из анализа графиков по рис. 3.3, дневной ход значений $q_{погл}^{\delta-d}$ при прочих равных условиях (имеется в виду τ) в основном зависит от значения δ_e . Значение коэффициента поглощения слоя воды α_e при ее толщине 0,05 м и среднем значении коэффициента ослабления (β) 2 м^{-1} , определенное по (2.92), составляет 0,10, а при $\delta_e = 0,07 \text{ м}$ - 0,13. Как видно, при прочих равных условиях (имеется в виду τ) и увеличение значения δ_e от 0,05 м до 0,07 м (т.е. на 40%) приводит к увеличению α_e на 30 %.

Как следует из рис.3.3 по этой причине, в зависимости от периода года значения $q_{погл}^{\Sigma}$ при $\delta_e = 0,07 \text{ м}$ выше, чем при $\delta_e = 0,05 \text{ м}$ на 20÷30 %.

§3.2.2. Результаты расчетов по определению дневного хода температуры воды в емкостном ПСИ

В связи с тем, что значения исходных данных по расчету t_o и $q_{пол}$ в существующих источниках [37, 79] представлены для часового интервала светового дня продолжительностью 1 ч. (3600 с), интервал времени для определения значений исходных параметров ($\Delta\tau_{(i-1)-i}$) в расчетах принят равным 1 час. Расчетные значения дневного хода t_g определены на основе выражения (3.11) с учетом значений и исходных данных $q_{пол}$, t_o и k_{np} , входящих в него.

На рис 3.4. приведены результаты расчетов по определению дневного хода t_g для трех летних месяцев (15.VI, 15.VII и 15.VIII) для значений $\delta_g = 0,05м$ и $\delta_g = 0,07м$.

Как следует из анализа графиков по рис.3.4, максимальное значение t_{g_i} приходится в промежуток времени светового дня 14⁰⁰-14³⁰, и как и ожидалось, при $\delta_g=0,05м$ при прочих равных условиях на 3,2 °С (15.VI), 3,5 °С (15. VII) и 3,3°С (15.VIII) выше, чем при $\delta_g=0,07м$. Начальные значения t_{g_i} при этом составлял 26°С в июне и июле месяцах, и 24°С в августе месяце.

Как видно из графиков рис. 3.4., максимальные значения t_{g_i} при $\delta_g=0,05м$ становятся равными на 49,47°С (15.VI), 51,54°С (15. VII) и 47,68°С (15.VIII), а при $\delta_g=0,07 м$, 46,53°С (15.VI), 48,51°С (15. VII) и 44,77°С (15.VIII), из графиков рис. 3.9 также следует, что рациональным периодом времени забора теплой воды из коллектора является 14-15 ч. светового дня.

§3.2.3. Результаты расчетов по определению дневного хода накопления потока полезного тепла в ПСИ и накопленного в нем в течение дня полезного тепла

Значение дневного хода среднечасовой теплопроизводительности коллектора $q_{пол(i-1)-i}$ для указанных характерных дней и значений δ_g определены по выражению (3.12) при $\varphi = 1$ (т.е. пренебрегая теплоемкостью пленочного резервуара (контейнера) для нагреваемой в ПСВК воды).

Значение c_{np} при этом определено из

$$c_{np} = (\delta\rho c_p)_g, \quad (3.22)$$

в котором $\rho_g = 1000кг/м^3$ и $c_{np} = 4186,8Дж/кг\cdot^{\circ}С$ плотность и удельная теплоемкость воды.

На рис 3.5. приведены результаты расчетов по определению дневного хода $q_{пол(i-1)-i}$ для трех летних месяцев (15.VI, 15.VII и 15.VIII) для значений $\delta_g = 0,05 м$ и $\delta_g = 0,07 м$.

Как видно из графиков по рис. 3.5, максимальные значения $q_{пол(i-1)-i}$ при $\delta_g = 0,05 м$ становятся равными на $828,97 КДж/м^2$ (15.VI), $904,47 КДж/м^2$ (15.VII) и $877,13 КДж/м^2$ (15.VIII), а при $\delta_g = 0,07 м$, $961,29 КДж/м^2$ (15.VI), $1046,28 КДж/м^2$ (15.VII) и $1002,32 КДж/м^2$ (15.VIII). Как следует из анализа графиков по рис.3.5, максимальное значение $q_{пол(i-1)-i}$ приходится в промежуток времени светового дня $10^{00}-11^{00}$, и как и ожидалось, при $\delta_g = 0,05 м$ при прочих равных условиях на $132,30 КДж/м^2$ (15.VI), $141,85 КДж/м^2$ (15.VII) и $125,19 КДж/м^2$ (15.VIII) ниже, чем при $\delta_g = 0,07 м$. Начальные значения $q_{пол(i-1)-i}$ при этом составлял $9,02 КДж/м^2$ в июне и $4,4 КДж/м^2$ июле месяцах, и $0,5 КДж/м^2$ в августе месяца.

Из совместного анализа результатов численных расчетов по определению дневных ходов $t_{g(i-1)-i}$ и $q_{пол(i-1)-i}$, приведенных на рис. 3.4. и 3.5. видно, что несмотря на то, что при $\delta_g = 0,05 м$ значение $t_{g(i-1)-i}$ несколько ниже, чем при $\delta_g = 0,07 м$ благодаря большому удельному объему воды в ПСИ, в случае $\delta_g = 0,07 м$ ($70 л/м^2$) по сравнению со случаем $\delta_g = 0,05 м$ ($50 л/м^2$), значение $q_{пол(i-1)-i}$ при $\delta_g = 0,07 м$ всегда больше, чем при $\delta_g = 0,05 м$.

Значение дневного хода суммарной дневной теплопроизводительности коллектора ($\Sigma q_{пол0-i}$) определено по выражению (3.18) пренебрегая теплоемкостью пленочного контейнера для воды и с учетом, что (ρc_p) в (3.18) равно $4186,8 КДж/м^2$.

Исходными данными при этом, как следует из (3.18), является t_{g_0} и t_{g_i} . Расчеты выполнены для трех характерных дней летних месяцев (15.VI; 15.VII и 15.VIII) и значений $\delta_g = 0,05 м$ и $\delta_g = 0,07 м$.

Результаты расчетных исследований по определению дневного хода значений $\Sigma q_{пол0-i}$ по указанным периодам года приведены на рис. 3.6.

Как следует из анализа графиков по рис. 3.6, значения $\Sigma q_{пол0-i}$ при $\delta_g = 0,07 м$ всегда выше, чем при $\delta_g = 0,05 м$. Так, 15.VI максимальное значение $\Sigma q_{пол0-i}$ в 15-16 ч. при $\delta_g = 0,07 м$ $6016,85 КДж/м^2$ на $1103,64 КДж/м^2$ (т.е. 22,46%) выше, чем при $\delta_g = 0,05 м$. которое в промежутке времени 14-15 ч. составляло $4913,21 КДж/м^2$. Из сравнения графиков по рис.3.6 следует максимальное значение $\Sigma q_{пол0-i}$ приходится на июль месяц и составляет $5346,61 КДж/м^2$ при $\delta_g = 0,05 м$ и $6597,14 КДж/м^2$ при $\delta_g = 0,07 м$.

§3.3. Моделирование дневных ходов среднечасовой и среднедневной тепловой эффективности ПСВК с емкостным ПСИ и с донным поглощением СИ

Значения среднечасовой тепловой эффективности (или КПД) ПСВК рассматриваемого типа за промежуток времени $\Delta \tau_{(i-1)-i}$ могут быть определено из отношения (3.17) допуская равенство значений F_{mn}^{6H} и $F_{\phi p}$.

Результаты расчетов по определению дневного хода среднечасовых значений $\overline{\eta}_{(i-1)-i}$ для трех летних месяцев (т.е. 15.VI; 15.VII и 15.VIII) при $\delta_g=0,05m$ и $\delta_g=0,07 m$., выполненные на основе отношения (3.22) с учетом среднечасовых значений $Q_{пол(i-1)-i}$ и $Q_{над(i-1)-i}$ по рис. 3.5 и 3.2, соответственно, приведены на рис. 3.7. Как следует из анализа графиков по рис.3.7, максимальное значения $\overline{\eta}_{(i-1)-i}$ 0,31 при $\delta_g=0,05m$ и 0,33 при $\delta_g=0,07 m$ приходится с часовым интервалом светового дня $8 \div 9$ и $9 \div 10$ ч. 15.VI(0,31 и 0,33), $9 \div 10$ ч 15.VII (0,35 и 0,37) и $8 \div 9$ ч. 15.VIII (0,34 и 0,36). Как и ожидалось, значение $\overline{\eta}_{(i-1)-i}$ при $\delta_g=0,07 m$ во всех случаях больше на 0,02, чем при $\delta_g=0,05m$.

Из графиков по рис. 3.7 также следует, что к $16 \div 17$ часам светового дня значения $\overline{\eta}_{(i-1)-i}$ понижаются до 0.

Значения дневной тепловой эффективности (или КПД) ПСВК рассматриваемого типа может быть определена из отношения (3.19) с учетом значения $a \approx 1$, т.е. равенства значений F_{mn}^{6H} и $F_{\phi p}$.

Результаты расчетов по определению дневных ходов η_{0-i} для трех летних месяцев (15.VI; 15.VII и 15.VIII) при $\delta_g=0,05m$ и $\delta_g=0,07 m$ приведены на рис. 3.8.

Как следует из графиков по рис. 3.8, в отличие от рис. 3.7, максимальные значения η_{0-i} приходится в период светового дня $11 \div 12$ ч и для 15.VI, 15.VII и 15.VIII составляют 0,27, 0,29 и 0,30 при $\delta_g=0,05m$ и 0,30, 0,33 и 0,34 при $\delta_g=0,07m$, соответственно.

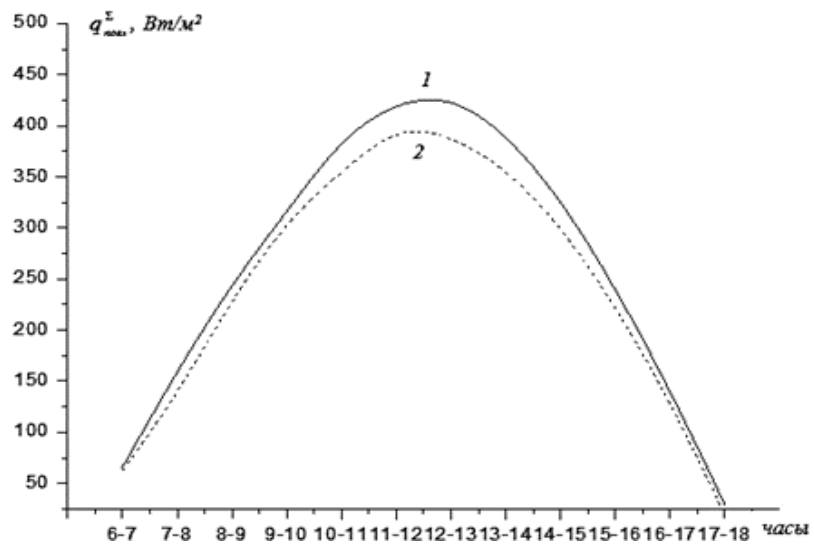
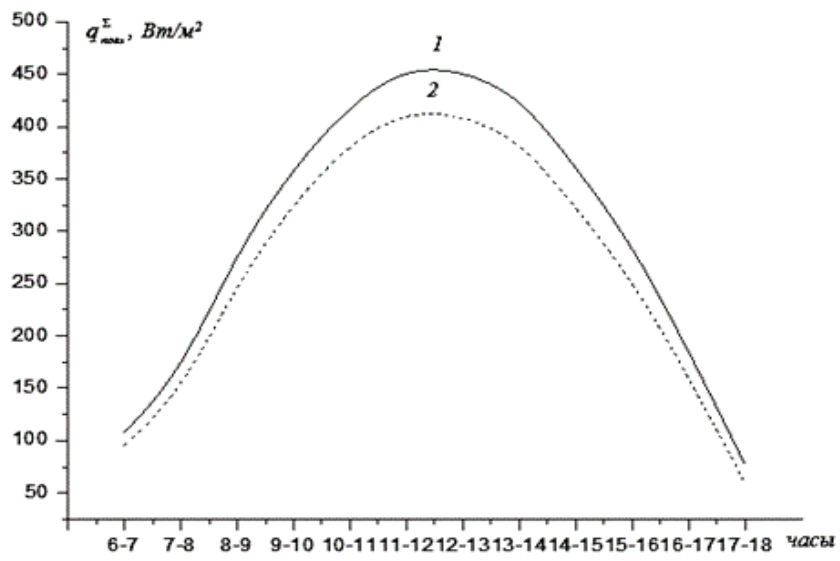
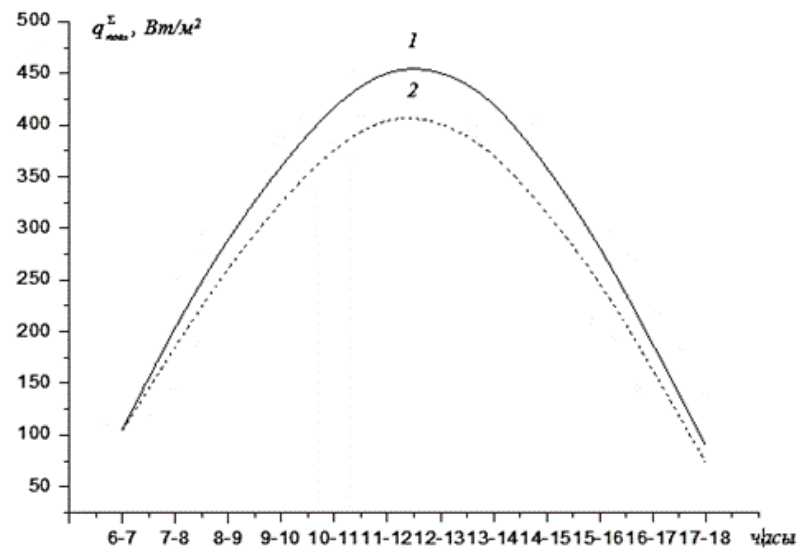


Рис.3.3. Среднемесячные дневные ходы $q_{пол}^{\delta-d}$, а, б и в – соответственно за 15. VI, 15. VII и 15. VIII. месяцы, 1 и 2 – соответственно, для $\delta_g = 0,07$ м и 0,05 м

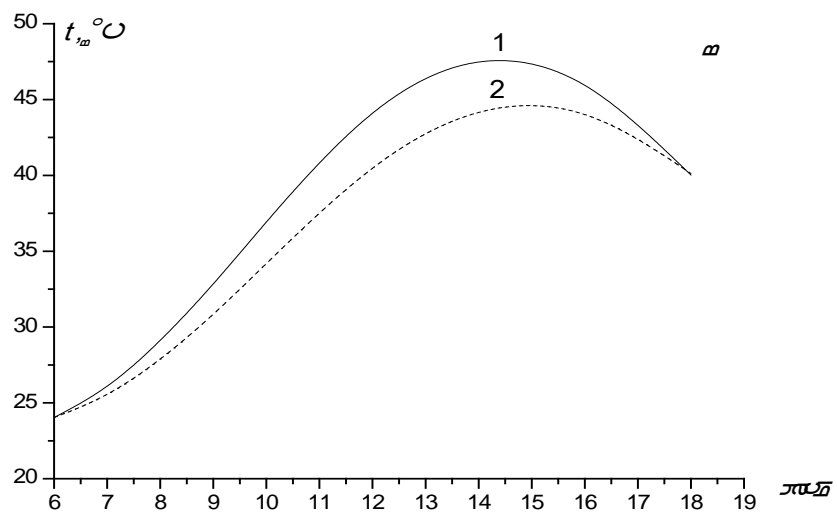
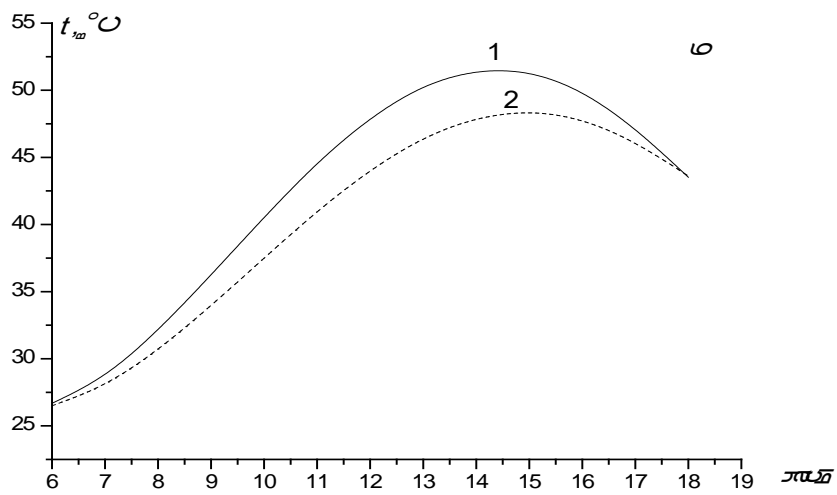
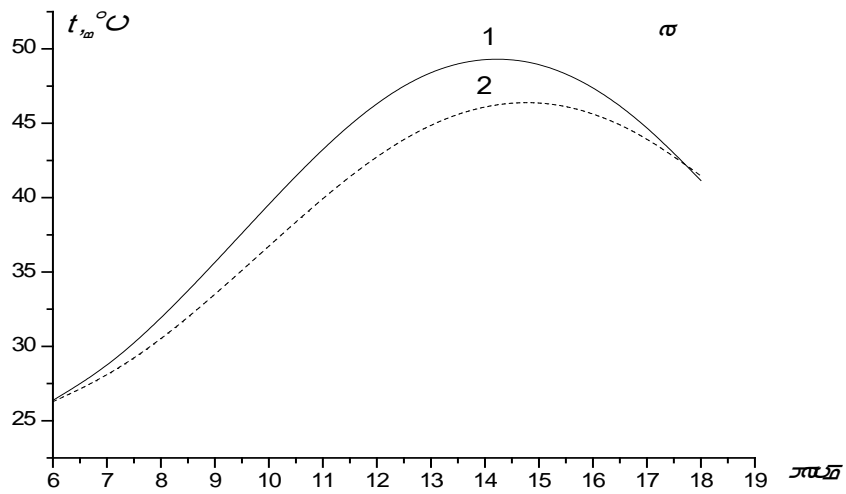


Рис. 3.4. Дневные ходы изменения температуры воды в емкостном ПСИ ПСВК, а, б и в – соответственно для 15.VI; 15.VII и 15.VIII; 1-2 – соответственно при $\delta_6=0,05$ м и $\delta_6=0,07$ м.

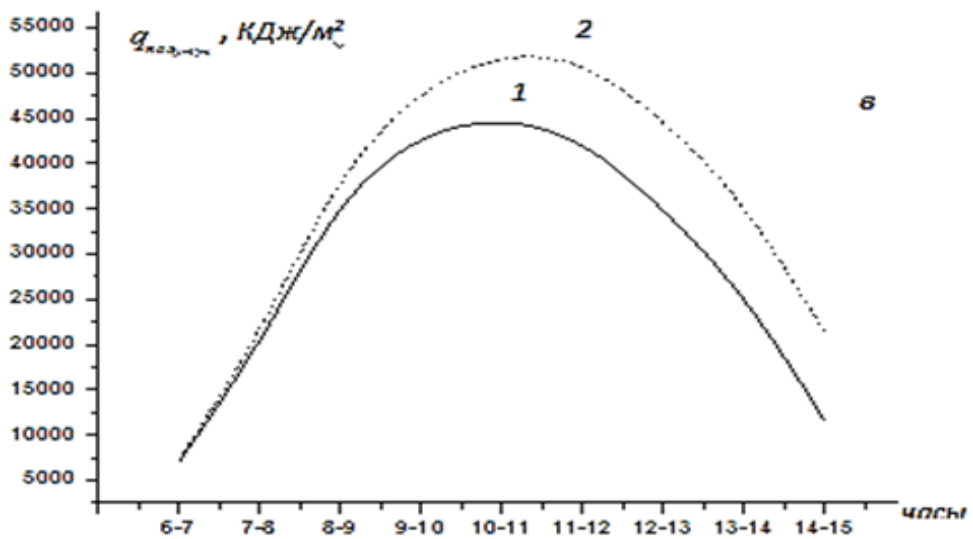
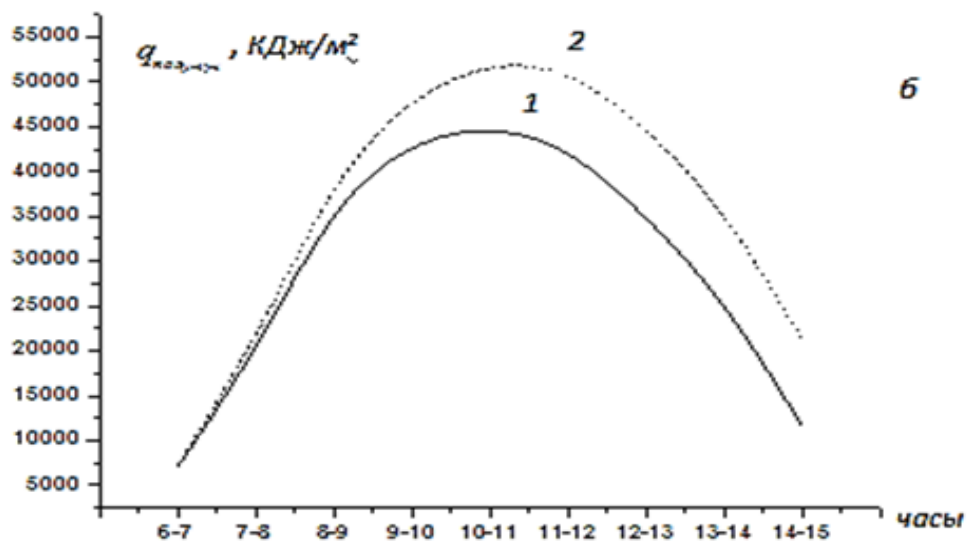
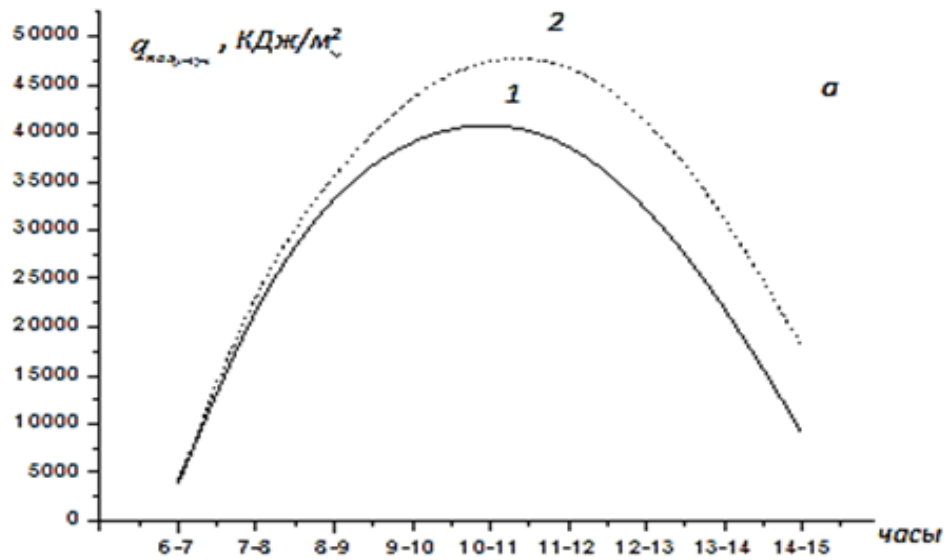


Рис. 3.5. Дневные ходы среднечасовой теплопроизводительности ПСВК с емкостным ПСИ:
а, б и в – соответственно для 15.VI; 15.VII и 15.VIII; *1-2* – соответственно при $\delta_g=0,05$ м и
 $\delta_g=0,07$ м.

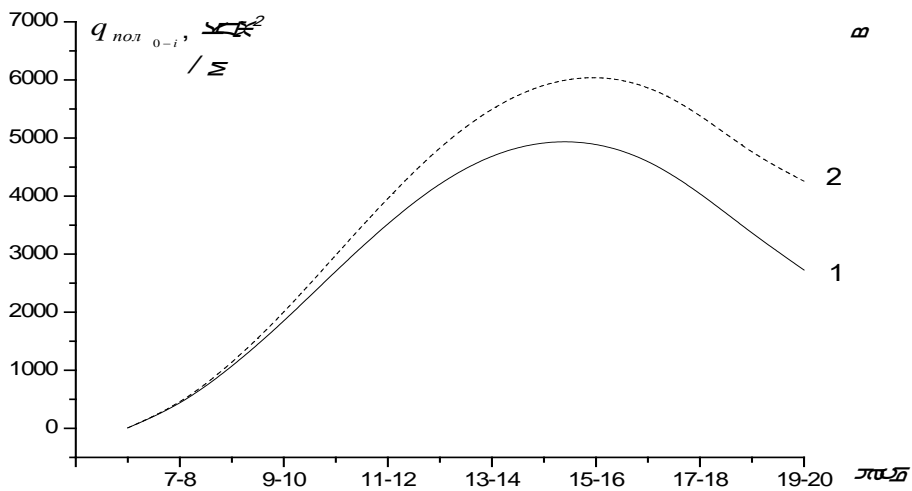
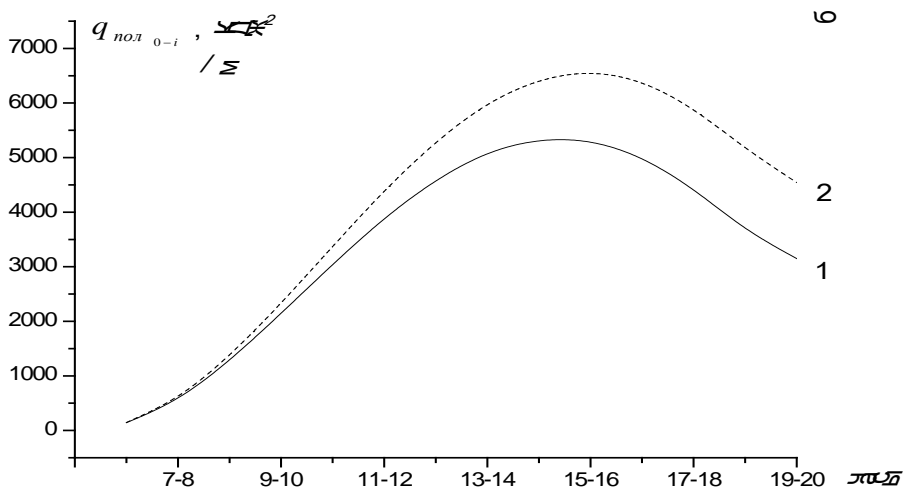
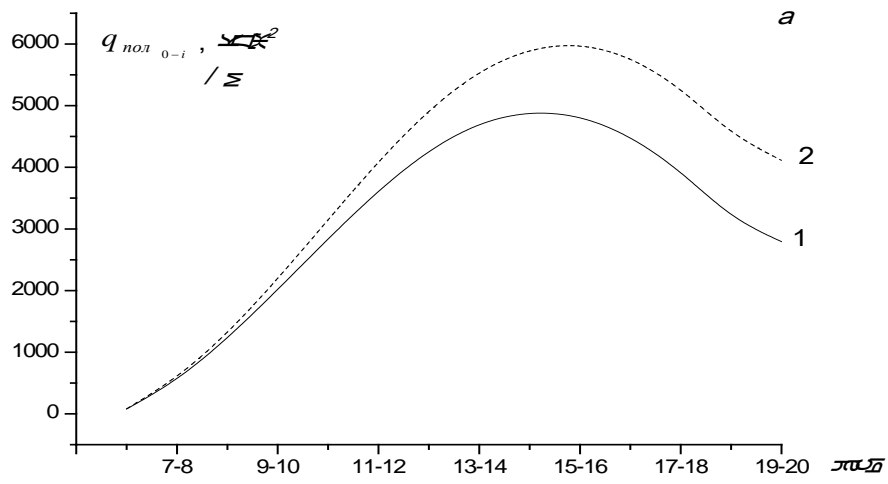


Рис. 3.6. Дневные ходы суммарной теплопроизводительности ПСВК с емкостным ПСИ: а, б и в – соответственно для 15.VI; 15.VII и 15.VIII; 1-2 – соответственно при $\delta_6=0,05$ м и $\delta_6=0,07$ м.

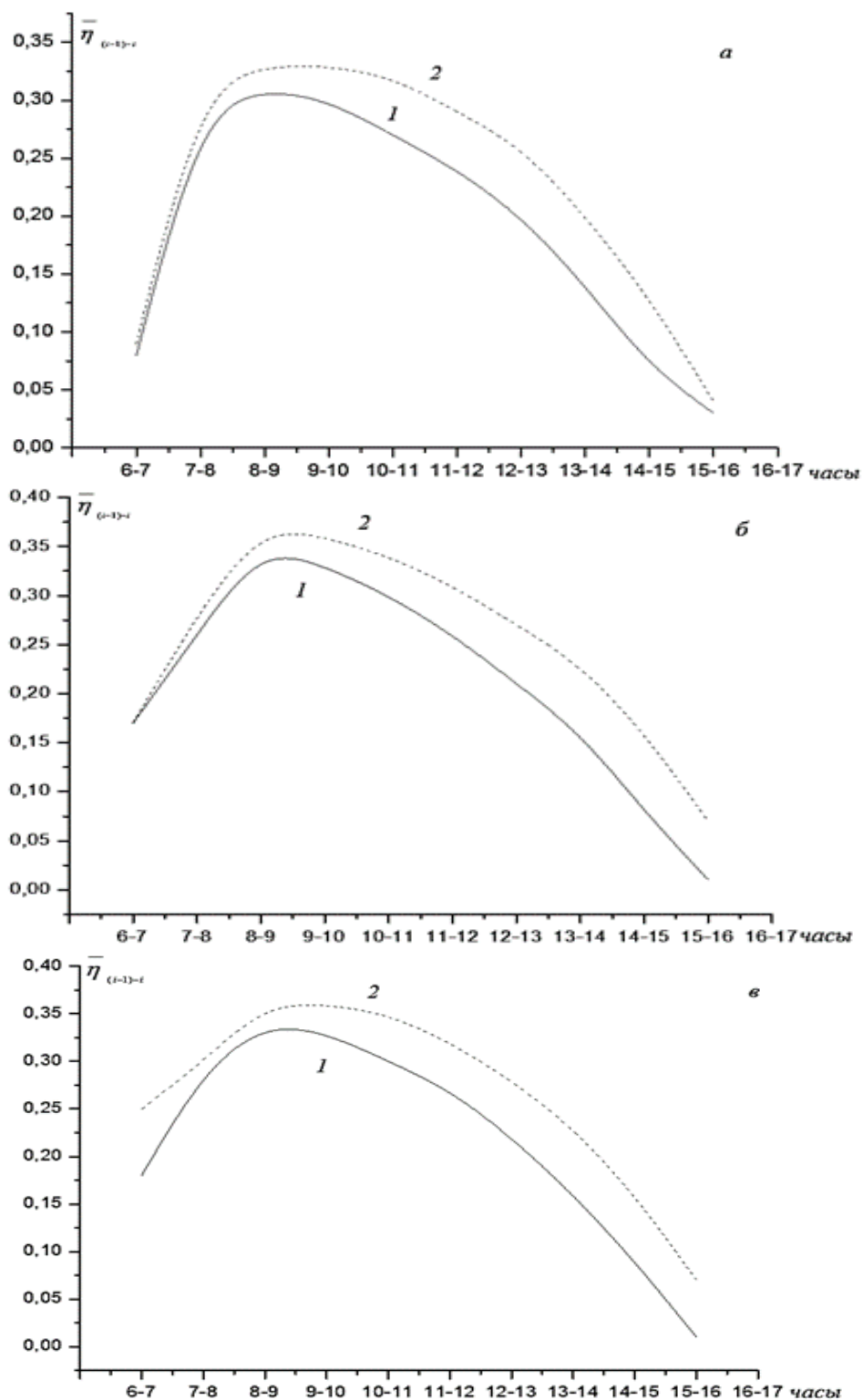


Рис.3.7. Дневные ходы среднечасовых значений тепловой эффективности $\bar{\eta}_{(i-1)-i}$ (1- при $\delta_\theta=0,05\text{ м}$ и 2 -при $\delta_\theta=0,07 \text{ м}$) для характерных дней теплого периода года: а, б и в – соответственно, для 15.VI, 15.VII и 15.VIII.

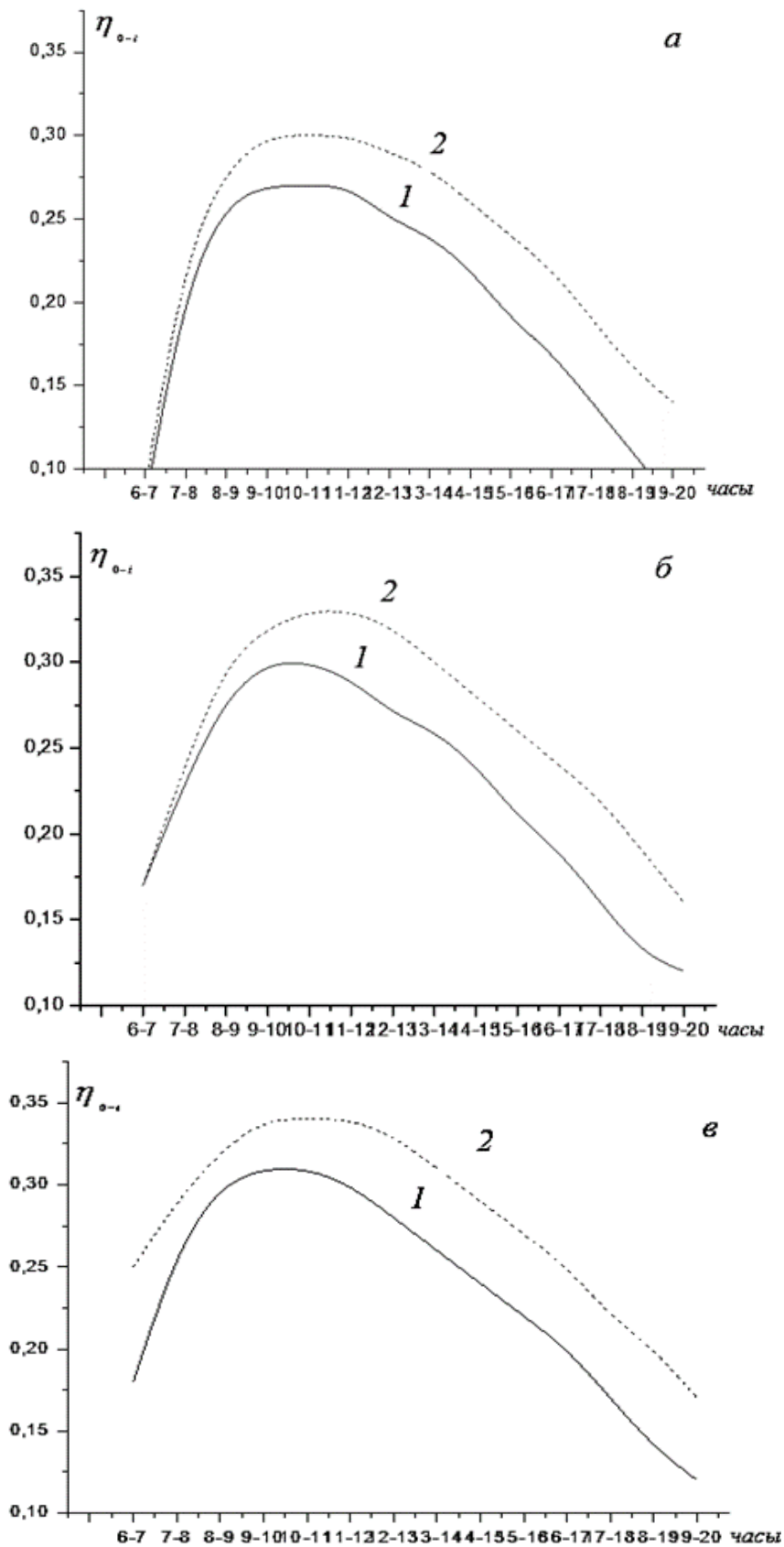


Рис.3.8. Дневные ходы значений суммарного теплового эффективности $\Sigma\eta_{0-i}$ (1- при $\delta_\epsilon = 0,05$ и 2- при $\delta_\epsilon = 0,07$) для характерных дней теплого периода года: а, б и в – соответственно, для 15.VI; 15.VII и 15.VIII.

Из графиков по рис. 3.8 также следует, что значения понижаются до $0,08 \div 0,1$ при $\delta_g = 0,05\text{м}$ и $0,15 \div 0,17$ при $\delta_g = 0,07\text{м}$.

Для определения тепловых потерь коллекторов рассматриваемого типа через их отдельные элементы в условиях нестационарного теплового режима предложена математическая модель, основанная на представлении распространения энергии

$$c\rho \frac{dt_x}{d\tau} = \lambda \frac{d^2 t_x}{dx^2} \quad (3.63)$$

дискретном виде, т.е.

$$c\rho \frac{t_{i+1,j} - t_{i,j}}{\Delta\tau} = \lambda \frac{t_{i+1,j+1} + t_{i+1,j-1} - 2 \cdot t_{i,j}}{\Delta x^2} \quad (3.64)$$

с установлением балансовых уравнений для каждой составляющих узлов ПСВК [44].

В сфере моделировании рабочих режимов солнечных коллекторов выполнены работы, которые представлены в работах [37-43]. В этих работах изучены рабочие режимы коллекторов, в которых не происходят фазовые переходы, т.е. они не имеют открытой поверхности испарения. Исходя из этого, существует необходимость разработки математической модели рабочего режима рассматриваемого коллектора для определения ее теплотехнических характеристик. На рис.1. а) и б) представлены принципиальная схема и расчетная схема определения температур в соответствующих узлах плоского солнечного коллектора с емким теплоприемником.

$$Q_{над} = Q_t + \Delta Q \quad (3.65)$$

где ΔQ - тепловые потери, происходящие через верхние и нижние поверхности рассматриваемого коллектора.

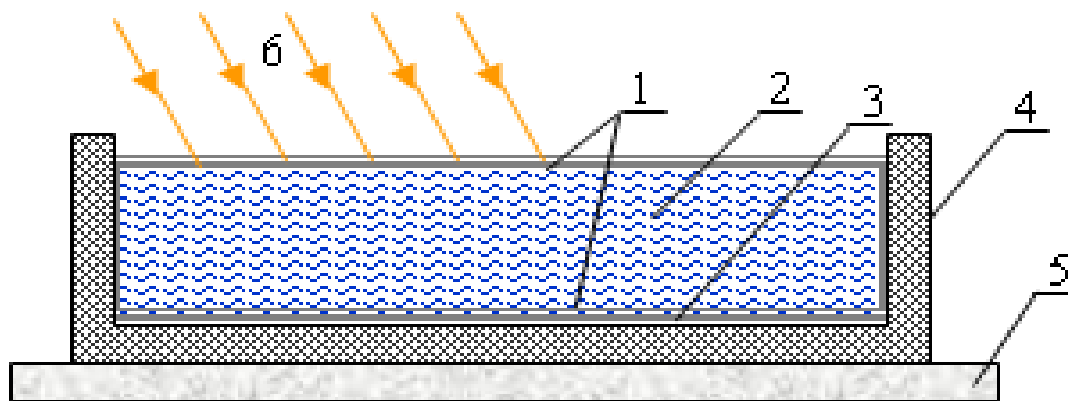


Рис.3.9. Принципиальная схема плоского солнечного коллектора с емким теплоприемником: 1- полиэтиленовая пленка (п); 2- вода (в); 3- мазутный слой (м); 4- бетонный слой (б); 5- почва (з); 6- солнечная излучения

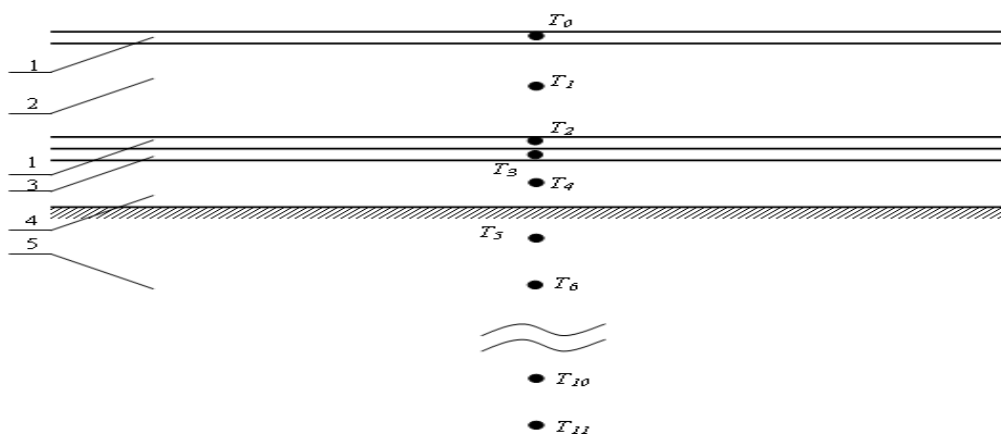


Рис.3.10.Расчетная схема определения температур в соответствующих узлах плоского солнечного коллектора с емким теплоприемником; •-расположение центров контрольных объемов.

Энергия суммарного солнечного излучения падающей к фронтальную поверхность плоского солнечного коллектора с емким теплоприемником, преобразуется в тепло и расходуется для повышения температуры воды в коллекторе и на компенсацию тепловых потерь в окружающую среду.

$$Q_6 = h_{23}(T_o - T_a) \quad (3.66)$$

- тепловые потери в окружающую среду через теплопроводящей (полиэтиленовая пленка) поверхности путем конвективного теплообмена.

$$Q_n = \frac{\lambda_{4,5}}{\Delta x_{4,5}}(T_4 - T_5) \quad (3.67)$$

- тепловые потери в окружающую среду через дно коллектора.

Выражение для коэффициентов полезного действия (КПД) рассматриваемого коллектора имеет следующий вид

$$\eta = 1 - \frac{Q_6 + Q_n}{Q_{над}} \quad (3.68)$$

При разработке математической модели рабочего режима рассматриваемого солнечного коллектора приняты следующие допущения:

- температура слоев дна одномерно;
- температура воды в каждый момент времени одинакова по всем объеме;
- теплофизические характеристики материалов дна зависят от температуры;
- фазовый переход типа вода-лед отсутствует;

Как показывают результаты расчетных и экспериментальных исследований [37,43,113], в зависимости от конструкции коллектора, тепловые потери через

боковые стенки являются незначительными по сравнению общего тепловых потерь. Исходя из этого в математической модели данного коллектора использовано дифференциальные уравнения второго порядка с частными производными и одномерные по пространству.

Как известно, дифференциальное уравнение теплопроводности для случая одномерности по пространству выражается в следующем

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.69)$$

Дискретный вид уравнение 5 по полностью неявному методу с использованием метода контрольного объема [114] и ВВЦП (вперёд по времени и с центрированным по пространству) [111,115] описывается в следующем

$$c\rho \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta t} = \lambda \frac{T_{i+1,j+1} + T_{i+1,j-1} - 2 \cdot T_{i,j}}{\Delta x^2}; \quad (3.70)$$

На основе выражение (3.70), [113] установлены балансовые уравнения каждого составляющих узлов рассматриваемой установки:

$$c_n \rho_n \delta_n \frac{\partial T_0}{\partial t} = h_{22}(T_1 - T_0) + h_{23}(T_a - T_0) + \alpha_n q^\Sigma; \quad (3.71)$$

- уравнение теплового баланса для верхней полиэтиленовой пленки с температурой T_0 ;

$$c\rho V \frac{\partial T_1}{\partial t} = h_{21} F_d (T_2 - T_1) + h_{22} F_d (T_0 - T_1) + \tau_n F_d \alpha_n q^\Sigma; \quad (3.72)$$

- уравнение теплового баланса для воды с температурой T_1 ;

$$c_n \rho_n \delta_n \frac{\partial T_2}{\partial t} = h_{21}(T_1 - T_2) + \frac{\lambda_{2,3}}{\Delta x_{2,3}}(T_3 - T_2) + \tau_n \tau_n \alpha_n q^\Sigma; \quad (3.73)$$

- уравнение теплового баланса для нижней полиэтиленовой пленки с температурой T_2 ;

$$c_m \rho_m \delta_m \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\lambda_{2,3}}{\Delta x_{2,3}}(T_2 - T_3) + \frac{\lambda_{3,4}}{\Delta x_{3,4}}(T_4 - T_3) + \tau_n \tau_n \alpha_m q^\Sigma; \quad (3.74)$$

- уравнение теплового баланса для мазута с температурой T_3 ;

$$c_o \rho_o \delta_o \frac{\partial T_4}{\partial t} = \frac{\lambda_{3,4}}{\Delta x_{3,4}}(T_3 - T_4) + \frac{\lambda_{4,5}}{\Delta x_{4,5}}(T_5 - T_4); \quad (3.75)$$

- уравнение теплового баланса для бетона с температурой T_4 ;

$$c_3 \rho_3 \delta_5 \frac{\partial T_5}{\partial t} = \frac{\lambda_{4,5}}{\Delta x_{4,5}} (T_4 - T_5) + \frac{\lambda_5}{\Delta x} (T_6 - T_5); \quad (3.76)$$

$$c_3 \rho_3 \delta \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\lambda_3}{\Delta x} (T_{i-1} - T_i) + \frac{\lambda_3}{\Delta x} (T_{i+1} - T_i), \quad i=6,7\dots 10; \quad (3.77)$$

- уравнение теплового баланса для почвы (рис.1,б);

$$c_3 \rho_3 \delta_{11} \frac{\partial T_{11}}{\partial t} = \frac{\lambda_3}{\Delta x} (T_{10} - T_{11}); \quad (3.78)$$

- уравнение теплового баланса для адиабатического слоя с температурой T11.

Здесь c, ρ, V, T_1 - удельная теплоемкость, плотность, объем и температура воды, соответственно; $h\gamma_1$ и $h\gamma_2$ - коэффициенты теплообмена между дном коллектора и водой, и между водой и полиэтиленовой пленки, соответственно; $h\gamma_3$ - суммарный коэффициент теплообмена между полиэтиленовой пленки и окружающей средой; F - площадь поверхности дна коллектора; $(\rho_п, \delta_п)$, $(\rho_м, \delta_м)$ и $(\rho_б, \delta_б)$ - удельные теплоемкости, плотности и толщины полиэтиленовой пленки, зачерненного слоя (мазут) и бетонного слоя, соответственно; (c_3, ρ_3, λ_3) - удельная теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности земли (почвы), соответственно; $Q_{над}$ - суммарная солнечная излучения падающая на горизонтальную поверхность коллектора; $\tau_n, \tau_в$ - коэффициенты лучепропускания солнечного излучения полиэтиленовой пленки и воды, соответственно; $\alpha_n, \alpha_в$ - коэффициенты лучепоглощения солнечную излучению полиэтиленовой пленки и воды, соответственно; $\lambda_{2,3}, \lambda_{3,4}, \lambda_{4,5}$ - коэффициенты теплопроводности между контрольных объемов 2 и 3, 3 и 4, 4 и 5 определяемый по методике [62]; δ - толщины контрольных объемов в почве.

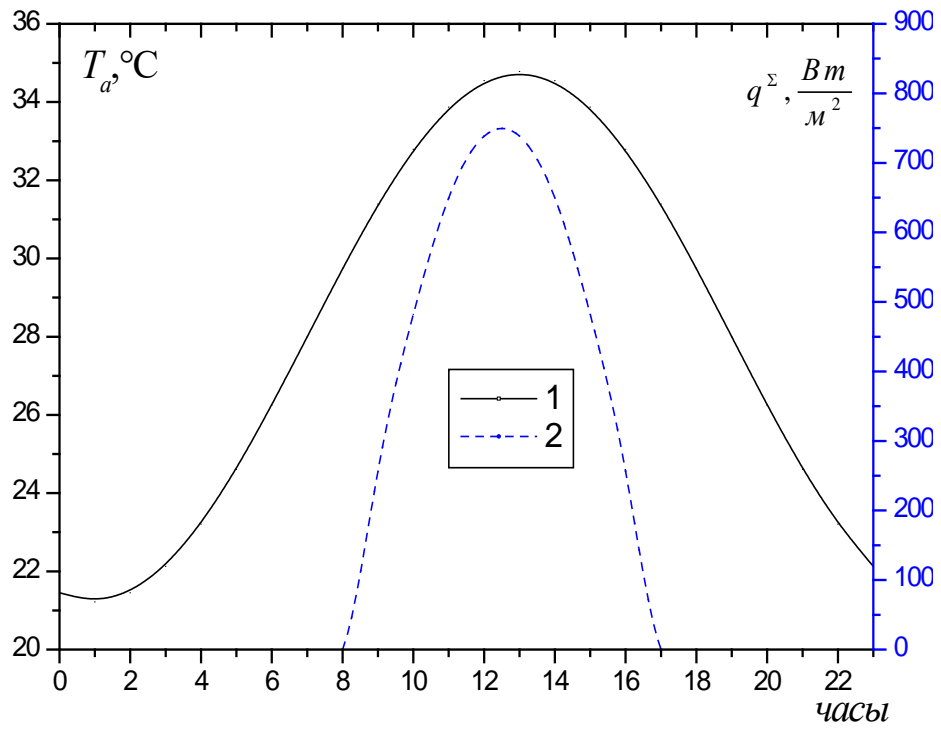


Рис.3.11. Параметры окружающей среды: 1-температура; 2-солнечная радиация.

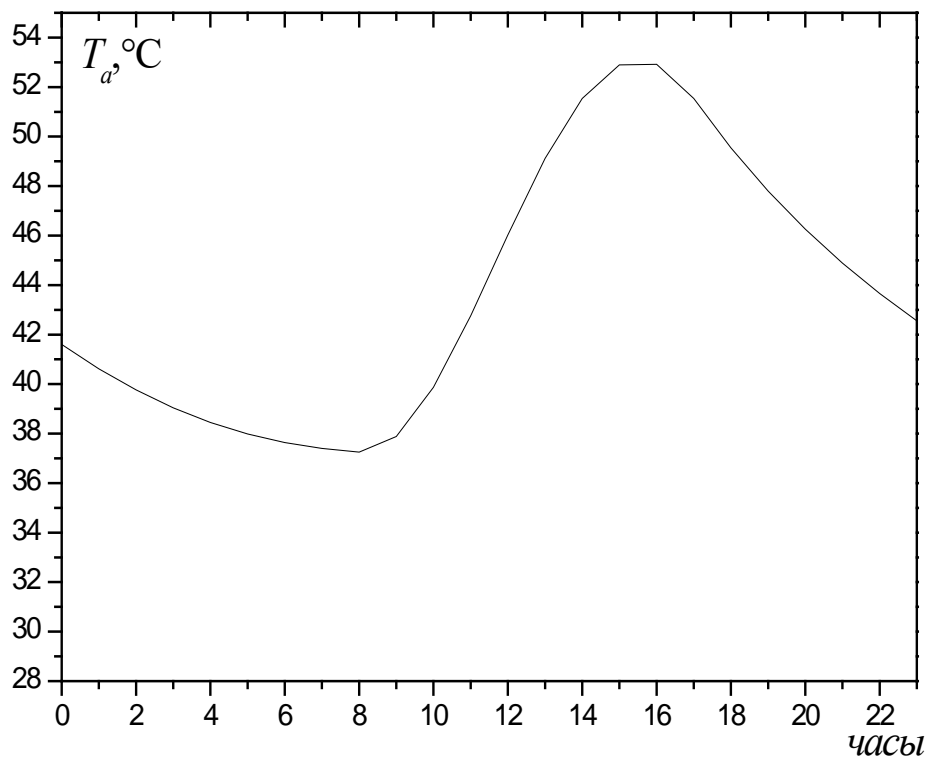


Рис.3.12. Суточный ход температуры воды в коллекторе.

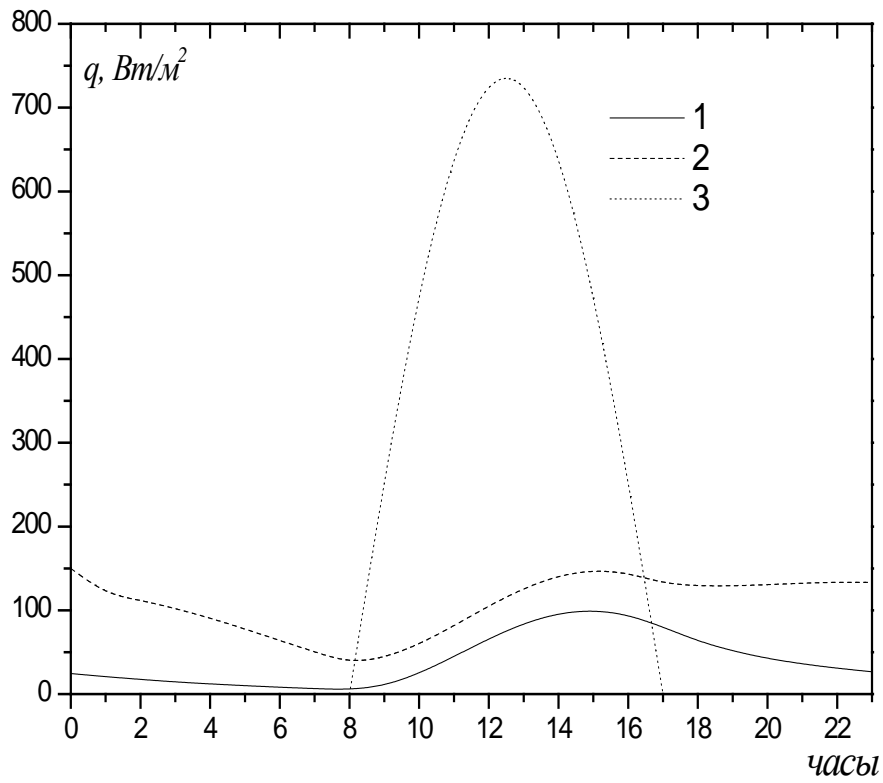


Рис.3.13. Тепловые потери 1- через дна (нижний) и 2- через верхней полиэтиленовой пленки коллектора; 3-плотность потока падающего солнечного излучения.

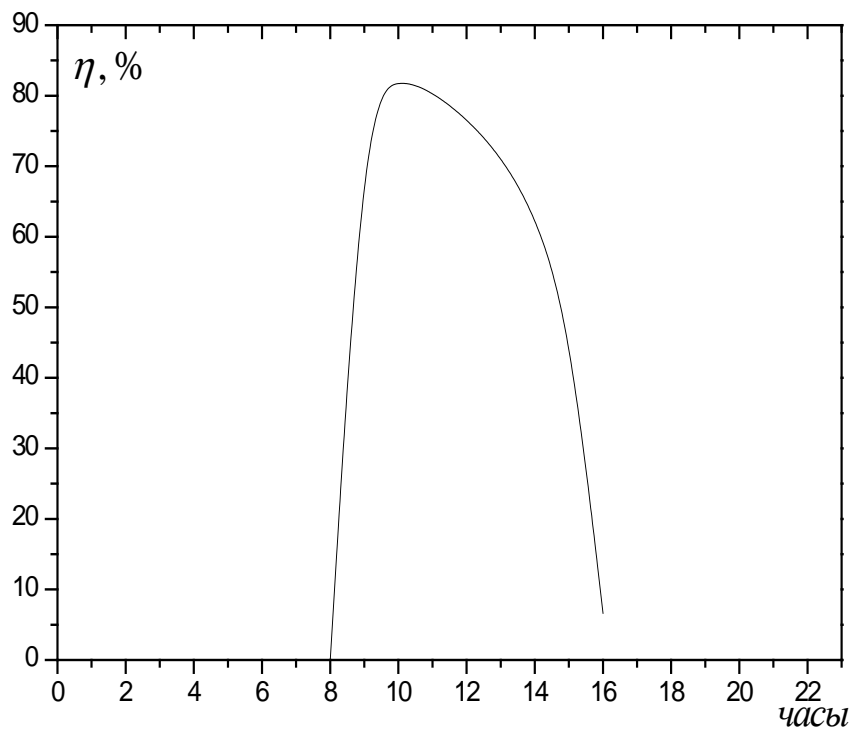


Рис.3.14. Дневной ход коэффициента полезного действия (КПД) коллектора.

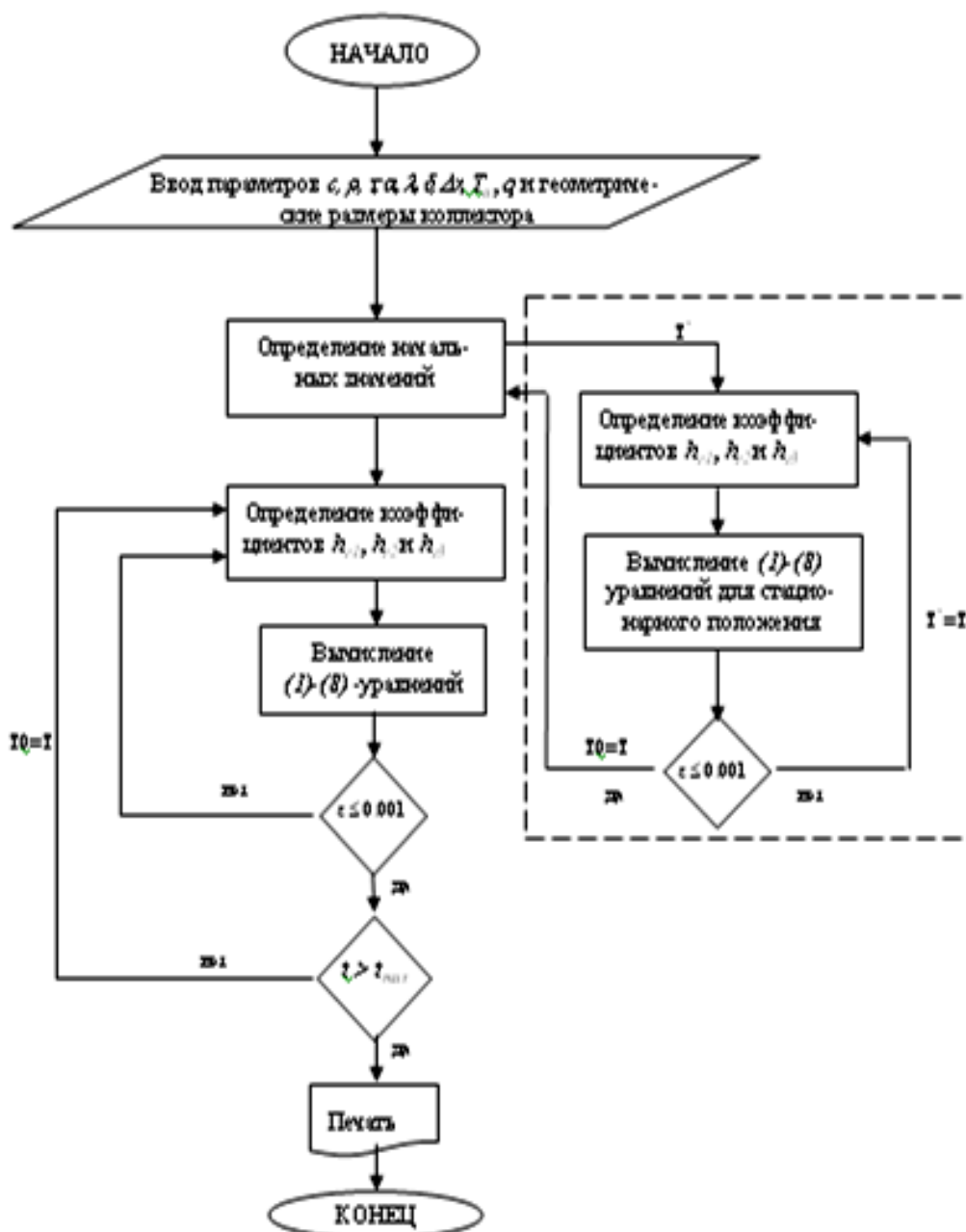


Рис.3.15. Алгоритм разработанной модели в виде блок-схемы.

Значения коэффициентов теплообмена определены с использованием методики, приведенной в [115]. Геометрические размеры и теплофизические свойства элементов системы, используемые при выполнении численных расчетов, представлены в работе [25]. Разработанная математическая модель описывающий процесс или система уравнений получаемое из дифференциальных уравнений (3.71-3.78) на основе уравнение (3.70) являются нелинейными. При решении данной системы уравнений используется итерационный метод [61]. С решением систем уравнений (3.71-3.78) для стационарного режима определяются начальные условия. С использованием начальных значений температур определяются значения коэффициентов $h_{г1}$, $h_{г2}$ и $h_{г3}$ и в результате система уравнений (3.71-3.78) становится линейными. С решением полученной системы уравнений

итерационным методом Гаусса-Зейделя определяются значения температур через Δt времени [61]. На рис.3.15. представлено алгоритм разработанной модели.

На рис.3.16 представлены результаты расчетов по определению параметров окружающей среды, т.е. суточное изменение плотности потока падающего солнечного излучения и температуры окружающей среды и на рис.3.16. представлены результаты расчетов по определению суточного хода температуры воды в коллекторе.

Как показывает результаты расчетов при плотности потока суммарного солнечного излучения падающей на фронтальной поверхности рассматриваемого коллектора и при температуре окружающей среды значение температуры воды в коллекторе составляет 52°C . Погрешность разработанной математической модели составляет 5% [61, 62, 111] и численные расчеты, выполненные в программном пакете Mathcad 2001 pro [61, 112].

Для численной реализации предложенной математической модели разработана программа расчета с помощью ЭВМ, на что получено авторское свидетельство № DGU 02426 «Математическое моделирование теплового режима плоского солнечного коллектора с емким лотковым теплоприемником», зарегистрированное в Государственном реестре программ для электронно вычислительных машин РУз в г. Ташкенте 27.02.2017г.

На рис.3.16 приведены исходные данные для выполнения численных расчетов, которые характерны для теплого периода года, а на рис.3.17 результаты численных расчетов по определению тепловых потерь коллектора через его дно и фронтальную поверхность.

Как следует из анализа результатов, приведенных на рис.3.17, в течение дневного периода сутки значения тепловых потерь коллектора через его фронтальную поверхность, как и ожидалась, в среднем в два раза больше чем тепловые потери через дно, и составляет $120 \div 150 \text{ Вт/м}^2$.

Как показывают результаты расчетов при плотности потока суммарного солнечного излучения, падающего на фронтальную поверхность рассматриваемого коллектора $650 \div 750 \text{ (Вт/м}^2\text{)}$ и при температуре окружающей среды $35 \div 37^{\circ}\text{C}$ значение температуры воды в коллекторе составляет $52 - 55^{\circ}\text{C}$.

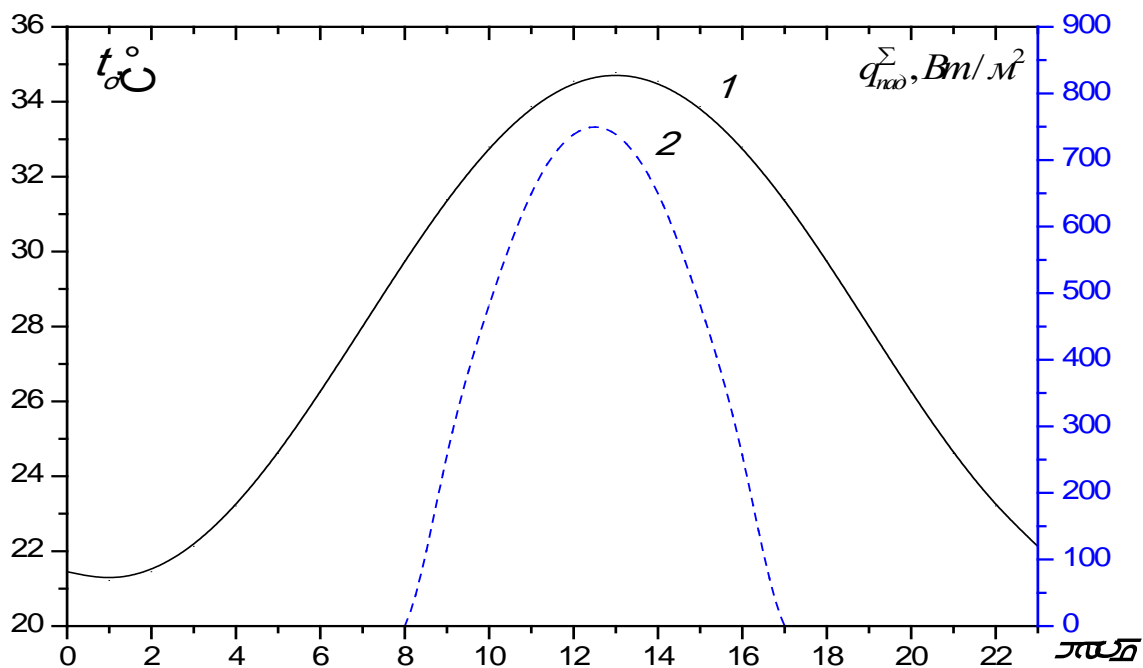


Рис.3.16. Исходные данные для проведения расчетов: 1- суточный ход температуры окружающей среды; 2 – дневной ход поверхностной плотности потока суммарного солнечного излучения, падающего на горизонтальную поверхность.

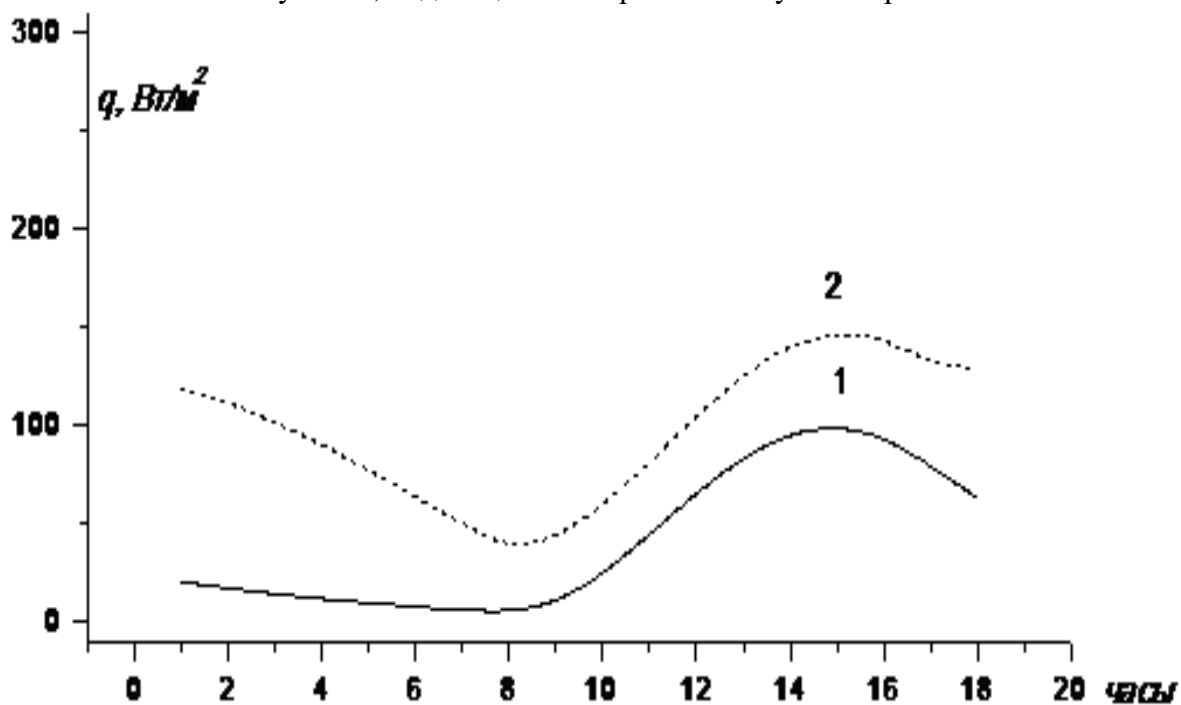


Рис.3.17. Суточный ход тепловых потери коллектора: 1- через дно, 2- фронтальную поверхность

Максимальное значение относительной погрешности расчетов при этом составляет 5% [62]. Результаты выполненных расчетов хорошо согласуется с

результатами исследований, выполненных в [21, 98] для коллекторов рассматриваемого типа, дно корпуса которых совмещено с грунтом.

В связи с этим, в данной главе предложены выражения для определения динамики накопления тепла в ПСВК с емкостным ПСИ и донным поглощением СИ, выражение для определения дневного хода температуры воды в емкостном ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ; установлено расчетное выражение для определения значения коэффициента тепловой эффективности емкостного ПСИ ПСВК с донным поглощением СИ; выполнены численные эксперименты по определению дневных ходов среднечасовых и суммарной дневной тепловой эффективности ПСВК с емкостным ПСИ; предложена и численно реализована математическая модель нестационарного теплового режима ПСВК с емким ПСИ.

ГЛАВА IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛО-ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОСКИХ СОЛНЕЧНЫХ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ЕМКОСТНЫМИ ПОГЛОТИТЕЛЯМИ СОЛНЕЧНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ДОННЫМ ЛУЧЕПОГЛОЩЕНИЕМ ИЗГОТОВЛЕННЫМИ ИЗ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ПЛАСТИКОВ

На основе комплекса выполненных научных исследований по тепловому расчету ПСВК с емкостным ПСИ и с донным поглощением СИ и теплоизолированными плоскими основаниями нами разработаны и сравнительно испытаны в натуральных условиях опытные образцы солнечных коллекторов рассматриваемого типа. В данной главе приведены результаты сравнительных экспериментальных исследований в натуральных условиях температурного режима и тепловой эффективности вышеуказанных солнечных коллекторов, расположенных горизонтально в меридиональном направлении по сторонам света, т.е. длинная ось плоского основания коллекторов направлена с востока на запад. Эксперименты проводились в условиях городов Ташкента (гелиополигоне ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз) и Гулистана (на гелиоплощадке Гулистанского государственного университета) в течение тепловых периодов 2008-2019 годов.

Целью натуральных экспериментов является:

- проверка адекватности результатов расчетных и экспериментальных исследований;
- определение количества испаренной влаги из ПСВК с емкостным ПСИ с открытой поверхностью;
- установление степени зависимости температуры горячей воды от толщины слоя воды в емкостном ПСИ;
- установление теплопроизводительности и тепловой эффективности коллекторов рассматриваемого типа и рациональных сроков их эксплуатации в сезонных системах горячего водоснабжения.

§ 4.1. Краткое описание ПСВК с емкостными ПСИ, изготовленными из СП с донным поглощением солнечного излучения и порядок проведения экспериментов

В целях выявления возможностей создания простых и дешевых СВК из местных строительных материалов и использования их в сезонных СГВС нами созданы и экспериментально исследованы в натуральных условиях опытные и опытно-производственные образцы ПСВК рассматриваемого типа. Опытные образцы ПСВК с донным поглощением СИ в количестве 2 шт., имеющие четырехугольную лотковую форму, габаритные размеры по наружным меркам: длина – 1,6 м; ширина – 0,8 м; фронтальная поверхность (включая фронтальные поверхности боковых стенок) 1,28 м².

Боковые стенки и дно коллекторов выполнены из строительного бетона и имеют толщину 0,1 м. Внутренние поверхности коллекторов защищены водонепроницаемым слоем из черного строительного битума.

Коллекторы установлены в горизонтальном расположении на земле. Донные части коллекторов теплоизолированы от земли камышитовой теплоизоляционной плитой, имеющую толщину 0,1 м.

Исследуемые коллекторы отличались тем, что в одной из них нагреваемая вода находится в полиэтиленовом контейнере, а в другом – находится в непосредственном контакте с окружающей средой, т.е. имеет открытую поверхность испарения.

Лучевоспринимающие поверхности коллекторов (в первом с полиэтиленовым мешком и во втором – с открытой поверхностью испарения) равны и составляют $0,84 \text{ м}^2$. Коллекторы установлены рядом друг с другом и в процессах исследований находились в одинаковых внешних условиях.

Также изготовлен опытно-производственный образец ПСВК с донным поглощением СИ в количестве 1 шт. Боковые стенки и дно коллектора выполнены из гидротехнического бетона толщиной 0,1 и 0,05 м соответственно. Коллектор с габаритными размерами 5,2 (длина) x 1,2 (ширина) x 0,1 (толщина) и площадью фронтальной поверхности $6,24 \text{ м}^2$ установлен горизонтально на земле.

Донная часть коллектора (лотка) изолирована от земли одним слоем строительного рубероида и камышитовой теплоизоляционной плитой толщиной 0,1 м. Внутренние лучепоглощающие поверхности коллектора защищены водонепроницаемым слоем из черного строительного битума. Внутренней объем лотка с фронтальной лучевоспринимающей поверхностью 5 м^2 (5x1) и толщиной 0,1 м равен $0,5 \text{ м}^3$. Нагреваемая вода заливается в прозрачный пластмассовый мешок из полиэтиленовой пленки толщиной 0,1 мм, снабженный двумя патрубками для подвода исходной (холодной) и отвода горячей (или теплой) воды и чечевицами для ввода во внутрь стеклянных ртутных термометров. Форма и габаритные размеры мешка соответствуют внутренней форме и размерам лотка. Максимально возможная толщина слоя воды в мешке составляет 0,1 м.

В процессе экспериментальных исследований через каждые 30 минут измерялись: дневной ход плотности потока суммарного СИ, падающего на плоскость фронтальной (горизонтальной) поверхности коллектора (с помощью пиранометра П=80М), температуры наружного воздуха и нагреваемой воды в коллекторе с помощью лабораторных термометров и скорость ветра (с помощью чашечного анемометра МС-13). Измерения начинались в 8 ч утра и завершались в 18 ч вечера.

Количество заливаемой в опытные коллекторы и забираемой от них воды измерялись весовым методом, а в опытно-производственном коллекторе – только утром.

§4.2. Методика обработки результатов экспериментальных исследований

Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов с проточными приемниками излучения [80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90], из-за их малоинерционности по сравнению с коллекторами с емкими приемниками, не приемлемы для испытания последних. В связи с тем, что, в СК с емкими приемниками полезно -поглощенное и преобразованное в низкопотенциальное тепло энергии СИ накапливается в течение светового дня, для обработки результатов измерений основных экспериментальных данных нами усовершенствован и применен интегральный метод, основанный на использовании среднедневных (или осредненных за определенный промежуток времени светового дня) значений измеренных параметров и соответствующих теплотехнических характеристик.

В связи с тем, что количество нагреваемой в коллекторах воды в течение дня постоянно, т.е. в период одного цикла экспериментов дневной забор горячей воды из коллекторов не производится, дневное количество накопленного в емком приемнике полезного тепла ($Q_{пол}^{дн}$) может определяться по начальной (t_{θ_9}) и конечной ($t_{\theta_{16}}$) температурами воды в исследуемых коллекторах, т.е.

$$Q_{пол}^{дн} = V_{\theta n} \rho C_{p_e} (t_{\theta_{16}} - t_{\theta_9}), \quad (4.1)$$

или с учетом, что $V = \delta_{\theta} F_{\theta p}$, (4.2)

и $\rho_{\theta} = 1000 \text{ кг/м}^3$ и $C_{p_e} = 4,1868 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°C)}$ выражение (4.1) примет вид

$$Q_{пол}^{дн} = 4186,8 \delta_{\theta} F_{\theta p}. \quad (4.3)$$

Значение среднедневной тепловой эффективности или КПД коллектора рассматриваемого типа определяется из известного отношения

$$\eta = \frac{Q_{пол}^{дн}}{Q_{над}^{дн}}, \quad (4.4)$$

С учетом значений $Q_{пол}^{дн}$ и $Q_{над}^{дн} = Q_{над}^{дн} \cdot F_{\theta p}$ (4.5)

отношение (4.4) может быть представлено в виде

$$\eta = \frac{4186,8 \delta_{\theta}}{Q_{над}^{дн}} \cdot K_{зан} \quad (4.6)$$

где $K_{зан} = \frac{F_{mn}}{F_{\theta p}}$ (4.7)

- коэффициент заполнения коллектора рассматриваемого типа.

Если среднее (за указанный промежуток времени светового дня) значение температуры нагреваемой в рассматриваемых коллекторах воды $t_{\theta_{9-16}}$ определит как среднеарифметические между t_{θ_9} и $t_{\theta_{16}}$, т.е.

$$\bar{t}_{\theta_{9-16}} = 0,5(t_{\theta_9} + t_{\theta_{16}}) \quad (8)$$

то проставляется возможным построить графическую зависимость их тепловой эффективности ($\bar{t}_{\theta_{9-16}}$) от параметра $\left(\frac{\bar{t}_e - \bar{t}_o}{-\Sigma} \right)_{9-16}$ $q_{над}$ которая позволяет сообщить и

сопоставить результаты опытов в различных погодных условиях в зависимости от расположения и ориентации по сторонам света исследуемых коллекторов, наличия и отсутствия тепловой изоляции на их плоских основаниях.

Расчеты по представленной методике сходятся с данными по обработки результатов экспериментальных исследований дневного количество накопленного в емком приемнике полезного тепла плоских солнечных водонагревательных коллекторов с донным поглощением солнечного излучения и теплоизолированными плоскими основаниями.

Количество заливаемой в коллектор воды составлял 50 л при температуре 26°C. Как следует из анализа результатов измерений, максимальные температуры нагреваемой в коллекторах воды приходится к 14 часам дня и составляют, соответственно 51°C в коллекторе, в котором нагреваемая вода находится в полиэтиленовом мешке, и 42°C в коллекторе имеющего открытую поверхность испарения воды. Максимальное значение температуры окружающей среды в это время составляет 35°C. Из анализа результатов экспериментов также следует, что благодаря защите поверхности нагреваемой воды полиэтиленовой пленкой, температура теплой воды в коллекторе с полиэтиленовым мешком к 14 ч дня выше на 9°C, чем у коллектора с открытой поверхностью испарения.

Как показали результаты измерения объема забираемой воды из коллекторов теплой воды, к концу дня (18 ч вечера) потери воды в коллекторе с открытой поверхностью испарения составляет 5 л.

§4.3. Оценка погрешностей измерений и вычислений

Как уже констатировано выше (раздел 4.1), основными параметрами окружающей среды, подлежащими непосредственному измерению, являются температура наружного воздуха (t_o), скорость ветра (\mathcal{V}), поверхностная плотность потоков суммарного (прямого и диффузного) СИ падающего на горизонтальную поверхность коллектора ($q_{над,с}^{\Sigma}$). Состояние небосвода (облачность, запыленность и т.п.) фиксируется визуально. Габаритные размеры коллекторов, внутренний объем их приемников, масса также определяются непосредственными измерениями известными способами.

Проверка актинометра и пиранометра и анемометра производилась два раза в год – перед началом и после завершения летнего сезона, в бюро проверки Главного Управления гидрометеорологической службы при КМ Республики Узбекистан.

Среднеквадратичная погрешность измерений и вычислений определялась на основе относительных погрешностей отдельных измерений и вычислений, главными из которых являются:

-относительная погрешность при измерениях температуры наружного воздуха с помощью метеорологического ртутного термометра:

$$\delta_{t_o} = \frac{1 \cdot 100\%}{50} = 2,0\%$$

-относительная погрешность при измерениях температуры холодной и горячей воды с помощью лабораторного ртутного термометра:

$$\delta_{t_e} = \frac{1 \cdot 100\%}{100} = 1,0\%$$

-относительная погрешность при измерениях объема воды в емком приемнике с помощью мерных цилиндров:

$$\delta_v = \frac{1 \cdot 100\%}{68} = 1,5\%$$

-относительная погрешность при измерениях прихода суммарного СИ с помощью пиранометра, согласно паспортным данным:

$$\delta_q = \pm 3,0\%$$

-относительная погрешность при определении габаритных размеров приемника:

$$\delta_d = \frac{5 \cdot 100\%}{344} = 1,45\%$$

-относительная погрешность при определении величины поглощенного зачерненным дном коллектора суммарного солнечного излучения

$$\delta_\alpha = \frac{0,05 \cdot 100\%}{0,92} = 5,4\%$$

-относительная погрешность при определении значения геометрических размеров ПСВК с помощью рулетного метра:

$$\delta_z = \frac{0,05 \cdot 100\%}{5,0} = 1\% ;$$

-относительная погрешность при определении средней скорости ветра:

$$\delta_v = \frac{0,5 \cdot 100\%}{5,0} = 10\% ;$$

Среднеквадратичная суммарная погрешность измерений и вычислений при этом составляет [81, 560 с.]

$$\bar{\delta}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{\sum \delta_i^2}{n}} = \sqrt{\frac{\delta_{t_o}^2 + \delta_{t_e}^2 + \delta_v^2 + \delta_q^2 + \delta_d^2 + \delta_\alpha^2 + \delta_z^2 + \delta_v^2}{8}} = 6,00\% .$$

§4.4. Результаты натуральных экспериментальных исследований и их обсуждение

Экспериментальные исследования, как уже отмечено в начале IV главы, по измерению температуры нагреваемой воды в солнечных коллекторах с емкостными приемниками рассматриваемой формы, прихода солнечной радиации на их лучепоглощающие поверхности и скорости ветра проводились в условиях городов Ташкента (гелиополигоне ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз) и Гулистана (на гелиоплощадке Гулистанского государственного университета) в течение тепловых периодов 2008-2017 годов.

Результаты однодневных экспериментов приведены на рис. 4.1 - 4.2.

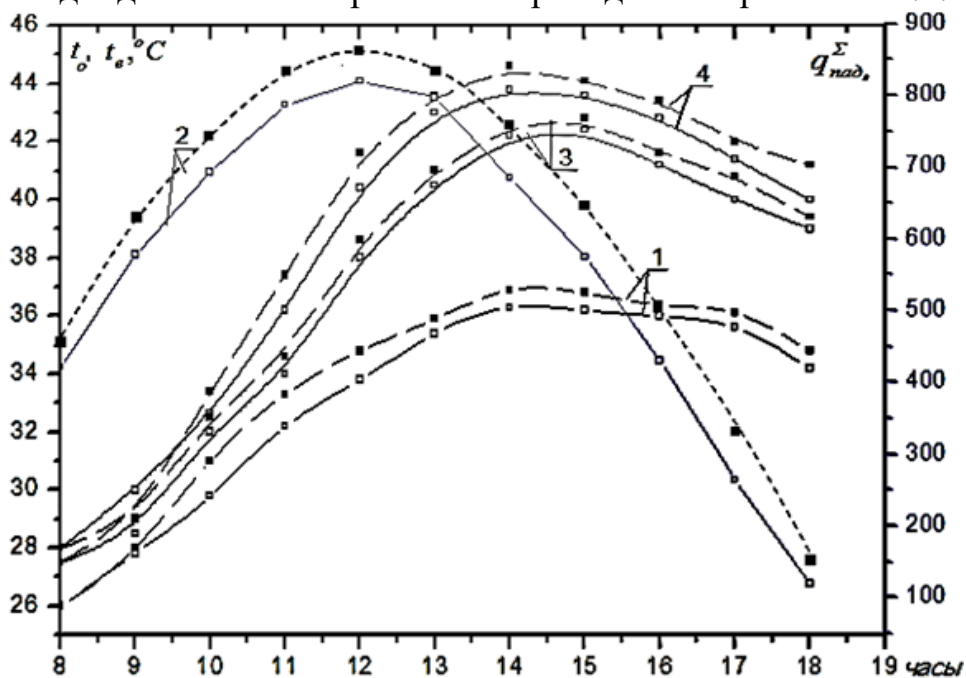


Рис. 4.1. Результаты однодневных сравнительных экспериментальных исследований опытного образца ПСВК с емкостным ПСИ с открытой поверхностью при толщине слоя воды в нем 0,05 и 0,07 м: 1- дневные ходы температуры окружающей среды (t_o); 2- дневные ходы суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над, \Sigma}$); 3- дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_e) при 0,07 м; 4- дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_e) при 0,05 м за 6 июля (сплошной) и за 6 августа 2017 г. (пунктирный).

Выбор даты начала и конца экспериментальных исследований коллекторов в течение суток нацелен на определение рациональных сроков начала и конца их эксплуатации в сезонных СГВС, т.е. уточнением возможных сроков начала и конца получения из них горячей (или теплой) воды с температурой 40°C и выше, пригодной для бытовых нужд сезонных потребителей.

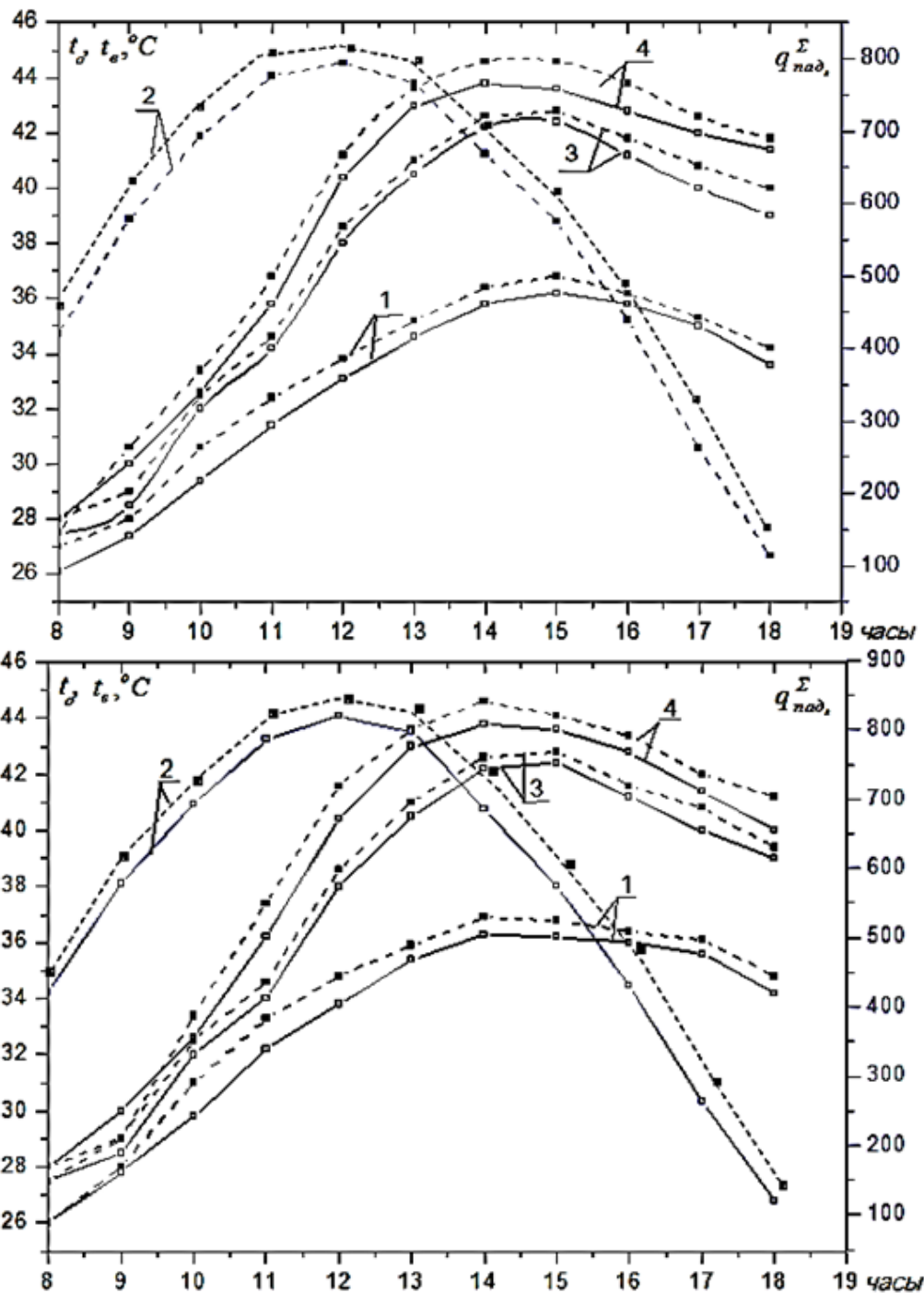


Рис. 4.2. Результаты однодневных сравнительных экспериментальных исследований опытного образца ПСВК с емкостными ПСИ с открытой поверхностью при толщине слоя воды в нем 0,05 и 0,07 м:

- 1 – дневные ходы температуры окружающей среды (t_o); 2 – дневные ходы суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над, \Sigma}^{\Sigma}$); 3 – дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_e) при 0,07 м;
 4 – дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_e) при 0,05 м за (а) 9 июля (сплошной) и за 7 августа, (б) 10 июля (сплошной) и за 8 августа 2017 г (пунктирный).

Первая серия опытов по определению количества испаренной воды от открытой поверхности коллектора была проведена в теплые периоды 2017-2018гг. Объем и температуру воды, заливаемый в коллектор, измеряли утром перед началом регулярных измерений параметров окружающей среды. Количество воды в коллекторах в экспериментах составляло от 42 до 59 л., а толщина слоя воды в них – 5 и 7 см.

Из анализа результатов экспериментальных данных за 6 июля и 5 августа 2017 г. (рис. 4.1) следует, что характеристики дневных ходов суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над_2}^{\Sigma}$) были очень близки друг-другу, но температуры окружающей среды отличались до $5\div 7^{\circ}C$.

Согласно данным экспериментов, проведенных 9 июля и 7 августа 2017г. (рис. 4.2), характеристики дневных ходов суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над_2}^{\Sigma}$) были очень близки друг-другу, но температуры окружающей среды отличались до $2\div 4^{\circ}C$.

Анализ экспериментальных данных, проведенных 10 июля 2017 и 8 августа 2017 г. (рис.4.3) показывает, что характеристики дневных ходов суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над_2}^{\Sigma}$) были очень близки друг-другу, но температуры окружающей среды отличались до $2\div 3^{\circ}C$.

Как показывает анализ результатов экспериментов количество испаренной влаги от открытой поверхности коллекторов зависит от количества залитой в них температуры воды и относительной влажности воздуха окружающей среды и составляет от 3,8 до 4,5 л воды в день. Результаты экспериментов показывают, что при равных условиях в коллекторах при толщине слоя воды ($\delta_г$) 0,05 м, количество испаренной влаги всегда больше, чем при ($\delta_г$) 0,07 м.

Например: 8 августа 2017 г. (рис. 4.2) количество испаренной влаги от открытой поверхности коллектора с толщиной воды ($\delta_г$) 0,05 м, составляло 4,1 л, что на 0,3 л больше чем у коллектора с толщиной воды ($\delta_г$) 0,07 м.

Максимальные значения удельной теплопроизводительности коллекторов рассматриваемого типа, как видно из графиков, приходятся к 14÷15 часам светового дня и составляют в среднем $3,768 \text{ МДж/м}^2$ при $\delta_г=0,05$ м и $5,275 \text{ МДж/м}^2$ при $\delta_г=0,07$ м.

При этом КПД коллектора рассматриваемого типа составляет, соответственно: при толщине слоя воды в нем 0,05 м 14% и при 0,07 м 17%.

Следующие серии экспериментов были проведены с опытными образцами ПСВК, емкостные ПСИ которых изготовлены в виде контейнера.

Отметим, что из-за трудности измерения в коллекторах рассматриваемого типа, температура получаемых из них теплой (горячей) воды измеряли в моменты водозабора из них (14 ч 30 м). Прогнозирование дневного хода температуры воды в коллекторах при этом осуществлялось на основе результатов расчетных исследований, которые изложены выше (раздел 3.3.).

Как следует из анализа результатов экспериментов, во всех случаях температура горячей воды, получаемой из коллекторов с закрытой поверхностью испарения на $10\div 12^{\circ}C$ выше, чем у коллекторов с открытой поверхностью испарения.

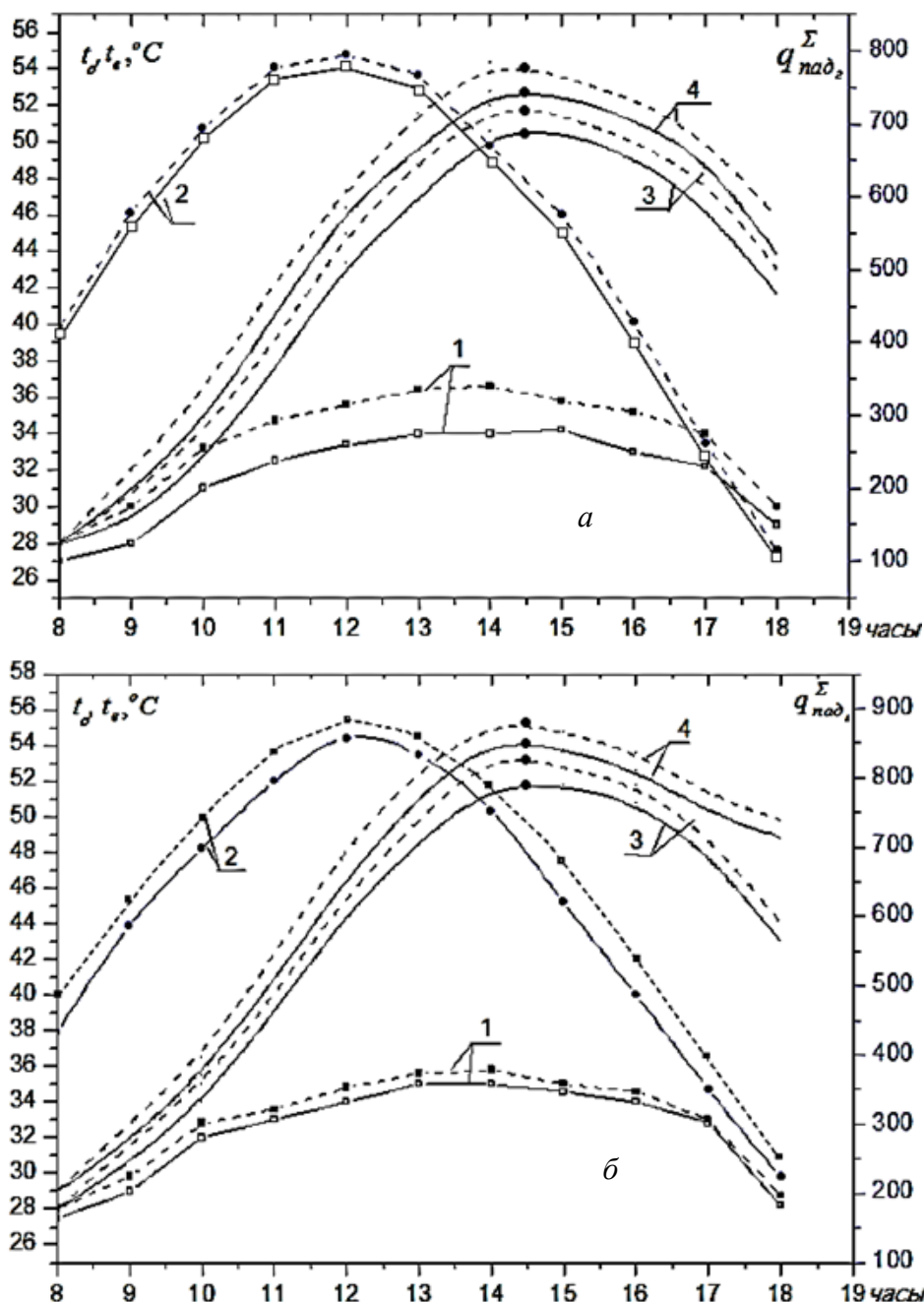


Рис. 4.3. Результаты однодневных сравнительных экспериментальных исследований опытного образца ПСВК с емкостными ПСИ без СП при толщине слоя воды в нем 0,05 и 0,07 м: 1- дневные ходы температуры окружающей среды (t_o); 2- дневные ходы суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над, \Sigma}$);

3- дневные ходы температуры воды в коллекторе с полиэтиленовым контейнером (t_w) при 0,07 м;

4 - дневные ходы температуры воды в коллекторе с полиэтиленовым контейнером (t_w) при 0,05 м за (а) 11 июля (сплошной) и 9 августа, (б) 12 июля (сплошной) и 10 августа (пунктирный) 2017 г.

С целью определения преимуществ коллекторов рассматриваемого типа по сравнению с коллекторами с открытой поверхностью испарения количества заливаемой воды в их емкостные ПСИ были выбраны одинаковыми, т.е. составили 42 л. (т.е. $\delta_w=0,05$ м) и 58,8 (т.е. $\delta_w=0,07$ м). Результаты опытов, проведенные за 11 июля и 9 августа 2017 г., 12 июля и 10 августа 2017 г. и 13 июля и 13 августа 2017 г. приведены на рис. 4.3-4.6.

Согласно результатам экспериментов 11 июля и 9 августа 2017 г. характеристики дневных ходов суммарного СИ, падающего на поверхность

коллектора ($q_{над_2}^{\Sigma}$) были очень близки друг-другу, но температуры окружающей среды отличались до $4\div 6^{\circ}C$.

Согласно результатам экспериментов 12 июля и 10 августа 2017 г. характер дневных ходов суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над_2}^{\Sigma}$) были очень близки друг-другу, но температуры окружающей среды отличались до $3\div 5^{\circ}C$.

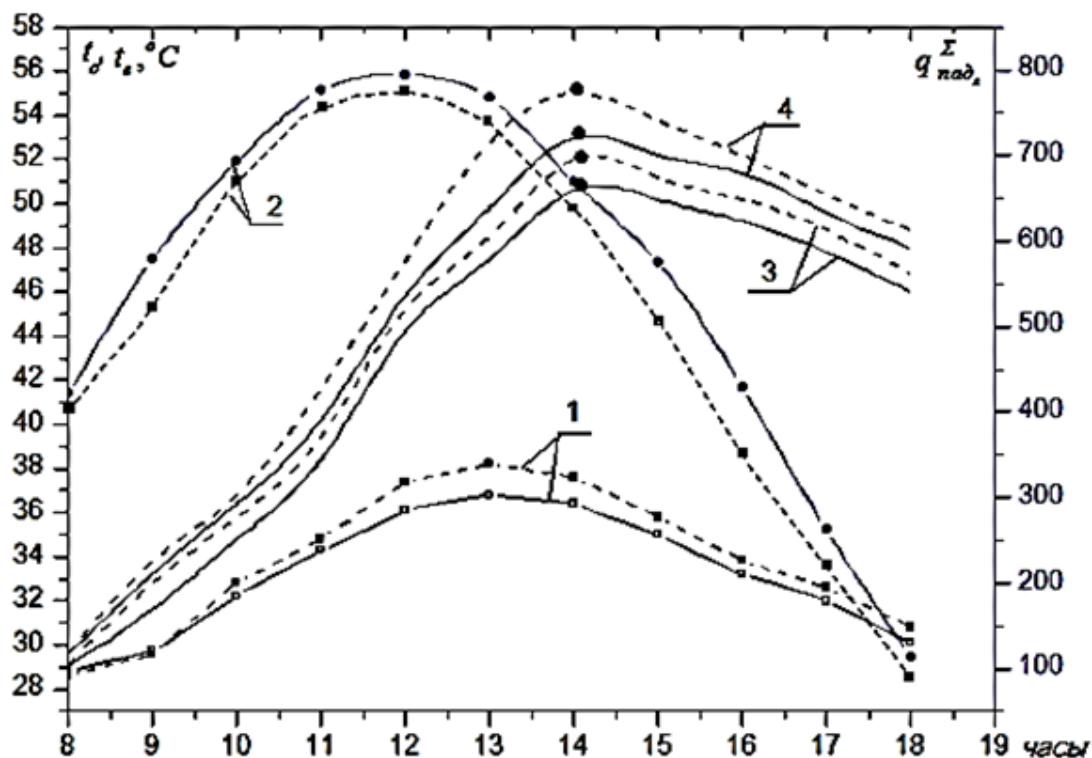


Рис. 4.4. Результаты однодневных сравнительных экспериментальных исследований опытного образца ПСВК с емкостными ПСИ без СП при толщине слоя воды в нем 0,05 и 0,07 м: 1- дневные ходы температуры ОС (t_o); 2- дневные ходы суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над_2}^{\Sigma}$); 3- дневные ходы температуры воды в коллекторе с полиэтиленовым контейнером (t_e) при 0,07 м; 4 - дневные ходы температуры воды в коллекторе с полиэтиленовым контейнером (t_e) при 0,05 м за 13 июля (сплошной) и 13 августа 2017 г. (пунктирный).

Согласно результатам экспериментов 13 июля и 13 августа 2017 г. характеристики дневных ходов суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над_2}^{\Sigma}$) были очень близки друг-другу, но температуры окружающей среды отличались до $4\div 6^{\circ}C$. Например, 13 августа 2017 г. максимальные значения удельной теплопроизводительности коллекторов рассматриваемого типа, согласно результатам расчетов по формуле (3.32) приходятся к 14÷15 часам светового дня и составляют $4,49 \text{ МДж}/\text{м}^2$ при $\delta_e=0,05$ м и $6,087 \text{ МДж}/\text{м}^2$ при $\delta_e=0,07$ м. При этом КПД коллектора рассматриваемого типа составляет, соответственно: при толщине слоя воды в нем 0,05 м 22% и при 0,07 м 28%.

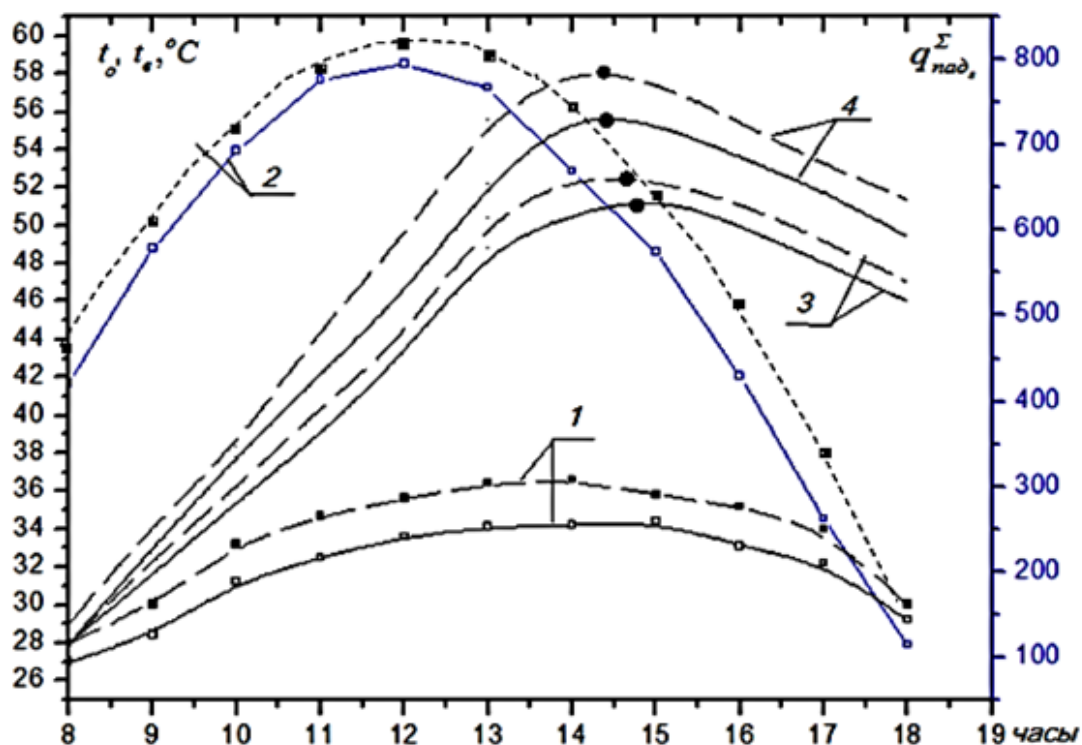


Рис. 4.5. Результаты однодневных сравнительных экспериментальных исследований опытного образца ПСВК с пленочным емкостным ПСИ со СП при толщине слоя воды в нем 0,05 и 0,07 м: 1- дневные ходы температуры окружающей среды (t_o); 2- дневные ходы суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{пад}^{\Sigma}$); 3- дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_g) при 0,07 м; 4 - дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_g) при 0,05 м за 16 июля (сплошной) и 14 августа (пунктирный) 2017 г.

Из сопоставления результатов однодневных экспериментальных исследований опытного образца ПСВК с пленочным емкостным ПСИ, приведенных на рис. 4.5-4.7 следует что: максимальные значения температуры воды составляют при 0,05 м $57,5^{\circ}C$ и при 0,07 м $53^{\circ}C$ и приходится к 14³⁰ часам светового дня. 16 августа 2017 г. Максимальные значения удельной теплопроизводительности коллекторов рассматриваемого типа к моменту водозабора составляют $6,28 \text{ МДж/м}^2$ при $\delta_s = 0,05 \text{ м}$ и $8,79 \text{ МДж/м}^2$ при $\delta_s = 0,07 \text{ м}$. При этом КПД коллектора рассматриваемого типа составляет, соответственно: при толщине слоя воды в нем 0,05 м 27% и при 0,07 м - 33%.

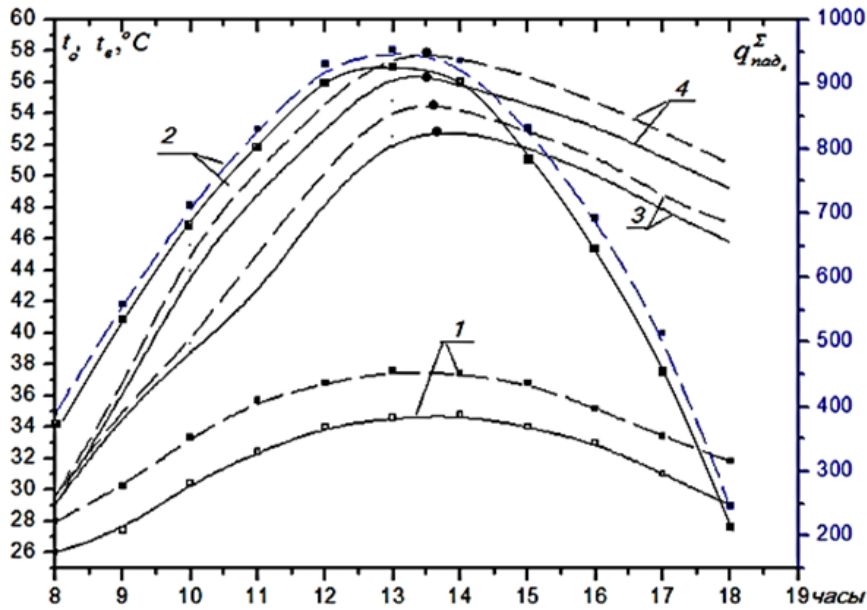


Рис. 4.6. Результаты однодневных сравнительных экспериментальных исследований опытного образца ПСВК с пленочным емкостным ПСИ со СП при толщине слоя воды в нем 0,05 и 0,07 м: 1- дневные ходы температуры окружающей среды (t_o); 2- дневные ходы суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над}^{\Sigma}$); 3- дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_e) при 0,07 м; 4 - дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_e) при 0,05 м за 17 июля (сплошной) и 15 августа (пунктирный) 2017 г.

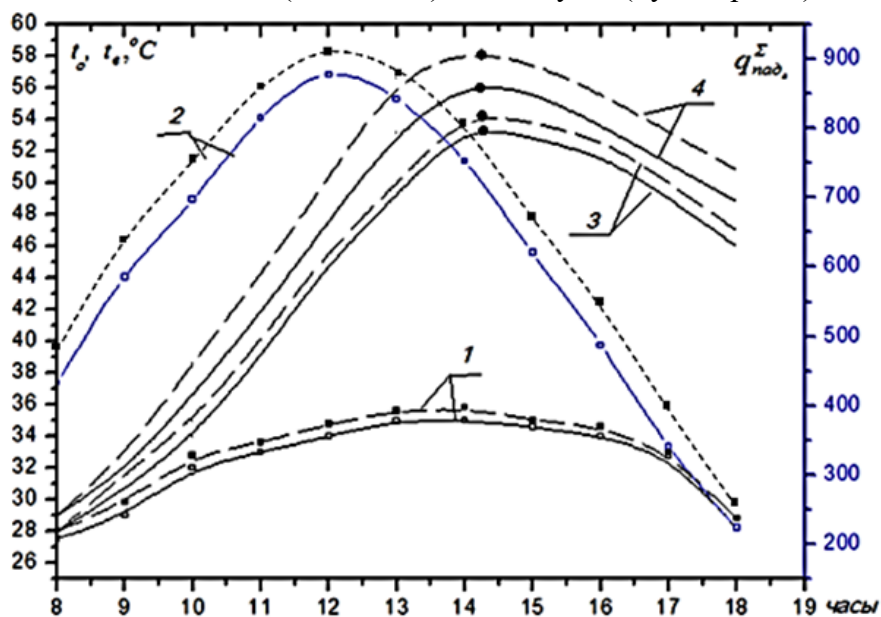


Рис. 4.7. Результаты однодневных сравнительных экспериментальных исследований опытного образца ПСВК с пленочным емкостным ПСИ со СП при толщине слоя воды в нем 0,05 и 0,07 м: 1- дневные ходы температуры окружающей среды (t_o); 2- дневные ходы суммарного СИ, падающего на поверхность коллектора ($q_{над}^{\Sigma}$); 3- дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_e) при 0,07 м; 4 - дневные ходы температуры воды в коллекторе (t_e) при 0,05 м за 18 июля (сплошной) и 16 августа (пунктирный).

§4.5. Сезонная теплопроизводительность и тепловая эффективность ПСВК с емкостным ПСИ, изготовленными из СП

Опытно-производственный образец ПСВК с емкостным ПСИ состоит из корпуса 1, выполненного из бетона в виде короба, на днище которого расположена емкость 4, выполненная из полимерного материала со светопрозрачной верхней частью 7, с входным 5 и выходным 6 патрубками; внутри боковых стенок и днища корпуса размещен слой теплоизоляционного материала 3, при этом корпус коллектора снабжен фронтальным светопрозрачным покрытием 2, а боковые и нижняя части емкости выполнены черными 8,9 (Рис.4.10.)[96, 97, 98, 99, 100, 104, 105, 106].

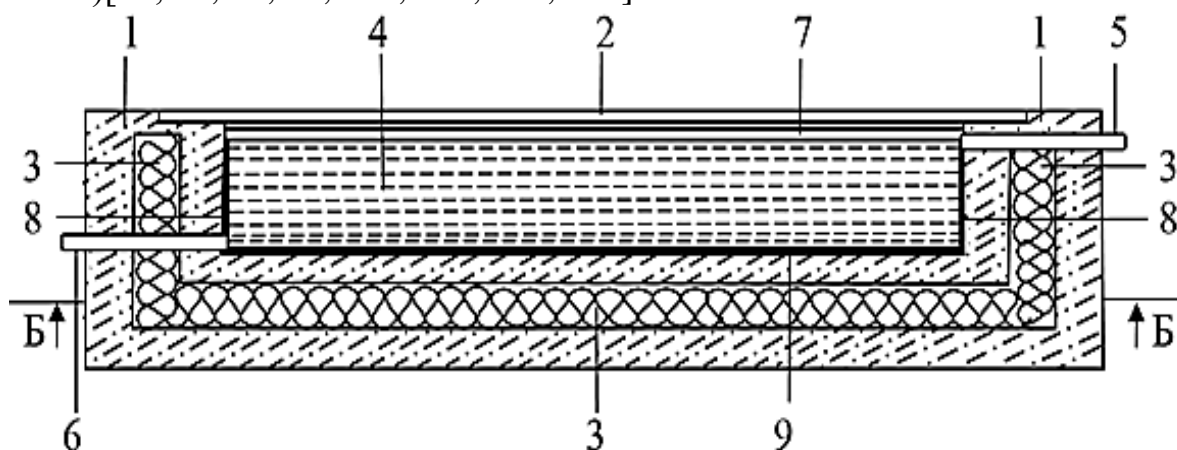


Рис. 4.8. Схематичный вертикальный разрез предлагаемого ПСВК с емкостным ПСИ.

Уменьшение тепловых потерь корпуса ПСВК достигается, во-первых, тем, что внутри боковых стенок и днища корпуса размещен слой теплоизоляционного материала. Внутренний теплоизоляционный слой уменьшает значение обобщенного коэффициента теплопроводности трехслойной стенки в сравнении с коэффициентом теплопроводности исходного материала. Чем меньше теплопроводность теплоизоляционного материала, тем меньше эффективная теплопроводность и, соответственно, меньше теплотери с поверхности стенки. Например, теплопроводность нормального бетона составляет $1,5-2,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, теплопроводность камышитовых плит $0,06-0,09 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ в зависимости от степени уплотнения. Усредненная разница в значениях теплопроводности ~ 20 . Во-вторых, тем, что корпус коллектора снабжен фронтальным СП и боковой теплоизоляцией, которые дополнительно уменьшают тепловые потери корпуса [107, 108, 109].

Для повышения эффективности нагрева воды в ПСВК боковые и нижняя части его емкого ПСИ выполнены из полимерного материала черного цвета. В этом случае лучистый поток СИ, проходящий через верхнюю светопрозрачную стенку емкости и слой воды, полностью поглотится черными боковыми и нижней частями емкости. Основная часть поглощенной энергии СИ затратится, в первую очередь, на нагрев воды, сосредоточенной в емкости. И лишь малая ее доля передастся теплопроводностью корпусу. Эффект преимущественного прогрева воды, а не корпуса, усиливается за счет естественной термогравитационной

конвекции, в результате которой боковые и нижняя части емкости непрерывно омываются нисходящими потоками холодной воды.

Таблица 4.1.

Результаты обобщения экспериментальных данных по определению температуры воды, суммы дневной теплопроизводительности и средневневной тепловой эффективности ПСВК с емкостными ПСИ в течение ясных и полужасных дней периода 2017 г. для $\delta_g = 0,05$ м.

№ п/п	Дата проведения эксперимента	состояние погоды	$Q_{пад_{9-15}}^{\Sigma}$, МДж/ ($м^2$ день)	\bar{g} , м/с	\bar{t}_{09-15} , $^{\circ}C$	\bar{t}_{69} , $^{\circ}C$	\bar{t}_{615} , $^{\circ}C$	$Q_{пад_{9-15}}^{\Sigma}$, МДж/ ($м^2$ день)	$\bar{\eta}_{9-15}$
1	15.05	Полужасный	17,65	3	20	21,2	30,4	1,99	0,11
2	17.05	Ясный	17,81	2,5	25,3	26,6	42,6	3,09	0,17
3	19.05	Ясный	17,93	2,5	25,4	26,8	46,4	3,15	0,18
4	23.05	Ясный	18,03	2,5	25,5	27,4	46,6	3,21	0,18
5	25.05	Ясный	19,89	2,5	26,2	29,4	48,4	3,24	0,16
6	02.06	Полужасный	20,06	2,3	21,4	22,4	28,6	3,60	0,18
7	04.06	Ясный	20,24	2,5	27,4	32,5	48,6	2,36	0,12
8	08.06	Ясный	20,34	2,3	30,5	34,4	54,6	3,69	0,18
9	10.06	Ясный	20,57	2,3	31,4	36,5	55,4	3,75	0,18
10	12.06	Ясный	20,29	2,3	36,5	37,6	56,4	3,78	0,19
11	03.07	Полужасный	20,36	2,2	20,1	23,4	30,5	4,16	0,20
12	07.07	Ясный	20,47	2,5	37,4	41,4	56,6	4,13	0,20
13	09.07	Ясный	23,03	2,2	38,5	42,5	57,2	4,07	0,18
14	13.07	Ясный	22,82	2,2	38,4	44,4	58,5	2,61	0,11
15	15.07	Ясный	18,89	2,2	38,6	46,6	57,4	3,98	0,21
16	04.08	Ясный	18,78	2,5	38,4	47,5	57,5	4,02	0,21
17	06.08	Ясный	17,25	2,5	38,2	47,2	57,4	3,97	0,23
18	08.08	Ясный	16,22	2,5	38	46,8	57,2	3,22	0,20
19	10.08	Ясный	16,18	2,5	37,8	46,2	57	2,92	0,18
20	10.08	Ясный	16,15	2,5	37,6	45,4	55,6	2,62	0,16
21	08.09	Ясный	16,05	3	37,4	45,2	53,4	2,46	0,15
22	10.09	Ясный	15,87	3	37,2	43,4	53,2	2,79	0,18
23	14.09	Ясный	15,65	3	37,1	42,6	52,1	2,77	0,18
24	16.09	Полужасный	15,3	3,2	21,5	41,4	32,4	1,37	0,09

Таблица 4.2.

Результаты обобщения экспериментальных данных по определению температуры воды, суммы дневной теплопроизводительности и средневневной тепловой эффективности ПСВК с емкостными ПСИ в течение ясных и полужасных дней периода 2017 г. для $\delta_g = 0,07$ м.

№ п/п	Дата проведения эксперимента	состояние погоды	$Q_{\text{над}_{9-15}}^{\Sigma}$, МДж/ (м ² день)	\bar{g} , м/с	\bar{t}_{09-15} , °C	\bar{t}_{θ_9} , °C	$\bar{t}_{\theta_{15}}$, °C	$Q_{\text{над}_{9-15}}^{\Sigma}$, МДж/ (м ² день)	$\bar{\eta}_{9-15}$
1	12.05	Ясный	17,65	2,5	25	26	40	3,53	0,20
2	14.05	Ясный	17,81	2,5	25,2	26,2	40,4	4,05	0,23
3	20.05	Ясный	17,93	2,5	25,5	26,5	41,5	3,96	0,22
4	22.05	Ясный	18,03	2,5	25,6	26,8	41,7	3,80	0,21
5	24.05	Полу ясный	19,89	3	19	20	26	3,54	0,18
6	01.06	Ясный	20,06	2,3	26	30	47,5	5,17	0,26
7	03.06	Ясный	20,24	2,3	27,5	31,5	43,4	5,14	0,25
8	07.06	Ясный	20,34	2,3	30	34,4	50,5	5,08	0,25
9	11.06	Ясный	20,57	2,5	33,2	35,2	51,2	4,99	0,24
10	19.06	Полу ясный	20,29	2,5	25,4	29,5	30,1	3,27	0,16
11	02.07	Ясный	20,36	2,2	36,5	39,1	53,4	4,95	0,24
12	06.07	Ясный	20,47	2,2	37,2	40,5	51,7	4,90	0,24
13	08.07	Ясный	19,03	2,2	38,2	42,5	52,5	4,84	0,25
14	12.07	Ясный	18,82	2,5	39,2	43,5	52,6	4,78	0,25
15	16.07	Полу ясный	18,89	2,5	30,4	35,5	35,4	4,18	0,22
16	03.08	Ясный	18,78	2,5	37,7	47,2	52,4	3,82	0,20
17	05.08	Ясный	16,22	2,5	38,2	47,1	52,1	3,64	0,22
18	07.08	Ясный	16,20	2,5	38,1	47	51,1	3,56	0,22
19	09.08	Ясный	16,18	2,5	37,7	46	50,9	3,25	0,20
20	09.08	Ясный	16,15	2,5	37,5	45,2	50,5	3,04	0,19
21	07.09	Ясный	16,05	3	36,5	44,3	48,5	2,85	0,18
22	09.09	Ясный	15,87	3	32,2	43,1	48,1	2,44	0,15
23	13.09	Ясный	15,65	3	30,1	42	48,2	2,36	0,15
24	15.09	Полу ясный	15,3	3,2	27,5	35,4	30,4	2,15	0,14

Экспериментальные исследования опытно-производственного образца ПСВК проводились в течение теплого периода 2008-2017 гг. на гелиоплощадке Гулистанского госуниверситета.

Методика и порядок проведения экспериментов аналогичны таковым у лабораторных образцов, результаты которых изложены в разделе 4.4.

Результаты обобщения экспериментальных данных по определению температуры воды, суммы дневной теплопроизводительности и средне-дневной тепловой эффективности ПСВК с емкостными ПСИ, в течение ясных и полужасных дней периода 2017 г. представлены в таблицах 4.1. для $\delta_g=0,05м$, 4.2. для $\delta_g=0,07 м$, 4.3. количество падающей солнечной энергии, количество полезной энергии, соответственно при $\delta_g=0,05м$ и $\delta_g=0,07 м$ за сезон, 4.4. количество получаемой за сезон горячей воды соответственно для $\delta_g=0,05 м$ и $\delta_g=0,07 м.$, таблицы 4.1, 4.2, 4.3 и 4.4.

Из анализа опытных данных, приведенных в табл. 4.1. и 4.2., как и ожидалось, при $\delta_g=0,07м$ температура воды в момент забора (15 ч. дня) в среднем $3\div4^{\circ}C$ ниже чем при $\delta_g=0,05м$, но тепловая эффективность при этом на $0,04\div0,06$ выше, чем при $\delta_g=0,05м$, что объясняется увеличением тепловых потерь коллектора с ростом температуры воды.

Таблица 4.3.

Дневная сумма падающего на поверхность коллектора солнечного излучения и количество полезно полученной энергии, при $\delta_g=0,05м$ и $\delta_g=0,07 м$, соответственно, за сезон.

Дата проведения эксперимента	Количество о дней	$Q_{пад_{9-15}}^{\Sigma}$, МДж/день	$Q_{пол_{9-15}}$, МДж/день		$\bar{\eta}_{9-15}$	
			0,05 м	0,07м	0,05 м	0,07м
05.2017	5	91,31	14,69	19,88	0,16	0,22
06.2017	5	101,51	17,19	23,39	0,17	0,23
07.2017	5	105,56	18,97	24,47	0,18	0,24
08.2017	5	84,53	16,75	26,27	0,20	0,31
09.2017	4	62,87	9,39	12,80	0,15	0,20
сезон	24	445,78	76,99	94,81	0,17	0,21

Как видно из табл. 4.3, за теплый период года полезно полученная энергия и тепловая эффективность ПСВК с емкостным ПСИ в зависимости от толщины слоя воды за сезон составляет 76,99 МДж и 0,17 при $\delta_g=0,05 м$ и 94,81 МДж и 0,24 при $\delta_g=0,07м$.

По табл. 4.4 следует, что общий объем теплой (или горячей) воды полученной из коллектора за сезон (V-IX месяцы года) составляет 29250 л при $\delta_g=0,05 м$, и при температурах воды в момент забора (14ч 50м÷15ч 10м) в среднем за сезон - $42\div55^{\circ}C$, и 40950 л при $\delta_g=0,07м$ с температурой в среднем $40\div50^{\circ}C$.

Таблица 4.4.

Количество полезно полученной за сезон горячей воды при $\delta_g = 0,05$ м и $\delta_g = 0,07$ м, соответственно, за сезон.

Месяцы	Число дней работы коллектора	Объем воды в коллекторе, (V) л	$t_g, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{пол},-15},$
				МДж/мес
$\delta_g = 0,05\text{ м}$				
Май	18	4500	42÷ 43	312,13
Июнь	19	4750	50÷ 53	565,34
Июль	27	6750	53÷55	759,90
Август	29	7250	53÷55	1065,75
Сентябрь	24	6000	47÷48	334,55
Сезон	117	29250		3119,31
$\delta_g = 0,07\text{ м}$				
май	18	6300	40 ÷	327,95
июнь	19	6650	47 ÷	664,08
Июль	27	9450	49 ÷	949,57
Август	29	10150	46 ÷	1248,50
Сентябрь	24	8400	41 ÷	370,51
За сезон	117	40950		3650,23

Из анализа табл. 4.3 и 4.4 следует, что при $\delta_g = 0,07\text{ м}$ температура воды в момент забора (14ч50м÷15ч10м) в среднем $2\div 5^\circ\text{C}$ ниже, чем при $\delta_g = 0,05$ м, но тепловая эффективность при этом на 0,07 выше, чем при $\delta_g = 0,05$ м, что объясняется увеличением тепловых потерь ПСВК с емкостным ПСИ с ростом температуры воды.

Из основе данных табл. 4.3. и 4.4. определяем ожидаемые технико-экономические показатели рассматриваемого коллектора. Количество сэкономленного условного топлива от использования коллектора рассматриваемого типа, определенное из [91, 102, 103, 110]

$$G_{\text{у.т.}}^{\text{уд}} = \frac{Q_{\text{пол}}^{\text{сезон}}}{\eta_{\text{тр}} \cdot q_{\text{у.т.}}} \quad (4.8)$$

при эффективности использования маломощных традиционных теплоисточников ($\eta_{\text{тр}}$) 0,5, теплотворной способности условного топлива ($q_{\text{у.т.}}$) 29,3076 ГДж/т.у.т. при $\delta_g = 0,05\text{ м}$ составляет 41,46 кг у.т./м²·сезон и при $\delta_g = 0,07\text{ м}$ составляет 48,6 кг у.т./м²·сезон.

На рис.4.11 представлен общий вид емкостного солнечного коллектора, изготовленного из местных строительных материалов:

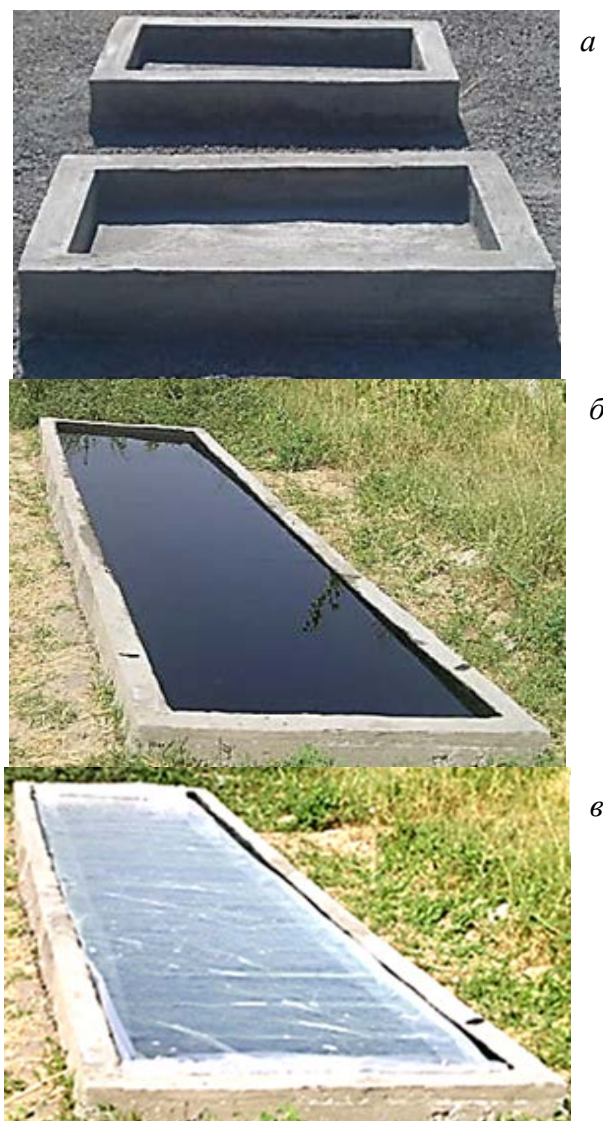


Рис.4.11. Общий вид емкостного солнечного коллектора, изготовленного из местных строительных материалов: *а* – ПСВК с $0,84 \text{ м}^2$, *б* – ПСВК с 5 м^2 без СПП, *в* – ПСВК с 5 м^2 с СПП

В главе приложены результаты разработанных и созданных опытных (лабораторных) и опытно-производственных образцов ПСВК с емкими ПСИ с донным поглощением СИ. На основе результатов экспериментальных исследований в натуральных условиях установлена адекватность расчетных и экспериментальных исследований по определению дневных ходов температуры горячей воды, нагреваемой в коллекторах, их удельная теплопроизводительность и тепловая эффективность ПСВК рассматриваемого типа. Установлена зависимость количества испаренной влаги из открытой поверхности коллектора от температуры воды в нем, а также температуры и относительной влажности воздуха окружающей среды и обобщения результатов экспериментальных исследований в натуральных условиях установлены число возможных дней работы коллекторов рассматриваемого типа по месяцам теплого сезона (май-сентябрь месяцы) года, температуры получаемой из них горячей воды при значениях толщины слоя воды в них $0,05 \text{ м}$ и $0,07 \text{ м}$.

Установлено, что при прочих равных условиях, температура горячей воды в момент забора (14ч 50м÷15ч 10м) при ее толщине 0,07 м в среднем на 3-4°С ниже, чем при толщине 0,05 м., также становлено, что число дней работы опытно-производственного образца ПСВК рассматриваемого типа, при температурах получаемой горячей воды выше 42°С в течение года составляет 117 дней, а объем горячей воды за сезон, при толщине слоя нагреваемой воды в них 0,05 м и 0,07 м., составляет, соответственно, 29,25 м³ и 40,95 м³.

Средняя цена традиционных солнечных коллекторов, производимых на сегодня, составляет 300-500\$ долларов, в то время как средняя цена плоских солнечных водонагревателей с прозрачным пластиковым покрытием, с донным поглощением солнечного излучения в 10 раз дешевле традиционных коллекторов, это обстоятельство также необходимо учитывать при использовании описанных плоских солнечных панелей.

Проведенные экспериментальные исследования по определению технико-экономических показателей ПСВК с СП, которая имеет площадь поверхности 5 м² показывают, что для создания такого вида коллектора необходимо 0,44 м³ бетона, стоимость которого в настоящее время на рынки Узбекистана составляет около 30 долларов США за 1 м³. В свою очередь, для одного ПСВК с СП с площадью 5 м² расходуется 20 долларов США с учетом тепловой изоляции и без трудовых затрат.

Средняя удельная теплопроизводительность рассматриваемого коллектора с общей площадью 5 м² составляет 71,4 МДж в день или 8353,8 МДж за сезон. Количество сэкономленного условного топлива от использования коллектора рассматриваемого типа составляет 570 кг у.т. в сезон.

При этом, удельная экономия природного газа и Ангреноского угля составляет 488 Нм³ и 910 кг за сезон, соответственно. Уменьшение выбросов СО₂ в течение сезона при сжигании природного газа составляет 667 кг и Ангреноского угля (в зависимости от процентного содержания углерода в составе угля) от 3148 до 4814 кг СО₂, соответственно. Если цена 1 Нм³ газ 50 центов, то цена сэкономленного 488 Нм³ газа составляет 23 доллара США.

Таким образом, в зависимости от изменения цен на стоимость строительства коллектора, срок покрытия (период покрытия) расходов составляет один сезон.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фортов В.Е., Попель О.С. Энергетика в современном мире. - Долгопрудный: Интеллект, 2011. - 168 с.
2. «Solar Heat Worldwide. Global Market Development and Trends in 2020. Detailed Market Figures 2019». IEA Solar Heating & Cooling Programme, May 2021. – 92 p.
3. Постановление Президента Республики Узбекистан «Об ускоренных мерах по повышению энергоэффективности отраслей экономики и социальной сферы, внедрению энергосберегающих технологий и развитию возобновляемых источников энергии», № ПП-4422 от 22.08.2019 г. – Интернет источник: <https://lex.uz/docs/4486127>
4. Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 от 7 февраля 2017 г. «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан».
5. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения. — Москва: Энергоиздат, 1982. — 80 с.
6. http://solar-rnd.ru/stati/st_03.html
7. Попель О.С. и др. Сравнительный анализ показателей конструкций солнечных коллекторов зарубежных и отечественных производителей и разработка новых технических решений// Тепло-энергетика, №3/2006. Источник: <https://www.c-o-k.ru/articles/solnechnye-kollektory-s-plastikovymi-absorberami>
8. Фрид С.Е., Лисицкая Н.В. Современные солнечные коллекторы: типичные параметры и тенденции их изменения // Гелиотехника. 2018. №2. -С.27-37.
1. Абуев И.М., Мышко Ю.Л., Смирнов С.И. и др. О теплотехническом уровне солнечных коллекторов и перспективах его повышения в СССР // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1989. №4, -С. 8-9.
2. Kalogirou S.A. Solar thermal collectors and applications // Elsevier B. V. Progress in Energy and Combustion Science. 2004. v. 30. №3. pp. 231-295.
3. Amrutkar S.K., Ghodke S., Patil K.N. Solar Flat Plate Collector Analysis // IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN). 2012. v. 2. №2. pp. 207-213.
4. Петухов В.Б. Солнечные водонагреватели. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. –Москва. 1946, -20 с.
5. Петухов Б.В. Метод расчета солнечных водонагревателей/ Использование солнечной энергии. Сб. №1.- М.: Изд. АН СССР.1957, – С.177-201.
6. Смирнов С.И. Конструкции солнечных коллекторов / Системы солнечного тепло – и хладоснабжения. Под. ред. Э.В. Сарнацкого и С.А.Чистовича. -М.: Стройиздат. 1990, -С. 56-82.
7. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. –М.: Энергоатомиздат. 1991, -208 с.
8. Байбутаев К.Б. Сравнительные испытания различных систем солнечных водонагревателей. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. -Москва. 1955. -16 с.

9. Авезова Н.Р. Моделирование процессов теплового преобразования солнечной энергии в плоских коллекторах и оптимизация их основных параметров для использования в системах горячего водоснабжения. Автореф. дис. ... док. тех. наук. -Ташкент. -2018.-63с.
10. Жамалов А. Исследование теплотехнических и энергетических характеристик солнечных водонагревателей плоско-рифленным приемником. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. –Ташкент, 1971. -32 с.
11. Саатов Ф. Исследование и разработка приемников солнечных водонагревательных установок. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. –Ашхабад, 1978. -19 с.
12. Хожиев К.Б. Повышение эффективности солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. –Ташкент, 1993. -21 с.
13. Расаходжаев Б.С. Разработка водонагревательных установок на основе грунтовых солнечных коллекторов и исследование их эксплуатационных характеристик. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. –Ташкент. 2011. -25 с.
14. Койшиева Т.К. Неустановившиеся тепло-гидравлические процессы в системах солнечного горячего водоснабжения с плоскими коллекторами. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. –Т. 1996. -19 с.
15. Баадж А.К. Оптимизация параметров абсорбционных солнечных коллекторов с цилиндрическими емкими теплоприемниками в системах горячего водоснабжения в условиях Сирийской Арабской Республики. Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Ташкент. -1995. -22 с.
16. Авезова Н.Р. Исследование абсорбционных солнечных коллекторов с ёмкими приемниками полуцилиндрической формы. Автореф. дис. ...канд. тех. наук. Ташкент. - 2004. -29 с.
17. Касимов Ф.Ш. Экспериментальное исследование температурного режима воды в лотковых солнечных коллекторах//Гелиотехника.2008.№2.-С.107-108.
18. Шарафи А.Ш. Солнечный змеевиковый водо-водонагреватель (СЗВВ)/ Исследования по использованию солнечной энергии. Вып. №1. –Т.: Изд. АН РУз. 1963, -С.94-99.
19. Шарафи А.Ш. Солнечный змеевиковый водо-водонагреватель для душевых// Гелиотехника. 1965. №.1. -С. 55-56.
20. Какабаев А., Голаев М., Хандурдыев А. Солнечный водонагреватель. Авторское свидетельство СССР: №295900 от 12.11.1971.//Бюллетень. Комитет по делам изобретений и открытий при Совете Министров СССР. №8. 1971.
21. Garg Н.Р. Year round performance studies on a built in storage type solar water heater at Jodhpur, India // Solar Energy. 1975. V. 17. P. 167-172
22. Рекомендации по внедрению солнечных водонагревательных установок в сельское хозяйство. НПО «Солнце» АН Туркменистана. Ашхабад. 1983. -63с.
23. Байрамов Р.Б., Ушакова А.Д. Солнечные водонагревательные установки. Ашхабад: Ылым. 1987. -157 с.

24. Ходжиев А.И. Разработка и внедрение солнечных коллекторов. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ашхабад: 1984. -19 с.
25. Андерсон Б. Солнечная энергия (Основы строительного проектирования) М.: Стройиздат. 1982. -375 с.
26. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии: М.: Энергоиздат. 1990. -392 с.
27. Бойбутаев К., Муродов Ж., Усмонов Ю. Қуёш энергиясидан халқ хўжалигида фойдаланиш. Тошкент: Ўзбекистан «Билим» жамияти. 1964.-43б.
28. Мухитдинов М.М., Эргашев С.Ф., Исакулов Ж. Бытовой солнечный водонагреватель. //Гелиотехника. 1997. №4. С. 80-82.
29. Авезов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. Ташкент: ФАН. 1988. - 288 с.
30. Авезов Р.Р., Авезова Н.Р. Динамика накопления тепла и эффективности преобразования солнечной энергии в плоских солнечных коллекторах с емкими теплоприемниками. 1. Методы расчета. // Гелиотехника. 1997. №3. С. 69-77.
31. Ощепков М.Ю, Фрид С.Е. Термическая стратификация в баках-аккумуляторах солнечных водонагревателей аккумуляционного типа //Гелиотехника. 2015. №1. -С.83-92.
32. Ощепков М.Ю, Фрид С. Е., Колобаев М.А. Стратификация в солнечном баке-аккумуляторе при быстром вытеснение горячей воды// Гелиотехника. 2015. №3. -С.22-29.
33. Фрид С.Е., Колобаев М.А., Ощепков М.Ю. Моделирование солнечного водонагревателя аккумуляционного типа //Гелиотехника 2015.№4. С. 38-45
34. Ощепков М.Ю, Фрид С. Е. Моделирование конвективного теплосъема в стратифицированном баке аккумуляционной солнечной водонагревательной установки со встроенным теплообменником// Гелиотехника 2016.№1.С.45-52.
35. Даффи Дж., Бекман У. Основы солнечной теплоэнергетики. Пер. с англ. - Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект». 2013. 888 с.
36. Касимов Ф.Ш., Самиев К.А., Ахатов Ж.С., Бабаев С.С. //Математическое моделирование рабочего режима плоского солнечного коллектора с емким теплоприемником. // Вестник Ташкентского университета информационных технологий (ТУИТ). 2009. №1. С. 66-70.
37. Мартыненко О.Г., Соковишин Ю.А. Свободно - конвективный теплообмен. Справочник. – Минск: «Наука и техника». 1982. – 400 с.
38. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сухомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия. 1975. 488 с.
39. Hollands K.G. T. Directional Celectivity, Emitance and Absorptance Properties of V ee Corrugated Specular Surface//Solar Energy. 1963. Vol. 13. N 7. P 108-116.
40. Авезов Р.Р., Авезова Н.Р., Вохидов А.У., Рахимов Э.Ю., Усмонов Н.О. Влияние внешних метеорологических факторов на коэффициент тепловых потерь лучепоглощающих теплообменных панелей плоских солнечных водонагревательных коллекторов через светопрозрачные покрытия их корпусов// Гелиотехника 2018. № 3. с. 42-51.

41. Sparrow E.M., Ramsey J.M., Mass E.A. Effect of Finite Width on Heat Transfer and Fluid Flow about an Inclined Rectangular Plate // Trans. ASMEJ. Heat Transfer. 1979, V. 101. p.2.
42. Churchill S.W., Chu H.H.S. Correlation Equations for Laminar and Turbulent Free Convection from a Vertical Plate // ИЖМТ, 1975. V.18. № 11.p.p.1323-1329.
43. Ким В.Д., Дусяров А.С., Ким В.В. Определение коэффициента конвективной теплоотдачи на внешних поверхностях гелиоустановок. // Гелиотехника 2004. № 2. С. 27-30.
44. Гуревич А.М., Позин Г.М., Рекант Н.Б. Определение коэффициента поглощения инфракрасного излучения для полупрозрачных материалов. // Гелиотехника. 1970. №3.С. 49-54.
45. Al-Arabi M., El-Riedy M.K. Natural convection heat transfer from isothermal horizontal plates of different shapes. –ИЖМТ, 1976, v. 19, No. 12, p. 1399-1404.
46. Lloyd J.R., Moran W.R. Natural convection adjacent to horizontal surface of various planforms. –Trans. ASME, 1974, v. 96C, N 4, p. 443-447.
47. Аvezов Р.Р., Касимов Ф.Ш. Коэффициент тепловой эффективности лотковых солнечных водонагревательных коллекторов с донным поглощением солнечного излучения. // Мукобил энергия манбалари ва улардан фойдаланишнинг долзарб муаммолари Республика илмий-техник анжумани материаллари. БухДУ. Бухоро 25-26 ноябрь 2015г. стр 158-159.
48. Симон А. Потери энергии за счет поглощения и отражения в гелиостате и параболическом отражателе солнечной печи. В кн. Солнечные высокотемпературные печи. М.: Изд-во иностранной литературы. С. 264-271.
49. Аvezов Р.Р., Дусяров А.С. Расчет теплозащитного эффекта применения шарнирно-трансформируемого рефлектора для дополнительной теплоизоляции поверхности светопроема ночью. // Гелиотехника. 2004. №3. С. 12-16.
50. Абдурахманов А.А., Аvezова Н.Р., Аvezов Р.Р. и др. Оптические потери зеркально-концентрирующих систем солнечных установок с лицевым прозрачным защитным покрытием и тыльным металлическим отражающим слоем // Гелиотехника. 2006. №4. С. 38-44.
51. Otanicar Todd P., Phelan Patrick E., Golden Jay S. Optical properties of liquids for direct absorption Solar thermal energy systems// Solar Energy. 2009. v.83. №7. pp. 969-977.
52. Drotning W.D. Optical properties of solar absorbing oxide particles suspended in a molten salt heat transfer fluid// Solar Energy 1978.v.20. №4. pp. 313-319.
53. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамика жидкости: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.
54. Дьяконов В.П., Абраменкова И.В. Mathcad 7 в математике, физике и в Internet. – М.: Нолидж, 1999. 352с.
55. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Высшая школа. 1971. 460 с.

56. Кириллин В.А., Сычев В.В., Шейндлин А.Е. Техническая термодинамика. М.: Энергоатомиздат. 1983. 416 с.
57. Лыков А.В., Ауэрман Л.Я. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности. М.: Пищепромиздат. 1946. 288 с.
58. Нестеренко А.В. Экспериментальное исследование тепло- и массообмена при испарении жидкости со свободной поверхности. // ЖТФ. 1954. Т. 24. №4. С. 729-741.
59. Ладыженский Р.М. Кондиционирование воздуха. М.: Пищепромиздат. 1962. 352 с.
60. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сухомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия. 1975. 488 с.
61. Богословский В.Н., Булкин С.Г. Конструирование и расчет тепловых систем солнечных энергоактивных зданий.// Энергоактивные здания. М.: Стройиздат. 1988. С. 147-173.
62. Авезов Р.Р., Касимов Ф.Ш. Тепловые потери емких лотковых солнечных коллекторов с открытой поверхностью испарения// Гелиотехника. 2008. №4. - С. 36-42.
63. Шкловер А.М. Основы строительной теплотехники жилых и общественных зданий. М.: Госстройиздат. 1956. 350 с.
64. Тихомиров В.К. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. М.: Стройиздат. 1981. 272 с.
65. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1961. 738 с.
66. Миссенар А. Лучистое отопление и охлаждение. М.: Госстройиздат. 1961. 300 с.
67. Факторович Л.М. Краткий справочник по тепловой изоляции. Л.: Гостехиздат. 1962. 451 с.
68. Авезова Н.Р., Касимов Ф.Ш., Ниязов Ш.К. Экспериментальное исследование теплопроизводительности и тепловой эффективности солнечных абсорбционных емких водонагревательных коллекторов, изготовленных из местных материалов// Гелиотехника. 2010. №4. С.25-28.
69. Султонов С.К. Разработка и исследование солнечных водонагревательных установок из альтернативных материалов. Автореф. дис. к.т.н. –Ош, 2003,20с.
70. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1-6. Вып.19. Узбекский ССР. Книга I. –Л.: Гидрометеиздат. 1989. 280 с.
71. Авезова Н.Р., Авезов Р.Р., Рузиев О.С., Вохидов А.У., Сулайманов Ш.И. Ресурсные показатели плоских солнечных водонагревательных коллекторов в системах горячего водоснабжения. Часть 2. Исходные данные для расчетов (внешние факторы)// Гелиотехника.2013.№2.-С.18-27.
72. Solar Collector Testing Programme/ Commission of the European Communities. Luxemburg. 1982. P. 1-17.

73. Gillett W. B. The equivalence of outdoor and mixed indoor / outdoor solar collectors testing // Solar Energy. 1980. V. 25. №6. P.543-548.
74. Hill J.E., Streed E.R. A method of testing for rating solar collectors based on thermal performance // Solar Energy. 1976. V. 18. №5.3. 421-429.
75. ASRAE standart 93-77. Method of testing solar collectors based on thermal performance. New York, American. Of Heating Refrigerating and Air-Conditions Engineers. 1977. 65 p.
76. AFNOR p 50 501. Capters solaries. Measure des performances thermiques. Paris. L Association de Normalisation. 1977. 59 p.
77. Фрид С. Е. Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов // Препринт № 3-248 ИВТАН. М., 1988.-57с.
78. Коллекторы солнечные. Общие технические условия ГОСТ 28310-89. М.: Госкомитет по управлению качеством продукции и стандартам. –17 с.
79. Қуёшли иссиқ сув таъминоти қурилмалари ҚМҚ 204.16-96. Ўзбекистон Республикаси Давлат архитектура ва қурилиш қумитаси. Тошкент.1996.-31б.
80. Стандарт Республики Узбекистан. РСТ Уз 744-96. Коллекторы солнечные. Общие технические условия. Ташкент. Госкомархитектстрой РУз. -49 с.
81. Osório T., Carvalho M.J. Testing of solar thermal collectors under transient conditions // SHC 2012. Energy Procedia. 2012. V. 30.–pp. 1344 – 1353.
82. Klein S.A. Calculation of flat-plate collector loss coefficients. Journal of Solar Energy. 1975. V. 17. № 1. – pp. 79-80
83. Аvezов Р.Р., Ким К.М., Умаров Г.Я., Джамалов А. Эффективность солнечной энергии в топливно-энергетическом балансе // Гелиотехника. 1970. №6. С-60-64.
84. Гребер Г., Эрг С., Григулл У. Основы учения о теплообмене. М.: ИИЛ. 1958. -560 с.
85. Avezova N.R., Avezov R.R. Dependence of the coefficient of environmental thermal losses of radiation-absorbing thermal exchange panels of flat solar collectors for heating heat-transfer fluid from their average operating and ambient temperatures // Applied Solar Energy. – USA. 2015. – Vol.51, №1. – pp.10-14 (05.00.00; №4).
86. Константиновский Ю.А., Заваров А.И., Рабинович М.Д. Ферт А.Р. Исследование солнечной энергии для теплоснабжения зданий. Киев: Будівельнік. 1985. – 104 с.
87. Мак Адамс В.Х. Теплопередача. М.: Металлургиздат. 1961. -696 с.
88. Тарнижевский Б.В. Оценка эффективности применения солнечного отопления в России// Возобновляемая энергетика. Ежеквартальный информационный бюллетень. Интерсоларцентр. 1997. №1. С. 48-51.
89. Р.Р.Аvezов, Ф.Ш.Касимов, Ш.К.Ниязов. Патент на полезную модель «Емкостной солнечный водонагревательный коллектор» № FAP 01185, зарегистрированный в Государственном реестре полезных моделей Республики Узбекистан в г. Ташкенте 22.02.2017г.

90. А.И. Исманжанов, Б.С.Расаходжаев. Исследование температурного поля грунта в грунтовом солнечном водонагревательном коллекторе // Гелиотехника. 2011. №2. С. 56-58.
91. Avezova N.R., Avezov R.R., Ruziev O.S., Suleimanov Sh.I., Vakhidov A. Longevity Characteristics of Flat Solar Water-Heating Collectors in Hot-Water-Supply Systems. Part 1. Procedure for Calculating Collector Heating Efficiency // Applied Solar Energy, 2013, Vol. 49, №1, pp. 7-15. (05.00.00; №4. Springer, IF: 0.81).
92. Avezova N.R., Avezov R.R., Suleimanov Sh.I., Vakhidov A.U. Resource indexes of flat solar water-heating collectors in hot-water-supply systems: Part 3. Source data for calculations that depend on the weight, size, and heat engineering characteristics of the collector and the optic properties of the translucent collector coating. // Applied Solar Energy. – USA. 2013. - Vol. 49, №3. – pp. 128-136. (05.00.00; №4. Springer, IF: 0.81).
93. Avezova N.R., Avezov R.R., Rustamov N.T., Suleimanov Sh.I., Vakhidov A.U. Resource indexes of flat solar water-heating collectors in hot-water supply systems: 4. Specific collector thermal yield and efficiency. // Applied Solar Energy. – USA. 2013. - Vol. 49, №4. – pp. 202–210. (05.00.00; №4. Springer, IF: 0.81).
94. Богатырева В. В. Альтернативные топливно-энергетические ресурсы: экономико-управленческие аспекты использования в условиях инновационного развития общества. Новополюк: ПГУ, 2017. - 323 с.
95. Клычев Ш.И., Исманжанов А.И., Бахрамов С.А., Захидов Р.А., Самиев М. Динамика суточных температур в солнечных «горячих ящиках» // Гелиотехника, -Ташкент, 2007. -№1. –С.29-31.
96. Аvezov Р.Р., Аvezova Н.Р., Самиев К.А. Коэффициент пропускания светопрозрачной изоляции плоских гелиоустановок диффузной солнечной радиации. // Гелиотехника, -Ташкент., 2007. -№1. –С.62-65.
97. Стребков Д. С., Сагинов Л. Д. Возобновляемые источники энергии в ВИЭСХ - история и перспективы: К 85-летию института. Вестн. ВИЭСХ. 2015, -№1, -С. 6-11.
98. Klein S.A. Calculation of flat-plate collector loss coefficients. Journal of Solar Energy. 1975. V. 17. № 1. – pp. 79-80.
99. 10. Luo B., Hu Zh., Hong X., He W. Experimental study of the water heating performance of a novel tile shaped dual-function solar collector // Energy Procedia. 2015. V. 70. – pp. 87 – 94.
100. Wang N., Zeng Sh., Zhou M., et al. Numerical study of flat plate solar collector with novel heat collecting components // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2015. V. 69. pp. 18–22.
101. Zambolin E., Del Col D. Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions // Solar Energy. 2010. V. 84. pp. 1382–1396.
102. Суслов К. В., Уколова Ев. В., Уколова Ек. В. Экономика и возобновляемые источники энергии. Проблемы освоения минеральной базы Восточной Сибири: Сборник научных трудов. Вып.15.Иркутск. 2015, с.94-98.

103. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей (Том 1): Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. 504с.
104. Solodov A., Ochkov V. Differential Models. An Introduction with Mathcad: © Springer Berlin Heidelberg 2005. Germany. P.
105. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи: Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 512с.
106. Versteeg Н.К., Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics. The finite volume method: © Longman Group Ltd 1995. England. P.257.
107. Юдаев Б.Н. Теплопередача: – М.: Высшая школа, 1973. 360с.
108. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена: – М.: Наука, 1984. 288с.

Для заметок

Для заметок

Для заметок

**Раббанакул Рахманович Авезов,
Шовки Кулаганович Ниязов,
Фахриддин Шадманкулович Касимов,
Акмал Улашевич Вохидов,
Эргашали Юлдашбаевич Рахимов**

СОЛНЕЧНЫЕ ВОДОНАГРЕВАТЕЛИ ЕМКОСТНЫЕ

МОНОГРАФИЯ

Редактор – Мохира ЮЛДАШЕВА
Техник редактор – Бахтиёр ЯКУБОВ
Компьютерная верстка – Шохида МУКУМОВА

Подписано в печать 02.11.2022.

Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. -7. 0. Уч. Изд. л. -7,0.

Тираж 100 экз. Заказ № 455

Издательство “Зиё”,
120100, г. Гулистан. ул. Узбекистан-8.
Тел.: +998-67-227-63-09

Отпечатано в типографии ООО “Sirdaryo Print”.
г. Сырдарья, Узбекистан-92.



Раббанакул Рахманович Авезов

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник.

Область научной деятельности: «Теоретические основы теплотехники», «Возобновляемые источники энергии» и «Тепловое приобразование и использование солнечной энергии».

Автор свыше 400 научных публикаций, 6 монографий, более 10 патентов на изобретение и полезную модель, а также 5 свидетельств на программный продукт для ЭВМ.



Шавкиддин Кулаганович Ниязов

кандидат технических наук, доцент кафедры физики Гулистанского государственного университета.

Область научной деятельности: «Возобновляемые источники энергии» и «Тепловое приобразование и использование солнечной энергии».

Автор свыше 215 научных публикаций, 2 монографий, 12 учебных пособий, 4 патента на полезную модель и 5 свидетельств на программный продукт для ЭВМ.



Фахриддин Шадманкулович Касимов

доктор философии (PhD) по техническим наукам, старший научный сотрудник лаборатории «Солнечные тепловые и энергетические установки» Физико-технического института АН РУз.

Область научной деятельности: «Возобновляемые источники энергии» и «Тепловое приобразование и использование солнечной энергии».

Автор свыше 50 научных публикаций, 2 патента на полезную модель и 2 свидетельств на программный продукт для ЭВМ.



Акмал Улашевич Вохидов

доктор философии (PhD) по техническим наукам, старший научный сотрудник лаборатории «Солнечные тепловые и энергетические установки» Физико-технического института АН РУз.

Область научной деятельности: «Возобновляемые источники энергии» и «Тепловое приобразование и использование солнечной энергии».

Автор свыше 40 научных публикаций, 2 монографий, 2 государственных стандартов, 7 патента на полезную модель и 1 свидетельств на программный продукт для ЭВМ.



Эргашали Юлдашбаевич Рахимов

доктор философии (PhD) по техническим наукам, старший научный сотрудник лаборатории Солнечные тепловые и энергетические установки Физика технического института АН РУз.

Область научной деятельности: «Возобновляемые источники энергии» и «Тепловое приобразование и использование солнечной энергии».

Автор свыше 50 научных публикаций, 2 патента на полезную модель и 4 свидетельств на программный продукт для ЭВМ.

ISBN 978-9943-8679-7-0



9 789943 867970