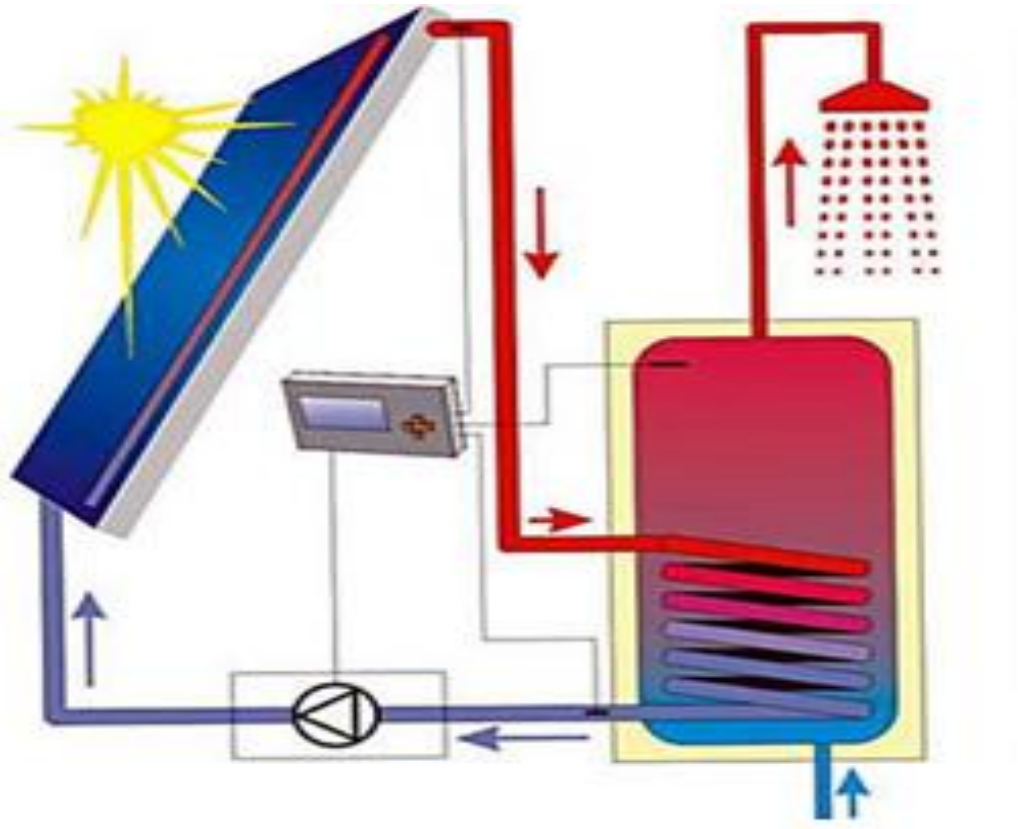
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН

БУХАРСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНСТИТУТ

Қ.Б.ХОЖИЕВ, А.К.ХОЖИЕВ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ПЛАСТМАССОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ



БУХАРА- 2021

UDC: 662.997:621.47
BCC: 31.261.5(Uzb)
35.710
K.B. Khojiev, A.K. Khojiev
Increasing the efficiency of solar collectors with plastic elements
T.: "BUXORO NASHR" Publishing house, 2021, 124 p.

Reviewers:
- candidate of technical Sciences, associate professor N.O. Ataullaev
- candidate of technical sciences, associate professor B.Kh. Shaimatov

In this monograph, the main trends in the development of solar heating water collectors are studied. A classification of the recipients of heating of such collectors is given and a suggestion is made on the variety of polymeric materials that are used to create these collectors, as well as taking into account the temperature distribution of the clamps of the heating recipients, a mathematical expression is proposed to calculate the thermal efficiency.

The monograph is recommended for researchers, specialists, power engineers, teachers, doctoral students and undergraduates of higher educational institutions.

Recommended for publication based on the decision of the Council of Bukhara Engineering-Technological Institute (Protocol No. 3 dated 22.09.2021)

ISBN 978- 9943- 7540- 2-7 **© "BUXORO NASHR" Publishing house, 2021.**

УДК: 662.997:621.47
КБК: 31.261.5(Узб)
35.710

Қ.Б.Ҳожиев, А.К.Хожиев

Повышение эффективности солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами

Т.: Издательство «BUXORO NASHR», 2021,124с

Рецензенты:
- кандидат технических наук, доцент Н.О. Атауллаев
- кандидат технических наук, доцент Б.Х. Шайматов

В этой монографии изучены основные тенденции развития солнечных коллекторов обогревающие воды. Приведено классификация получателей нагрева таких коллекторов и предоставлено предложение по разновидности полимерных материалов, которые используется для создание этих коллекторов, а также с учетом распределения температуры зажимах получателей нагрева, для вычисления термической эффективности предложено математических выражение.

Монография рекомендуется для научных работников, специалистов, энергетиков, преподавателей, докторантов и магистрантов высших учебных заведений.

Рекомендовано в печать на основании решения Совета Бухарского инженерно-технологического института (протокол №3 от 22.09.2021 г.)

ISBN 978- 9943- 7540- 2-7 **© Изд-во «BUXORO NASHR», 2021.**

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ 6

ВВЕДЕНИЕ 8

ГЛАВА I. СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ С ПЛАСТМАССОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ 14

1.1.Анализ конструктивных решений солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами 14

1.2.Выбор пластмассовых материалов для изготовления солнечных коллекторов и их элементов 22

1.3.Состояние научных исследований по расчету солнечных коллекторов 31

ГЛАВА II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗБОРНОГО ЛИСТОТРУБНОГО ТЕПЛОПРИЁМНИКА С ПЛАСТМАССОВЫМ ТЕПЛООТВОДЯЩИМ КАНАЛОМ 40

2.1.Распределение температуры по ширите фиксирующих элементов лучепоглощающей пластины 41

2.2.Корректировка обобщенной зависимости для термической эффективности разборных листотрубных теплоприёмников 46

2.3.Оценка снижения эффективности в элементах тразборных листотрубных теплоприёмников 51

2.4.Определение снижения температуры в элементах разборного листотрубного теплоприёмника 60

2.5.Оптимизация межтрубного расстояния листотрубного теплоприёмника с пластмассовыми теплоотводящими каналами 71
2.6.Оптимизация расхода теплоносителя в пластмассовых теплоприёмниках солнечных коллекторов 75
ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ПЛАСТМАССОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ 81
3.1.Методика проведения и обработки результатов опытов 82
3.2.Результаты экспериментальных исследований 85
3.2.1.Солнечный коллектор с разборным листотрубным теплоприёмником со стальной лучепоглощающей пластиной и пластмассовыми теплоотводящими каналами 85
3.2.2.Солнечный коллектор с теплоприёмником, изготовленным из пластмассовых труб 97
3.2.3.Солнечный коллектор с теплоприёмником, изготовленным из пластмасс методом экструзии 101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 107
ЛИТЕРАТУРА 109
ПРИЛОЖЕНИЕ 119

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Q - Интегральный поток энергии, КДж;

η - эффективность;

q - плотность потока энергии, Вт/м^2;

C_p - Удельная теплоёмкость при постоянном давлении, КДж/(кг.°С) ;

G - расход теплоносителя, кг/с, кг/ч;

m - масса, кг;

F - площадь;

K - коэффициент теплопередачи, Вт/(м^2.°С) ;

$K_{\text{пр}}$- приведенный коэффициент теплопотерь, Вт/(м^2.°С) ;

ρ- коэффициент отражения, плотность, кг/м^3;

t - температура, °С;

τ- коэффициент светопропускания;

α-коэффициент лучепоглощения;

Критерии

$Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda_f}$ – Нусельта, $G_r = \frac{\rho q_\Delta t \delta^3}{\gamma^2}$ – Грасгофа,

$Re = \frac{Vd}{\gamma}$ – Рейнольдса, $Pr = \frac{\gamma}{a}$ – Прандтля.

Индексы:

пад- падающая, погл- поглощенная, пол- полезная, тп-теплоприемник, д- дно, б- бок, с- светопроэрачное покрытие(стекло), о- окружающая среда, т-теплоноситель, лплучепоглощающая пластина, вх-вход, вых- выход, к-

конвективный, кс- клеевое соединение, л- лучистый, уд- удельная, отн-относительная, опт- оптический, фр- фронтальная, н, нар-наружный, тз-тепловой зазор, w- стенка, эф- элемент фиксации, тк-теплоотводящий канал, e- отнесенная к единице длины, (р-о)-между теплоприемником и окружающей средой, (с-о)- между стеклом и окружающей средой, $(C_1 - C_2)$-между слоями стекла, $(W_g - f)$- между внутренней стенкой теплоотводящего канала и теплоносителем.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений научно- технического прогресса в нашей стране является разработка новых технологий по экономному расходованию материально-технических и топливно-энергетических ресурсов, а также более широкое использование в народном хозяйстве нетрадиционных возобновляемых источников энергии, в том числе солнечной энергии.

Преобразование солнечной энергии в низкопотенциальное тепло и использование его в системах горячего водоснабжения жилых и коммунально-бытовых объектов, потребляющих тепло такого же температурного потенциала, считается наиболее перспективной область гелиотехники.

В среднеазиатских республиках, климат которых наиболее благоприятен для использования солнечной энергии в различных отраслях народного хозяйства, в том числе для теплоснабжения, из общего количества тепла, расходуемого жилищно-коммунальным сектором, 50-70% расходуется на горячее водоснабжение. Многолетний опыт эксплуатации систем солнечного горячего водоснабжения в Республике Узбекистан (ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз и ТашЗНИИЭП) показывает, что около 60% годовой потребности в тепле для нужд горячего водоснабжения может быть покрыто за счет использования солнечной энергии. Удовлетворение 50% тепло потребности населения в сельской местности Республики Узбекистан на горячее водоснабжение за счет солнечной энергии позволило бы сохранить органическое топливо эквивалентное более чем 4 млн. т.у.т. в год. Наряду с

горячим водоснабжением солнечную энергию можно использовать для получения низкопотенциального тепла в сельском хозяйстве и примышленности республики. Однако масштабы внедрения в народнохозяйственную практику систем солнечного горячего водоснабжения еще незначительны, что объясняется высокой стоимостью, отсутствием отлаженной технологии серийного производства и т.п.

В настоящее время в развитых странах: США, Японии, Германии, Англии и др., наблюдается тенденция к расширению применения пластмассовых материалов (труб) в системах горячего водоснабжения, отопления и для изготовления солнечных коллекторов [1].

Анализ тенденции развития использования солнечной энергии за рубежом [1] показывает, что одним из путей снижения материалоёмкости и стоимости солнечных коллекторов является применение пластмассовых материалов. В связи с этим отличительной чертой солнечных коллекторов в ближайшей перспективе является постепенная замена их металлических элементов на пластмассовые, которые не только способны обеспечить надежную теплозащиту (при изготовлении корпуса), но и полностью решается проблема коррозии и выхода из строя в результате замерзания теплоносителя (при изготовлении теплоотводящих каналов теплоприемника).

Однако, малая теплопроводность, небольшая механическая прочность и ни зная стойкость к естественному старению пластмассовых материалов существенно препятствуют их

широкомасштабному применению для изготовления солнечных коллекторов. Следовательно, создание солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами непосредственно связано с выбором пластмассовых материалов с физико-химическими свойствами, удовлетворяющими требования, предъявляемым к материалам, пригодным для изготовления тех или иных элементов солнечных коллекторов. При этом, несмотря на низкие теплотехнические и механические характеристики пластмассовых материалов, к солнечным коллекторам с пластмассовыми элементами или полностью изготовленным из пластмасс (за исключением светопрозрачного покрытия) предъявляются те же требования, что и к металлическим, т.е. высокая эффективность, прочность и надежность в эксплуатации [2].

В связи с вышеизложенной основной целью диссертации является разработка и поиск путей повышения эффективности солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

– выбрать наиболее подходящие пластмассовые материалы для использования их в солнечных коллекторах;

– разработать конструкции солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами, не уступающим по своим энергетическим и технико-экономическим показателям традиционным металлическим коллекторам;

– определить снижение эффективности и разности температур в отдельных узлах и соединениях разборного лист отрубного

теплоприемник ка с пластмассовыми теплоотводящими каналами;

– оптимизировать основные параметры теплоприемников с металлическими луче поглощающими пластинами и пластмассовыми теплоотводящими каналами, а также полностью изготовленных из пластмасс;

– экспериментально исследовать эффективность разборных пластмассовых коллекторов и сопоставить с эффективностью традиционных металлических коллекторов.

Солнечные низкопотенциальные коллекторы с теплоприемниками, частично или полностью изготовленными из пластмасс, и пластмассовыми теплоизоляционным корпусом со светопрозрачным покрытием и без него, традиционные металлические коллекторы (для сопоставления).

Основными элементами новизны, которые автор выносит на монографий, является:

– обобщенная зависимость для термической эффективности разборного лист отрубного теплоприемника, в которой учтены распределение температуры по ширине фиксирующих элементов луче поглощающей пластины и проводимость теплового зазора между элементами фиксации луче поглощающей пластины и наружной поверхности стенки теплоотводящих каналов;

– зависимости для относительных эффективностей различных элементов и узлов разборного лист отрубного теплоприемника;

– зависимости для определения снижения температуры в различных элементах и узлах (соединениях) разборного лист отрубного теплоприемника;

– результаты исследований по оптимизации основных параметров теплоприемников солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами;

– эмпирические зависимости для определения эффективности разборных солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами.

Достоверность полученных результатов основана на хорошем совпадении расчетных и экспериментальных данных и исходных параметров, сравнении расчетных результатов с известными решениями и получении последних из предложенных зависимостей при соответствующих допущениях.

Предложены конструкции, изготовлены и проведены лабораторные испытания опытных образцов солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами. Установлено влияние теплотехнических характеристик отдельных элементов и узлов коллектора на его общую эффективность и предложены пути уменьшения влияния факторов, отрицательно влияющих на производительность коллектора. Результаты исследований могут быть использованы при разработке солнечных коллекторов нового поколения (с применением пластмасс) с улучшенными теплотехническими и технико-экономическими характеристиками.

Результаты исследований явились основой для создания опытных образцов солнечных коллекторов с разборным лист отрубным теплоприемником (с металлической луче поглощающей пластиной и пластмассовым теплоотводящим каналом из теплостойкого полиэтилена). Результаты исследований использованы также при составлении технического задания на

разработку солнечного коллектора нового поколения с пластмассовым корпусом и теплоприемником, полностью изготовленным из пластмассы (полипропилена) методом экструзии.

ГЛАВА I. СОЛНЕЧНЫЕ КОЛЛЕКТОРЫ С ПЛАСТМАССОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ, АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ И ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ

В южных районах страны из общего количества тепла, расходуемого жилищно-коммунальным сектором, 50-70% расходуется на горячее водоснабжение. Это обстоятельство, а также то, что к горячему водоснабжению предъявляются менее жесткие требования по надежности, чем к отоплению, дает основание считать, что первым этапом внедрения солнечных систем должно явиться горячее водоснабжение [3].

Основным элементом системы солнечного горячего водоснабжения является солнечный коллектор. Для нагрева теплоносителя (воды) в системах горячего водоснабжения на 20-30°С выше температуры окружающей среды обычно используются солнечные низкопотенциальные коллекторы, принцип действия которых основан на известном парниковом эффекте.

1.1. Анализ конструктивных решений солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами

В отечественной и мировой практике наиболее распространены простые устройства и установки, преобразующие солнечную энергию в теплоту невысокого температурного потенциала (до 100°С). Основное оборудование таких установок - коллекторы, в которых солнечная энергия преобразуется в теплоту. Коллекторы солнечной энергии в зависимости от области применения, реализуемого температурного потенциала,

конструктивных особенностей можно разделить на плоские, фокусирующие, трубчатые, листотрубные, вакуумированные и др. [4].

В настоящее время производство солнечных коллекторов (в основном плоских солнечных с трубчатым и листотрубным теплоприемниками) налажено практически во всех развитых странах мира. Сведения об общей площади установленных солнечных коллекторов, а также площади солнечных коллекторов, приходящихся на одного человека, в некоторых странах мира приведены в таблице 1.1. [5].

Таблица 1.1.

Страна	Общая площадь установленных солнечных коллекторов ров, тыс. $м^2$	Площадь солнечных коллекторов на одного человека, $м^2$
США	10000	0,04
Япония	8000	0,06
Израиль	1700	0,45
Австралия	1200	0,06
Австрия	200	0,02
Тайвань	240	0,012
Франция	288	0,005
ФРГ	250	0,004
СССР	100	0,0003

Годовой объём производства солнечных коллекторов всех типов В США за последние годы составляет в среднем 1,5 млн.$м^2$, в том числе 1,1 млн.$м^2$ со светопрозрачным покрытием и 0,4 млн.$м^2$ без светопрозрачных покрытий (для плавательных бассейнов).

Около 6% всех выпускаемых в США солнечных коллекторов изготовлены полностью из пластика, 2,2% - нержавеющей стали и 0,7% - алюминия.

Анализ параметров и конструктивных особенностей солнечных коллекторов США [6] показывает, что выпускаемые в США солнечные коллекторы имеют высокие теплотехнические, конструктивные и эксплуатационные качества, достигаемые отработанной технологией изготовления и применением соответствующих конструктивных материалов.

В большинстве стран теплоотводящие каналы теплоприемника солнечных коллекторов выполняются из тонкостенных медных трубок (США, Япония), лучепоглощающие пластины - листовой меди (США) и нержавеющей стали (Япония). Технология соединения трубы с листом довольно разнообразна, например, простая пайка, кузнечная пайка, запрес- оовка труб, механическая связь, обжим, электросварка и т.д.

Как показывает опыт, в виду многообразия технических решений, принятых при создании низкопотенциальных солнечных коллекторов, и разнообразных условий эксплуатации технико-экономические показатели установок значительно отличаются друг от друга, что осложняет выбор наиболее рациональной и технологичной конструкции коллектора.

При разработке конструкций солнечных коллекторов основная задача - достичь высокой эффективности и эксплуатационных качеств путем различных конструктивных решений всех основных элементов коллектора.

Одним из возможных путей снижения стоимости солнечных коллекторов является применение пластмассовых материалов. В связи с этим отличительной чертой солнечных коллекторов в

ближайшей перспективе является постепенная замена их металлических элементов на пластмассовые, которые не только способны обеспечить надежную теплозащиту (при изготовление корпуса), но и полностью снять проблему коррози (при изготовлении теплоотводящих каналов теплоприёмника).

В результате анализа мирового опыта в области разработки и создания солнечных коллектров с пластмассовыми элементами выявлены следующие три тенденции:

1. Замена металлического (или деревянного) корпуса коллектора и теплоизоляционного материала, уложенного на дно, и боковые стенки с литой оболочкой из пластиковых материалов, в некоторых случаях металлический корпус покрывается слоем вспененного пластмассового материала в целях предупреждения как коррозии так и обеспечения теплоизолаяции.

2. Земена металлического теплоприёмника с прилегающими одна к другой параллельно расположенными тонкостенными черными пластмассовыми трубами. Теплоприёмник может быть изготовлен также из гибких черных пластмасовых труб в виде спирали. В отделбных случаях теплоотводящий канал теплоприемника изготовливается из пластмасы, а лучепоглощающая пластина из металла (стали или алюминия).

3. Замена металлического корпуса и теплоприемника на пластмассовый.

Научно-исследовательские и опытно-конструктурские работы в области создания солнечных коллектров с

пластмассовыми элементами ведутся в основном в США, Великобритании, Японии, Германии, в нашей стране и т.д.

Технические решения по замене металического корпуса солнечных коллектров пластмассовыми приведены в работах [7-16]. В качестве теплоизоляции использованы газонаполненные вспенивающиеся пеноматериалы (на основе пеноэкпоксида, пенопласта, пенополистирола, пенополиуретана и т.д.), которые одновременно выполняют функции корпуса коллектора.

Анализ результатов патентного исследования в области разработки и создания теплоприемников солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами показывает, что одной из отличительных черт таких солнечных коллекторов является применение пластмассовых материалов в различных комбинациях [1].

На основе обобщения мирового опыта в области разработки и создания низкопотенциальных пластмассовых теплоприемников солнечных коллекторов автором выполнена систематизация их по основным признакам. Как показывают исследования, все существующие низкопотенциальные пластмассовые солнечные коллекторы отличаются, во-первых, конструкцией и технологией изготовления теплоприемника, во-вторых, материалом теплоприемника, корпуса и светопрозрачного покрытия.

Основные конструктивные решения (типы) теплоприемников низкопотенциальных пластмассовых солнечных коллекторов (СК), предназначенных для нагрева жидкого теплоносителя, существующие в настоящее время в мировой практике, а также их

краткая характеристика, соответствующая библиографическая информация и классификация пласт-массовых теплоприемников приведены в таблице 1.2. и на Рис.1.1., Рис.1.2.

На основе анализа известных пластмассовых теплоприемников солнечных коллекторов по их основным конструктивным признакам и появления новых разработок в этой области предложенная классификация может быть дополнена и скорректирована соответствующим образом.)

Таблица 1.2.

Обозначения СК по Рис.1.2.	Тип и краткая характеристика теплоприемников	Источник информации
а,б	“Труба”: теплоотводящие каналы в виде призматических или круглых труб, параллельно уложенных друг к другу и соединенные общим гидравлическим каналом	[17, 18, 19, 20,21, 22]
в	“Труба” из черного пластмассового шланга, свернутого в виде спирали	[23]
г	“Лист-труба”: пластмассовые теплоотводящие каналы прижатые эле ментами фиксации к лучепоглощающей пластине.	[24, 25, 23, 26, 27]
д	“Подушка” (ёмкий): два пластмассовых листа приварены по периметру	[28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40]
е	“Лист”: два параллельных пластмассовых листа, приварены по краям, между ними вставлено множество ребер для образования каналов	[41, 42, 43, 44, 45, 46, 47]
ж	“Лист”: плоские листы с перегородками между ними выполнены монолитными в процессе экструзии	[48, 49]

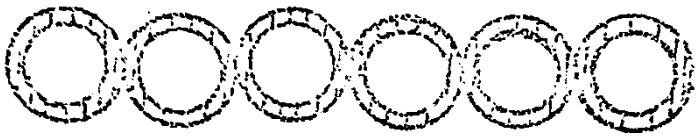


Рис.1.1. Классификация пластмассовых теплоприемников солнечных коллекторов

А



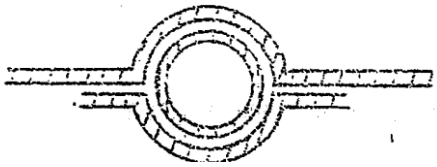
Б



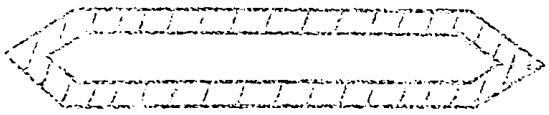
В



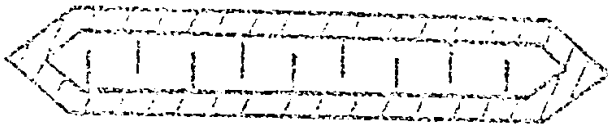
Г



Д



Е



Ж

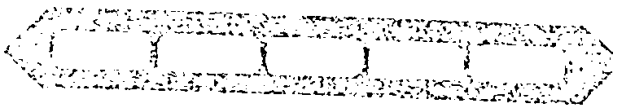


Рис.1.2. Основные конструктивные решения теплоприемника пластмассовых солнечных коллекторов (см. вместе с Таблицей 1.2.У)

1.2. Выбор пластмассовых материалов для изготовления солнечных коллекторов и их элементов

Основными препятствиями для изготовления солнечных коллекторов из пластмасс являются малая теплопроводность и сравнительно небольшая механическая прочность применяемого материала, а также низкая его стойкость к естественному старению. Кроме того, к пластмассовым материалам, используемым для изготовления солнечных коллекторов, предъявляются требования по достаточной теплостойкости, светостойкости и химической стабильности в диапазоне температур характерных для эксплуатации солнечных коллекторов [50].

Результаты подробных исследований по выбору современных пластмассовых материалов при производстве солнечных коллекторов изложены в работе [51].

Инструментом повышения технического уровня отечественных солнечных коллекторов является разработанный ЭНИНом ГОСТ [2] на солнечные коллекторы. Хотя этот ГОСТ распространяется на металлические солнечные коллекторы, отдельные его требования к габаритам корпуса, оптической эффективности светопрозрачного покрытия и т.п. являются также обязательными для солнечных коллекторов, изготовленных из пластмасс.

Общими недостатками отечественных солнечных коллекторов являются малая площадь, большая удельная масса, следовательно, материалоёмкость, малый срок службы. Зарубежные рекомендации по конструированию солнечных коллекторов [52,53], ориентируют

на применение высококачественных материалов и современных технологий. В отечественной же практике применяются, как правило, доступные, недефицитные недорогие, зачастую не самые подходящие материалы, что пагубно сказывается на качестве изделий. Поэтому перспективы улучшения качества отечественных коллекторов связаны прежде всего с использованием материалов высокого качества и совершенных технологий.

Основными элементами плоского солнечного коллектора, как известно, являются поглощающая панель, прозрачное покрытие, тепловая изоляция, корпус. Рассмотрим основные технические требования к этим элементам и материалам, из которых они изготавливаются.

Физико-механические свойства пластмасс, которые могут быть использованы для изготовления поглощающей панели, корпуса и светопрозрачного покрытия приведены в Таблице 1.3.

Исследования, выполненные многочисленными зарубежными фирмами, показывают, что при использовании пластмассовых материалов для поглощающих панелей солнечных коллекторов для подогрева воды полностью снимается проблема коррозии. Другим преимуществом пластмассовых материалов является их относительно небольшая масса. Гидравлическое сопротивление пластмассовых труб, имеющих гладкую внутреннюю поверхность, мало и практически не изменяется во времени. Кроме того, пластмассы значительно дешевле металла [54].

Материал поглощающей панели должен удовлетворять требования, перечисленные в Таблице 1.4. Как видно из Таблицы

1.4. наибольшее количество положительных свойств у полиэтилена, полипропилена, поликарбоната [55].

Недостатками пластмассовых материалов, используемых при изготовлении теплоприемников солнечных коллекторов для подогрева воды, является их низкая теплопроводность по сравнению с металлами, худшая по сравнению с металлическими трубами стойкость к внутренним и внешним нагрузкам и не высокая теплостойкость, многие пластмассы разрушаются при воздействии на них ультрафиолетовых солнечных

Таблица 1.3.

Физико-механические свойства пластмасс

№	Наименование показателей		Полиэтилен	Полипро-пилен	Поливинил-хлорид	Поли-карбонат
1.	Плотность кг/м3		945-953	900	1290	1200-1400
2.	Коэффициент линейного расширения, α-10-5		21-55	II	-	2,5-6
3.	Коэффициент теплопроводности, Вт/м. К		0,42-0,44	0,19-0,21	0,17	0,2
4.	Максимальная рабочая температура, °С		100-110	120	70	135-150
5.	Удельная теплоёмкость, кДж/(кг. К)		1,9-2.2	2,93	-	1,17
6.	Коэффициент температуропроводности а. 10-7 м2/с		1,9	1,3	-	-
7.	Вод поглощение при 20°С за 24ч, %		0,00	0,01-0.09	0,1-0,5	0,15-0,2
8.	Прочность,	МПа				
		при растяжении	18-35	25-40	40-120	70
		при сжатии	20-36	II	80-160	-
		при стат. изгибе	20-36	-	40-120	84-120
9.	Оптовая цена, руб/кг (1990 г.)		0,51-0,63	0,70-1,90	0,45-2,50	5,9-8,30

Таблица 1.4.

Оценка материалов поглощающей панели

№	Свойства и стоимость материалов	Полиэтилен	Полипропилен	Поликарбонат
1.	Термостойкость длительно, 80°С	4-	+	+
2.	Противостояние коррозии Химической внутри панели (в том числе хлорной)	+	4-	4-
	Снаружи	4-	4-	4-
	Электрохимической	+	4-	4*
3.	Разрушения при замерзании теплоносителя	4-	4-	4-
4.	Возможность нанесения селективных	-	-	-
5.	Удовлетворение санитарно-гигиенических	+	4-	4-
6.	Технологичность	4-	4-	4-
7.	Длительный срок службы (эксплуатации)	4-	4-	4-
8.	Цена материала, руб./кг (в ценах 1990 г.)	0,59	0,90-1,03	5,90-8,30
9.	Ориентировочный расход материала на 1	1,9	1,8	2,6
10.	Стоимость материала на 1 м2 панели, руб. (в ценах 1990 г.)	1,12	1,62-1,85	15,34

Здесь и далее в Таблицах 1.5 и 1.6

Знак (+) - хорошее соответствие требованию; (+) - удовлетворительное; (-) – неудовлетворительное

лучей [55,56]. Поэтому пластмассы практически не применяются для изготовления лучепоглощающих пластин теплоприемников.

От ряда недостатков можно избавиться путем частичного использования металлических элементов в конструкции теплоприемников. Например, лучепоглощающие пластины теплоприемника изготавливаются из зачерненных металлических листов из меди или алюминия, а теплоотводящие каналы (трубы) из пластмасс. Для защиты от отрицательного воздействия солнечного излучения пластмассовые трубки могут быть обхвачены

элементами фиксации лучепоглощающей пластины.

Таким образом есть реальная возможность создания гибридных (из металла и пластмасс) листотрубных теплоприемников. Такая конструкция теплоприемника широко используется в зарубежной практике [57,58]. Как показывают исследования [57,58], пластмассовые трубки, расположенные с интервалом в 150 мм и имеющие хороший тепловой контакт с элементами фиксации лучепоглощающей пластины из зачерненной меди толщиной 0,5 мм или алюминия толщиной 1мм, обеспечивают термическую эффективность теплоприемника 97%.

Другими словами, в конструкциях теплоприемников, где нужна высокая механическая прочность и теплопроводность (например, в луче- поглощающей пластине) используются металлические элементы, а где нужна высокая коррозионная стойкость (теплоотводящие каналы) - пластмассовые трубки.

Кроме того, с применением пластмассовых труб вместо металлических теплоотводящих каналов срок эксплуатации теплоприемника увеличивается в 2-3 раза и существенно уменьшается металлоемкость теплоприемников.

Одной из основных задач разработки таких теплоприемников является обеспечение надежной прочности стыка металла и пластмассы, а также уменьшение термического сопротивления этого контакта.

В ФТИ НПО Физика-Солнце" АН РУЗ предложены два возможных способа закрепления теплоотводящих каналов из пластмассовых труб и луче- поглощающей пластины из металла.

Первый способ заключается в образовании на поверхности луче- поглощающей пластины продольных канавок (желобов) размером, соответствующим наружному диаметру пластмассовых труб. Крепление теплоотводящих каналов с лучепоглощающей пластиной осуществляется с помощью клеевых композиционных материалов, например, типа "Спрут", разработанного институтом Химии высокомолекулярных соединений АН УССР.

Второй способ крепления теплоотводящих каналов к луче-поглощающей пластине заключается в применении дополнительных прижимных устройств и приспособлений (элементов фиксации). Естественно, для уменьшения термического сопротивления контакта между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и теплоотводящим каналом требуется заполнение неплотности контакта теплопроводными или композиционными материалами.

Материалы прозрачного покрытия корпуса солнечных коллекторов должны удовлетворять требованиям, приведенным в Таблице 1.5. Как видано из Таблицы 1.5., наиболее удовлетворяют перечисленным требованиям упрочненное стекло и поликарбонат. Однако последний дефицитен и не проверен в условиях эксплуатации.

В настоящее время в стране проблема разработки гелиотехнического (упрочненного) стекла и прозрачных пленочных материков из пластмасс, предназначенных для использования в качестве прозрачного покрытия корпуса солнечного коллектора, находится на стадии опытно-конструкторских разработок. В связи с

этим на сегодняшний

Таблица 1.5.

Оценка материалов прозрачного покрытия

№	Свойства и стоимость материалов	Стекло			Поликарбонат	Пленка	
		Оконное	Упрочненное	Органическое		Полиэтиленовая	Фторсодержащая
1.	Высокий коэффициент пропускания	±	+	+	+	+	+
2.	Стойка						
	к повышенным температурами	±	+	±	±	-	+
	к абразивному износу	+	+	-	±	-	-
	к радиационному старению	+	+	-	±	-	+
3.	Удар прочность	-	±	+	+	+	+
4.	Конструктивная прочность	±	+	-	±	-	-
5.	Малая прочность	-	-	+	+	+	+
6.	Малая загрязняемость и хорошая очищаемость	+	+	-	-	-	-
7.	Длительный срок службы	±	+	-	±	-	±
8.	Цена материала	1р/м2	4р/м2	27р/кг	5,9р/кг	0,9р/кг	15р/кг
9.	Расход материала на м2 коллектора	1м2	1м2	4,8кг	4,5кг	0,6кг	0,4кг
10.	Стоимость материала на 1м2 коллектора, руб.	1,0	4,0	13,0	27,0	0,54	0,6

См. примечание к Таблице 1.4.

день простое оконное стекло толщиной 3-4 мм является повсеместно распространенным материалом для этой цели. Пленочные светопрозрачные полимерные материалы требуют

специальных устройств натяжения во избежание их деформации и провисания.

Что касается стоимости, то стекло имеет преимущество перед пластмассовыми материалами кроме полиэтиленовой пленки. Но характеристики последней несравнимы со стеклом, а долговечность не превышает одного сезона. [59]

Выбор материалов для корпуса солнечного коллектора определяется требованиями к конструктивной прочности и долговечности при всех видах атмосферного воздействия в течение всего срока эксплуатации, а также технической эстетики. Материалы, используемые для корпуса, должны удовлетворять требования, перечисленные в таблице 1.6. Как видно из Таблицы 1.6., наилучший набор качеств у пенополиуретана и пеноэпоксида. Единственный недостаток пенополиуретана - применение при производстве в качестве вспенивателя фреона, пагубно влияющего на окружающую среду. В последние годы в мировой практике для изготовления корпуса низкопотенциальных солнечных нагревателей, в том числе солнечных коллекторов, стали применяться литые оболочки из вспененных синтетических смол, которые обладают низким объёмным весом, низким коэффициентом теплопроводности, химической стойкостью и другими положительными свойствами. Наряду с этим теплоизоляционные материалы на основе вспененных синтетических смол имеют основной недостаток: невозможность применения их при высоких температурах. Еще одним существенным их недостатком является “старение”, которое

выражается в снижении механической прочности, окислении, увеличении водопоглощения и в самопроизвольном разрушении.

Таблица 1.6.

Оценка материалов ограждающих конструкций

№	Свойства и стоимость материалов	Поливинил хлорид, М.	Пенопласт полистирольный	Пеноэпоксид	Пенопласт пенополиуретановый
1.	Низкий коэффициент теплопроводности	±	+	+	+
2.	Термостойкость длительно до 80°С	+	±	+	+
3.	Низкое влагопоглощение	+	+	+	+
4.	Прочность и жесткость	+	+	+	+
5.	Коэффициент линейного расширения $\alpha\ 10^{-5}$	-	-	-	-
6.	Малая удельная масса	+	±	+	+
7.	Длительный срок службы	+	±	+	+
8.	Цена материала, руб./кг	0,45-2,50	1,55-1,70	2,30-6,0	1,25-7,8
9.	Расход материала на 1 $м^2$ коллектора кг	2,58	0,45	3,8	0,268
10.	Стоимость материала на 1 коллектора, руб.	1,16-6,48	0,69-0,765	8,74-22,8	0,33-2,09

См. примечание к таблице 1.4.

В ФТИ НПО "Физика-Солнце" АН РУЗ в 1982-1987 гг. проводились опыты по созданию корпусов низкопотенциальных установок их пеноэпоксида [60], представляющего собой газонаполненную пластмассу с замкнутой смолой ЭД-20 и других различных компонентов.

Натурные пятилетние наблюдения показали, что эти корпусы удовлетворяют требованиям, предъявляемым к корпусам солнечных коллекторов для подогрева воды.

1.3. Состояние научных исследований по расчету солнечных коллекторов

Наряду с разработкой и созданием солнечных коллекторов в настоящее время накоплен значительный опыт по их расчету в оптимизации основных характеристик [57,61].

Основным теплотехническим показателем солнечных коллекторов является их эффективность **η**, определяемая из отношения полезно полученной от коллектора энергии ($Q_{пол.}$) к падающей на фронтальную (общую) поверхность коллектора $Q_{пад}$

$$\eta = \frac{Q_{пол}}{Q_{пад}} \qquad (1.1)$$

Для определения эффективности солнечного коллектора экспериментальным путем предложены многочисленные методы. Все существующие методы тепловых испытаний солнечных коллекторов экспериментальным путем систематизированы и обобщены в работе [62], поэтому в рамках обзора наших исследований они не приводятся.

Наиболее общеизвестное выражение для определения эффективности солнечных коллекторов

$$\eta = \eta_{тп}\left(\eta_{опт} - К_{пр_{р-о}}\frac{t_f - t_0}{q_{пад}}\right), \qquad (1.2)$$

предложенное Хоттелем на базе квазистационарной модели, т.е. без учета теплоёмкости коллектора [57].

Величина t_f в формуле (1.2.) - среднемассовая температура теплоносителя в каналах теплоприемника, определяемая по

выражению

$$t_f = 0{,}5\left(t_{f_{\text{вых}}} - t_{f_{\text{вх}}}\right) \tag{1.3}$$

Если параметром служит температура теплоносителя на входе в каналы теплоприемника ($t_{f\text{вх}}$), то выражение может быть переписано в виде

$$\eta = F_R\left(\eta_{\text{опт}} - \text{К}_{\text{пр}_{\text{р-о}}}\frac{t_{f_{\text{вх}}} - t_0}{q_{\text{пад}}}\right) \tag{1.4}$$

где: F_R - фактор расхода или коэффициент отвода тепла от коллектора.

Значение F_R в свою очередь определяется по формуле

$$F_R = \frac{G_{\text{уд}}\text{C}_\text{р}}{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р-о}}}}\left(1 - l^{-\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р-о}}}\eta_{\text{тп}}}{G_{\text{уз}}\text{C}_\text{р}}}\right) \tag{1.5}$$

Нестационарность работы коллектора может быть учтена введением в формулу (1,2.) соответствующей корректировки, т.е.

$$\eta = \eta_{\text{тп}}\left[\eta_{\text{опт}} - \text{К}_{\text{ПР}_{\text{р-о}}}\frac{t_f - t_0}{q_{\text{пад}}}\right] - \text{C}_{\text{пр}}\frac{dt_f}{dt} \tag{1.6}$$

где: $\text{C}_{\text{пр}}$ – приведенная на 1м^2 поверхности коллектора удельная теплоёмкость

Методика определения $\text{C}_{\text{пр}}$ предложена в работе [63]. Согласно [63] выражение для определения $\text{C}_{\text{пр}}$ имеет вид

$$\text{C}_{\text{пр}} = \left(mC_p\right)_f + K_{\text{зап}}\left(mC_p\right)_p + a\frac{K_{c_{p-o}}}{K'}\left(mC_p\right)_c + b\frac{K_{\partial_{p-o}}}{K'_\partial} +$$

$$\left(mC_p\right)_\partial + + \frac{K_{\delta_{p-o}}}{K'_\delta}\left(mC_p\right)_\delta \tag{1.7}$$

где:

$$a = \frac{F_C}{F_{\text{фр}}};\ b = \frac{F_\partial}{F_{\text{фр}}};\ c = \frac{F_\delta}{F_{\text{фр}}};$$

$$K'_C = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{нар}}} + \frac{\delta_C}{2\lambda_C}\right)^{-1};\ K'_\partial = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{нар}_\partial}} + \frac{\delta_\partial}{2\lambda_\partial}\right)^{-1};\ K'_\delta = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{нар}_\delta}} + \frac{\delta_\delta}{2\lambda_\delta}\right)^{-1}$$

Величина $\eta'_{\text{опт}}$ в (1.2) - (1.6.) представляет собой оптическую эффективность коллектора или эффективную приведенную поглощатеьную способность системы “прозрачное покрытие - теплоприемник” и определяется в общем виде по формуле

$$\eta_{\text{опт}} = \alpha_{\text{р}} + (1 + \tau_{\text{а}}) \sum_{i=1}^{n} a_i \tau^{i-1} \tag{1.8}$$

где: a_i – отношение полного коэффициента потерь к коэффициенту потерь i – го покрытия в окружающей среде; $\tau_{\text{а}}$- пропускательная способность одного покрытия, определяемая по выражению

$$\tau_a = l^{-KL} \tag{1.9}$$

(К- коэффициент ослабления; L – фактическая длина пути излучения через светопрозрачное покрытие)

Для светопрозрачного ограждения солнечных коллекторов соответственно с одно и двух слойными покрытиями выражение (1.8.)

может быть переписано в виде

$$\eta_{\text{опт}_1} = (\alpha_{\text{р}}\tau) + (1 - \tau_{\text{а}}) \frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р-о}}}}{\alpha_{\text{нар}_{\text{С}}}} \tag{1.10}$$

$$\eta_{\text{опт}_2} = (\alpha_{\text{р}}\tau) + (1 - \tau_{\text{а}}) \frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р-о}}}}{\text{К}_{\text{с}_1\text{-о}}} \tau \tag{1.11}$$

где:

$$К_{с_{1-о}} = \left(\frac{1}{\alpha_{нарс}} + \frac{1}{\alpha_{К_{С_1-С_2}} + \alpha_{\wedge С_1-С_2}}\right)^{-1} \quad (1.12)$$

Величины τ и $\tau_с$ в (1,10.) связаны между собой выражением

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a \quad (1.13)$$

где: τ_r – пропускательная способность покрытия без учета положения, поглощения, определяемая в общем виде по формуле

$$\tau_{r,n} = \frac{1-\rho}{1+(2n-1)\rho} \quad (1.14)$$

В частном случае для одно-двух слойного покрытия

$$\tau_{r,1} = \frac{1-\rho}{1+\rho} \quad (1.15)$$

и

$$\tau_{r,2} = \frac{1-\rho}{1+3\rho} \quad (1.16)$$

Значение приведенного к 1 м^2 фронтальной поверхности коллектора коэффициента тепловых потерь определяется по выражению [57]

$$К_{пр_{р-о}} = аК_С + вК_\partial + СК_\delta \quad (1.17)$$

где: $К_С$, $К_\partial$, $К_\delta$ - коэффициенты теплопотерь соответственно через светопрозрачное ограждение, дно и боковые стенки корпуса коллектора.

Методика определения $К_С$, $К_\partial$ и $К_\delta$ для различных типов корпуса солнечных коллекторов подробно изложена в работе [64]. Там же изложены методы оптимизации толщины воздушной прослойки светопрозрачного покрытия, термического

сопротивления тыльной теплоизоляции корпуса, а также особенности расчета тепловых потерь боковых стенок корпуса различных типов.

Обобщение мирового опыта в области разработки и создания солнечных коллекторов [61] показывает, что все существующие коллекторы, в том числе пластмассовые, в основном отличаются по конструкции и технологии изготовления теплоприемников. Следовательно, вопрос сопоставления эффективностей солнечных коллекторов различных конструкций сводится к рассмотрению и анализу теплотехнических характеристик их теплоприемников.

Основная теплотехническая характеристика теплоприемников солнечных коллекторов это их термическая эффективность, определяемая по формуле [57]:

$$\eta_{\text{тп}} = \frac{\frac{1}{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-0}}}}{W\left[\frac{1}{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-0}}[D+(W-D)]\eta_{\wedge\text{п}}}+\frac{1}{\text{С}_{\text{в}}}+\frac{1}{\pi D_i \alpha_{kf,i}}\right]} \qquad (1.18)$$

где: W - расстояние между центрами (осями) двух смежных теплоотводящих каналов,

D и D_i - соответственно наружный и внутренний диаметры тепло-отводящего канала,

$C_р$ – проводимость теплового контакта между лучепоглощающей пластиной и теплоотводящим каналом,

$\alpha_{kf,\ i}$ – коэффициент теплоотдачи от стенки канала к жидкости,

$\boldsymbol{\eta}_{\text{лп}}$ – термическая эффективность лучепоглощающей пластины (ребра) теплоприемника.

Значения $C_в$ и $\boldsymbol{\eta}_{\text{лп}}$ в свою очередь могут быть определены по формулам:

$$C_{\text{в}}\frac{\lambda_{\text{в}}\text{в}}{\text{у}} \tag{1.19}$$

$$\eta_{\text{лп}} = \frac{th\left(a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}\text{пр}_{\text{р}-0}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)}{a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}\text{пр}_{\text{р}-0}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}} \tag{1.20}$$

где: $\lambda_{\text{в}}$, У и в – соответственно коэффициент теплопроводности материала, толщина и длина теплового контакта,

$\lambda_{\text{лп}}\,\delta_{\text{лп}}$ – соответственно коэффициент теплопровоности материала и толщина лучепоглощающей пластины,

$\text{а}_{\text{лп}}$ = 0,5 (W-D) – половина ширины лучепоглощающей пластины.

Развивая метод расчета термических эффективностей теплоприемников солнечных коллекторов, в работе [65] предложена обобщенная методика расчета термической эффективности листотрубных разборных теплоприемников и предложена зависимость для её определения:

$$\eta_{\text{тп}} = \frac{\frac{1}{(2\text{а}_{\text{лп}}+d_{\text{н}})\text{К}\text{пр}_{\text{р}-0}}}{\frac{1}{2\text{а}_{\text{лп}}\eta_{\text{лп}}}+\frac{1}{\frac{\lambda_{\text{тз}}}{\delta_{\text{тз}}}\text{в}_1+\alpha_{\text{л}_{\text{тз}}\text{в}}}}}{\left[1+d_{\text{н}}\left(\frac{1}{2\text{а}_{\text{лп}}\eta_{\text{лп}}}+\frac{\text{К}\text{пр}_{\text{р}-0}}{\frac{\lambda_{\text{тз}}}{\delta_{\text{тз}}}\text{в}_1+\alpha_{\text{л}_{\text{тз}}\text{в}_2}}\right)\right]\text{К}\text{пр}_{\text{р}-0}}+\frac{1}{\frac{\lambda_W}{\delta_W}\text{в}_3}+\frac{1}{\alpha_{\text{к}}W_{\text{в}}-f^{\text{в}_4}}} \tag{1.21}$$

где: $\text{d}_{\text{н}}$ - ширина теплоотводящего канала, неохваченная элементами фиксации лучепоглощающей пластины (т.е. непосредственно поглощающая солнечное излучение),

λ_{w} и δ_{w} - соответственно коэффициент теплопроводности материала и толщина стенки теплоотводящего канала, в - периметр поперечного сечения, индексы 1, 2, 3 и 4 - соответственно

означают: между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и наружной поверхностью теплоотводящего канала; наружной поверхности теплоотводящего канала; средний между наружным и внутренним поперечным сечением теплоотводящего канала; внутренней поверхности теплоотводящего канала;

$\lambda_{тз}$ и $\delta_{тз}$ - соответственно эквивалентный коэффициент теплопроводности и условная толщина теплового контакта (зазора);

$\alpha_{лтз}$ - коэффициент лучистого теплообмена в тепловом зазоре.

В частном случае, когда тепловой зазор между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и теплоотводящими каналами заполнен теплопроводной или клеевой пастой с коэффициентом теплопроводности $\lambda_к$ и толщиной $\delta_к$ (Рис.1.2.,Г). При этом $\alpha_{лтз} = 0$ (т.е. лучистый теплообмен между лучепоглощающей пластиной и теплоотводящим каналом в результате луче непрозрачности клеевого соединения исключается),

$$\eta_{тп} = \frac{\dfrac{1}{(2a_{лп} + d_H)K_{пр_{р-о}}}}{\dfrac{\dfrac{1}{2a_{лп}\eta_{тп}} + \dfrac{K_{пр_{р-о}}}{\dfrac{\lambda_k}{\delta_k} + \mathscr{b}_1}}{\left[1 + d_H\left(\dfrac{1}{2a_{лп}\eta_{тп}} + \dfrac{K_{пр_{р-о}}}{\dfrac{\lambda_k}{\delta_k} + \mathscr{b}_1}\right)\right]K_{пр_{р-о}}} + \dfrac{1}{\dfrac{\lambda_w}{\delta_w}\mathscr{b}_3} + \dfrac{1}{d_{k_{w_{\mathscr{b}-f}}}\mathscr{b}_4}}$$

(1.22)

Теплоотводящие каналы уложены плотно друг к другу, т.е. $a_{лп} = 0$ $\eta_{лп} = 1$ (Рис. 1,2. а, б, в):

$$\eta_{\text{тп}} = \frac{1}{1+\frac{d_{\text{н}} K_{\text{пр}_{\text{р}-0}}}{\frac{\lambda_w}{\delta_w}\ell_3}+\frac{d_{\text{н}} K_{\text{пр}_{\text{р}-0}}}{\alpha_{\text{к}} w_{\text{в}} - f^{\text{в}4}}} \quad (1.23)$$

Теплоприемник изготовлен из двух стальных листов и сварен по периметру (т.е. теплоприемники типа “подушка”, Рис.1.2. д,Е,ж). При этом

$d_{\text{н}}$ = В , где В - ширина “подушки”:

$$\eta_{\text{тп}} = \frac{1}{1+\frac{\text{В} K_{\text{пр}_{\text{р}-0}}}{\frac{\lambda_w}{\delta_w}\ell_3}+\frac{\text{В} K_{\text{пр}_{\text{р}-0}}}{\alpha_{\text{к}} w_{\text{в}} - f^{\text{в}4}}} \quad (1.24)$$

Обобщенная зависимость (1.21) получена без учета распределения температуры по ширине элементов фиксации лучепоглощающей пластины. Следует отметить, что такое допущение может быть принято только для листотрубных теплоприёмников, в которых теплоотводящие каналы изготовлена из высокотеплопроводных материалов, таких как медь, алюминий и сталь. При изготовлении теплоотводящих каналов из пластмасс, теплопроводность которых в 100 и более раз меньше, чем у металлов, такое допущение может привести к существенному искажению физической картины процесса.

Тем не менее зависимость (1.21) дает возвожность провести всесторонний анализ той или другой конструкции теплоприёмника, установить влияние толщины теплового зазора между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и теплоотводящим каналом, расхода теп- лоносителя, а также параметров лучепоглощающей пластины и стенок теплоотводящего канала на эффективность теплоприёмника. Кроме того выражение (1.21.) позволяет провести тепломеханическую оптимизацию как отдельных узлов, так и в

целом теплоприёмника (например, ширины лучепоглощающей пластины, проводимости теплового зазора, проводимости стенки теплоотводящего канала, расхода теплоносителя).

ГЛАВА II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАЗБОРНОГО ЛИСТОТРУБНОГО ТЕПЛОПРИЁМНИКА С ПЛАСТМАССОВЫМ ТЕПЛООТВОДЯЩИМ КАНАЛОМ

Методика расчета термической эффективности листотрубных теплоприёмников низкопотенциальнцх солнечных коллекторов для подогрева воды подробно рассмотрена в [57, 61]. Однако, как отмечено в [57, 61], при составлении балансовых уравнений для отдельных элементов и узлов теплоприёмника не учтено распределение температуры по ширине фиксирующих элементов лучепоглощающих пластин. Как показывают расчеты, учет распределения температур по ширине фиксирующих элементов лучепоглощающих пластин разборных листотрубных теплоприёмников позволяет существенно раскрыть физико-механическую картину процесса переноса тепла между элементами фиксации и .теплоотводящими каналами и получить более достоверную, чем в [57, 61], зависимость для расчета термической эффективности разборных листотрубных теплоприёмников, особенно изготовленных из разнородных материалов: пластмасс (теплоотводящие каналы') и металлов (лучепоглощающая пластина).

2.1. Распределение температуры по ширине фиксирующих элементов лучепоглощающей пластины

Для получения выражения для распределения температуры по ширине фиксирующего элемента лучепоглощающей пластины воспользуемся принципиальной схемой составляющих теплового баланса для элементарного участка фиксирующего элемента лучепоглощающей пластины длиной l, толщиной δ и шириной Δx (Рис.2.1)

Сумма энергии, поступающей на элементарный участок фиксирующего

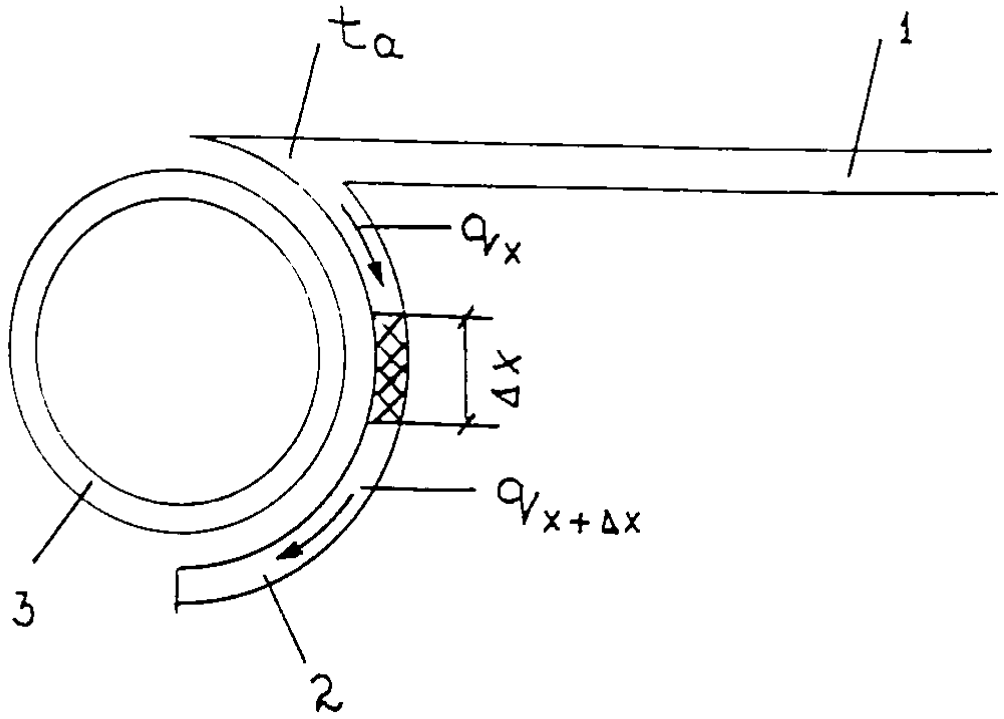


Рис.2.1. Принципиальная схема составляющих теплового баланса для элементарного участка фиксирующего элемента лучепоглощающей пластины:

1 - лучепоглощающая пластина; 2 - фиксирующий элемент лучепоглощающей пластины; 3 - теплоотводящий канал

элемента лучепоглощающей пластины ($q_x \delta l$), равна сумма энергии, выходящей из этого участка ($q_{x+\Delta x}$), и получаемой тепоотводящим каналом ($q_{\text{пол}}$), т.е.

$$q_x \delta l = q_{(x+\Delta x)} \delta l + q_{\text{пол}_x} \Delta x l \quad (2.1)$$

где:

$$q_{\text{пол}_x} = K_{\text{тз}} \left(t_x - t_{w_{\text{н}}} \right) \quad (2.2)$$

Величина $K_{\text{тз}}$ в формуле (2.2.) представляет собой проводимость или коэффициент теплопередачи через тепловой зазор между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и наружной поверхности стенки теплоотводящих каналов. Значение $K_{\text{тз}}$ определяется по выражению

$$K_{\text{тз}} = \frac{\lambda_{\text{тз}}}{\delta} + \alpha_{\text{Л}_{\text{тз}}} \quad (2.3)$$

где: $\lambda_{\text{тз}}$, $\delta_{\text{тз}}$ - соответственно коэффициент теплопроводности материала и условная толщина теплового зазора;

$\alpha_{\text{Л}_{\text{тз}}}$- коэффициент лучистого теплообмена в тепловом зазоре.

Граничные условия к уравнению (2.1) - равенство температур луче- поглощающей пластины и фиксирующего элемента в точке их контакта (т.е. X=0) и пренебрежение теплоотдачей через торцевую часть фиксирующего элемента вследствие $a^{|} \gg \delta^{|}$ ($a^{|}$ −общая ширина фиксирующего элемента) [66].

$$tx|x = a = ta \quad (2.4)$$

$$\frac{dt}{dx} \Big|_{x=a^{|}} = 0 \quad (2.5)$$

Делим обе части равенства (2.1.) на δ и находим предел при $\Delta x \to 0$:

$$-\frac{q_x}{d_x} = \frac{q_{\text{пол}}}{\delta} \tag{2.6}$$

С учетом (2.2) и на основании закона Фурье для рассматриваемого участка фиксирующего элемента выражение (2.1) переписываем в виде

$$\frac{d^2t}{dx} = \frac{K_{\text{тз}}(t_x - t_{w_H})}{\lambda_{\text{ЛП}}\delta_{\text{ЛП}}} \tag{2.7}$$

Решая (2.7) при граничных условиях (2.4) и (2.5), имеем

$$t_x - t_{w_H} = \left(t_a - t_{w_H}\right)\frac{ch\left[\left(a^{|} - x\right)\sqrt{\frac{K_{\text{тз}}}{\delta_{\text{ЛП}}\lambda_{\text{ЛП}}}}\right]}{ch\left(a^{|}\sqrt{\frac{K_{\text{тз}}}{\delta_{\text{ЛП}}\lambda_{\text{ЛП}}}}\right)} \tag{2.8}$$

Значение средней по ширине температуры фиксирующих элементов лучепоглощающих пластин разборных листотрубных теплоприюмников можно найти по выражению

$$\bar{t}_a^1 = \frac{1}{a}\int_0^{a^{|}} t_x dx \tag{2.9.}$$

Подставляя t_x из (2,8.) в вырожение (2,9.) и интегрируя его, получаем

$$\bar{t}_a^1 = t_{w_H} + \left(t_a - t_{w_H}\right)\eta_{\text{эф}} \tag{2.10}$$

где:

$$\eta_{\text{эф}} = \frac{th\left(a^{|}\sqrt{\frac{K_{\text{тз}}}{\delta_{\text{ЛП}}\lambda_{\text{ЛП}}}}\right)}{a^{|}\sqrt{\frac{K_{\text{тз}}}{\delta_{\text{ЛП}}\lambda_{\text{ЛП}}}}} \tag{2.11}$$

Здесь $\eta_{\text{эф}}$ термическая эффективность фиксирующих элементов лучепоглощающей пластины [67].

Поток энергии, получаемой наружной поверхностью стенки теплоотводящего канала теплоприёмника от фиксирующих элементов, определяется по формуле

$$q_{\text{пол}} = K_{\text{тз}}\left(\bar{t}_a^1 - t_{w_{\text{н}}}\right) \qquad (2.12)$$

Выражение (2.3) применимо, когда выполняется условия $\delta_{\text{тз}} < d_{\text{н}}, \delta_{\text{лп}} \ll d_{\text{тз}}$, где $\delta_{\text{тз}}$ - толщина теплового зазора между теплоотводящими каналами и фиксирующими элементами; $\delta_{\text{лп}}$ - толщина материала фиксирующих элементов; $d_{\text{н}}$ - наружный диаметр теплоотводящих каналов. Поскольку $d_{\text{н}} = 0{,}020$ м, $\delta_{\text{тз}} = 0{,}00001 - 0{,}0002$м и $\delta_{\text{лп}} = 0{,}001$ м и выше, указанные условия вполне выполняются

Когда тепловой зазор между фиксирующим элементом и теплоотводящим каналом заполнен теплопроводной или клеевой пастой с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{К}}$ и толщиной $\delta_{\text{К}}$, то $\alpha_{\text{Л}_{\text{тз}}} = 0$ и выражение (2.3.) примет вид

$$\text{К}_{\text{тз}} = \frac{\lambda_{\text{К}}}{\delta_{\text{К}}} \qquad (2.13)$$

Подставляя (2.10.) и (2.3.) в (2.12) после некоторых преобразований получаем

$$q_{\text{пол}} = \left(t_a - t_{w_{\text{н}}}\right) K_{\text{тз}} \eta_{\text{эф}} \qquad (2.14)$$

Как видно из (2.14), учет распределения температуры по ширине фиксирующих элементов лучепоглощающих пластин разборных листотрубных теплоприёмников позволяет уточнить величину энергии, получаемой из солнечного коллектора.

Как было отмечено выше, в существующих методиках [67]

указанный фактор пренебрегался, т.е. считалось, что $\eta_{эф} = 1$.

Зависимость термической эффективности фиксирующих элементов лучепоглощающих пластин ($\eta_{эф}$) и произведения $K_{тз}\eta_{эф}$ от условной толщины теплового зазора между фиксирующим элементом и теплоотводящим каналом приведена на Рис.2 2.

Как следует из Рис.2.2., с увеличением условной толщины теплового зазора ($\delta_{тз}$) значение $\eta_{эф}$ растет, а произведение $K_{тз}\eta_{эф}$ уменьшается. Например, при изменении условной толщины теплового зазора от 0,05 до 0,15 мм значение для воздушного теплового зазора растет от 0,30 до 0,49 (т.е. на 39%), а для теплового зазора, заполненного теплопроводной пастой с коэффициентом теплопроводности 1 Вт/(м.°С), от 0,05 до 0,09 (т.е. на 44%). Снижение $K_{тз}\eta_{эф}$ при этом составляет для воздушного теплового зазора от 171,06 до 95,8 (т.е. на 44%) и для теплового зазора, заполненного теплопроводной пастой, с 1020,1 до 588,9 (т.е. на 42%)

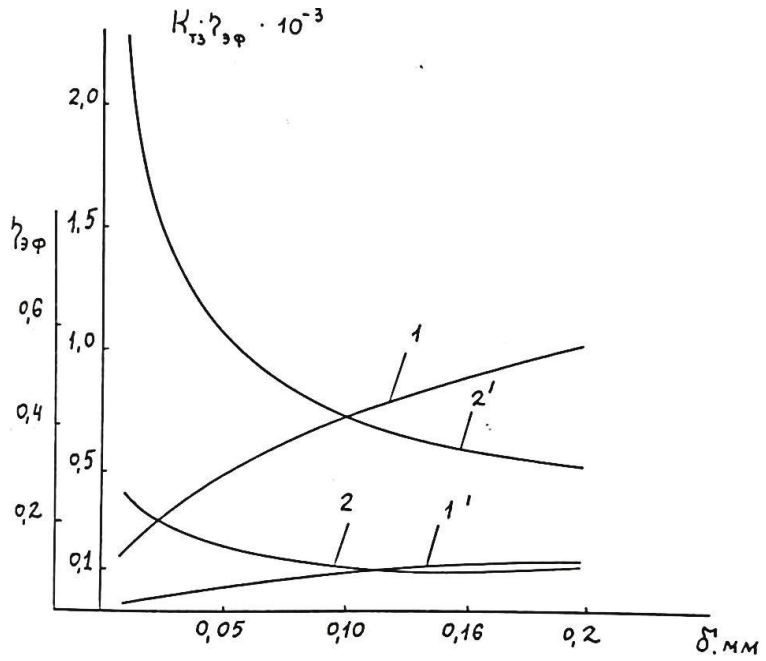


Рис.2.2. Зависимость термической эффективности фиксирующих элементов лучепоглощающих пластин ($\eta_{эф}$) и произведения $K_{тз}\eta_{эф}$ от толщины теплового зазора между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и наружной поверхности стенки теплоотводящих каналов ($\delta_{тз}$):

1, 2 - соответственно $\eta_{эф}$ и $K_{тз}\eta_{эф}$ воздушного теплового зазора;
1', 2' - то же для теплового зазора, заполненного теплопроводной пастой с коэффициентом теплопроводности 1 Вт/(м.°С)

2.2. Корректировка обобщенной зависимости для термической эффективности разборных листотрубных теплоприёмников

Для внесения поправки в обобщенную зависимость для термической эффективности разборных листотрубных теплоприёмников с пластмассовыми теплоотводящими каналами и металлическими лучепоглощающими пластинами воспользуемся принципиальной схемой теплоприёмника (Рис.2.3.) и уравнениями тепловых балансов для отдельных его элементов:

- для лучепоглощающей пластины

$$q_{l,лп} = 2a_{лп}\eta_{лп}\left[q_{поглр} - К_{прр-о}(t_a - t_o)\right] \quad (2.15)$$

- для элементов фиксации лучепоглощающей пластины [65]

$$q_{l,эф} = \left(\frac{\lambda_{тз}}{\delta_{тз}}в_1 + \alpha_{л_{тз}}в_2\right)\eta_{эф}\left(t_a - t_{w_н}\right) \quad (2.16)$$

- для стенки теплоотводящего канала

$$q_{l,тк} = \frac{\lambda_w}{\delta_w}в_3\left(t_{w_н} - t_{w_в}\right) \quad (2.17)$$

- для внутренней поверхности стенки теплоотводящего канала

$$q_{l,тк} = \alpha_{K_{w_в - f}}в_4\left(t_{w_в} - t_f\right) \quad (2.18)$$

В результате совместного решения системы уравнений (2.15.)-

(2.18.) относительно $t_a, t_{w_н}, t_{w_в}$ получим

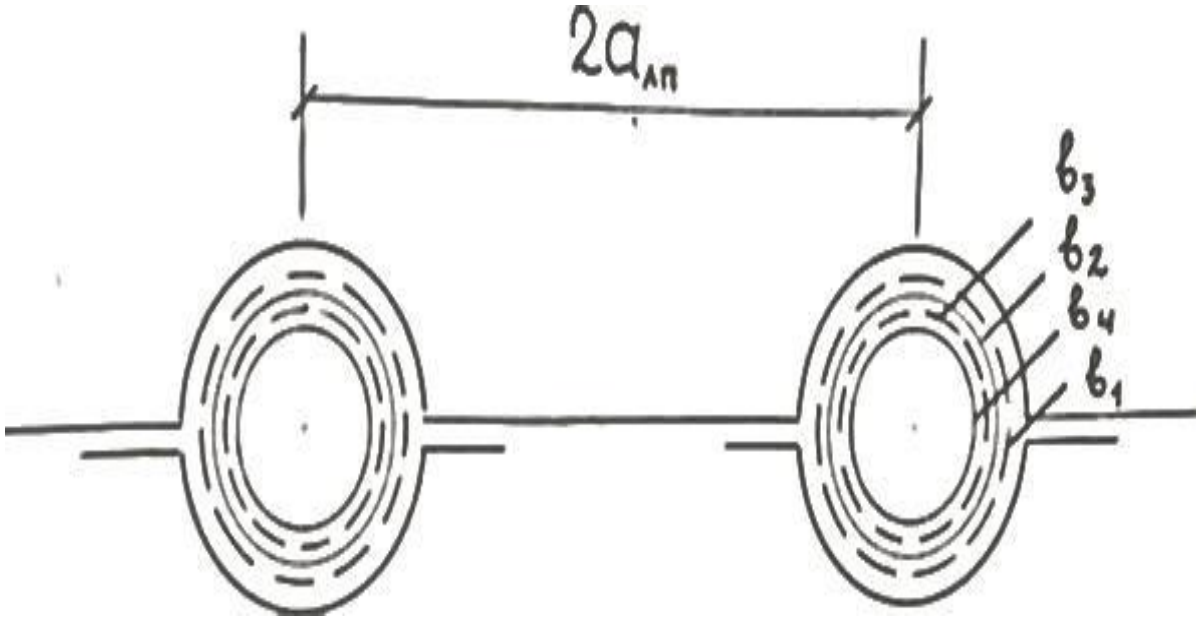


Рис.2.3. Принципиальная схема размещения элементов листотрубного разборного теплоприёмника:

$a_{лп}$ - ширина лучепоглощающей пластины;

в - периметр поперечного сечения /индексы 1, 2, 3 и 4 - соответственно означают: значение между лучепоглощающей пластиной и наружной поверхностью теплоотводящего канала, наружную поверхность теплоотводящего канала, средние значения между наружным и внутренним поперечным сечением теплоотводящего канала и внутреннюю поверхность теплоотводящего канала.

$$\eta_{тп} = \frac{1}{К_{пр р-о}(2a_{лп}+d_н)(A_1+B+C)} \qquad (2.19)$$

где:

$$A_1 = \frac{\frac{1}{2a_{лп}\eta_{лп}}+\frac{К_{пр р-о}}{\left(\frac{\lambda_{тз}}{\delta_{тз}}в_1+\alpha_{л тз}в_2\right)\eta_{эф}}}{\left[1+d_н\left(\frac{1}{2a_{лп}\eta_{лп}}+\frac{К_{пр р-о}}{\left(\frac{\lambda_{тз}}{\delta_{тз}}в_1+\alpha_{л тз}в_2\right)\eta_{эф}}\right)\right]К_{пр р-о}}$$

(2.19а)

$$B = \frac{1}{\frac{\lambda_w}{\delta_w} в_3}; \quad (2.19б)$$

$$C = \frac{1}{\alpha_{K_{w_в - f}} в_4} \quad (2.19в)$$

Как следует из решения (2.19.), учет распределения температуры по ширине фиксирующих элементов лучепоглощающих пластин разборных листотрубных теплоприёмников позволяет внести определенную поправку в формулу расчета термической эффективности теплоприёмника, учитывающую термическую эффективность фиксирующих элементов лучепоглощающих пластин. В свою очередь, как следует из (2.19.), термическая эффективность фиксирующих элементов лучепоглощающих пластин ($\eta_{эф}$) зависит от проводимости теплового зазора между элементами фиксации и теплоотводящими каналами, а также от Коэффициента теплопроводности ширины и толщины материала фиксирующих элементов.

Если учесть, что $\delta_{тз} \ll \delta_{лп}$ и $\delta_{тз} \ll d$, $в_1 \approx в_2 \approx в_{тз}$, то выражение для проводимости теплового зазора может принять вид

$$\left(\frac{\lambda_{тз}}{\delta_{тз}} в_1 + \alpha_{Л_{тз}} в_2\right) = К_{тз} в_{тз} \quad (2.20)$$

Подставляя (2.20.) в (2.19а.) получаем

$$A_2 = \frac{\frac{1}{2а_{лп}\eta_{лп}} + \frac{К_{пр_{р-о}}}{в_{тз} К_{тз} \eta_{эф}}}{К_{пр_{р-о}}\left[1 + d_н\left(\frac{1}{2а_{лп}\eta_{лп}} + \frac{К_{пр_{р-о}}}{в_{тз} К_{тз} \eta_{эф}}\right)\right]} \quad (2.21)$$

В частном случае, когда тепловой контакт между элементами фиксации и теплоотводящим каналом идеальный, т.е. $\delta_{тз} = 0$ выражение (2.19а.) примет вид:

$$A_3 = \frac{1}{К_{пр р-о}(2a_{лп}\eta_{лп}+d_н)} \quad (2.22)$$

которое полностью совпадает с решением, приведенным в [57, 61].

В теплоприёмнике солнечного коллектора с пластмассовыми теплоотводящими каналами отдельные участки, непосредственно поглощающие солнечное излучение ($d_н$) для защиты от воздействия солнечного излучения могут быть полностью покрыты (обхвачены) элементами фиксации лучепоглощающей пластины ($d_н$=0) .В связи с этим выражение (2.19а.) для теплоприёмника с пластмассовыми каналами принимает вид:

$$A_4 = \frac{1}{2a_{лп}\eta_{лп}К_{пр р-о}} + \frac{1}{в_{тз}К_{тз}\eta_{эф}} \quad (2.23)$$

Сопоставление численных значений термической эффективности разборных листотрубных теплоприёмников с учетом распределения температуры по ширине фиксирующих элементов и без него в зависимости от толщины теплового зазора ($\delta_{тз}$) приведено на Рис.2.4.

Расчеты выполнены для разборного листотрубного теплоприёмника с пластмассовым (полиэтиленовым) теплоотводящим каналом,полностью обхваченным фиксирующими элементами лучепоглощающей пластины

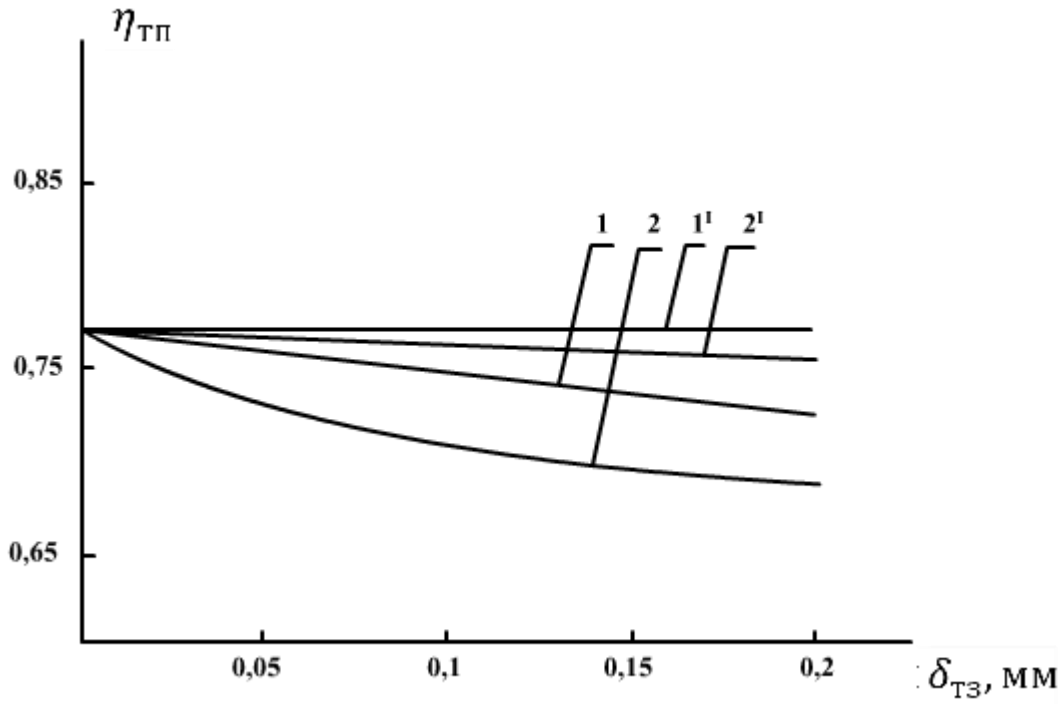


Рис.2.4. Зависимость термической эффективности ($\eta_{тп}$) разборных листотрубных теплоприёмников от толщины теплового зазора ($\delta_{тз}$) между фиксирующими элементами лучепоглощающей пластины и наружной поверхностью стенки теплоотводящих каналов:

1, 2 - соответственно по формулам (1.21) и (2.21.) для воздушного теплового заеора; 1, 2 - то же для клеевого теплопроводного зазора

из листовой стали толщиной 1 мм и шириной 0,056 м с коэффициентом теплопроводности 50 Вт/(м.°С). Ширина фиксирующих элементов (a$^{|}$) 0,0314 м и наружный диаметр теплоотводящих каналов 20 мм, толщина стенок (труб) 2 мм. Значение приведенного (полного) коэффициента тепловых потерь ($К_{пр_{р-о}}$) при этом принято 7,2 Вт/(м^2 °С).

Графические зависимости по Рис.2.4. выполнены для случаев, когда между фиксирующими элементами лучепоглощающей

пластины и наружной поверхности стенки теплоотводящих каналов теплоприёмника имеет место воздушный и клеевой тепловые зазоры соответственно с коэффициентами теплопроводности ($\lambda_{тз}$) 0,028 Вт/(м.°С) и 1 Вт/ (м.°С).

Значение $в_{тз}$ в формулах (2.19), (2.21) и (2.23) в зависимости от толщины теплового зазора определено по формуле [61]

$$в_{тз} = \left(d_{нар} + \delta_{тз}\right)\pi \qquad (2.24)$$

Значения $в_3$ и $в_4$ соответственно составляют 0,0566 и 0,05026м.

Как видно из Рис.2.4. выражения (1.21) и (2.21) дают одинаковый результат лишь при $\delta_{тз}$= 0, т.е. когда термическое контактное сопротивление между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и наружной поверхностью стенки теплоотводящих каналов равно нулю.

С увеличением ($\delta_{тз}$) разница между значениями $\eta_{тп}$, определенными по выражениям (1.21) и (2.21), растет и составляет в среднем 4,5% при изменении $\delta_{тз}$ от 0,01 до 0,2 мм.

Из Рис.2.4. также следует, что замена воздушного теплового зазора между фиксирующими элементами и теплоотводящими каналами клеевой теплопроводной пастой о коэффициентом теплопроводности ($\lambda_к$) 1 Вт/(м.^{0}С) позволяет существенно повысить термическую эффективность разборных листотрувных теплоприёмников.

2.3. Оценка снижения эффективности в элементах разборных листотрубных теплоприёмников

Разборные листотрубные теплоприёмники солнечных

коллекторов для подогрева воды, хотя и малометаллоёмкие, и коррозионно стойкие по сравнению с известными теплоприёмниками, например, из стальных штампо-сварных радиаторов типа РСГ-2 [68], но имеют несколько низкую (на 15-20%) эффективность.

Одна из причин сравнительно низкой эффективности разборных листотрубных теплоприёмников объясняется потерей эффективности при передаче поглощенного солнечного тепла из одного элемента в другой в следствие разборности конструкции.

Для оценки снижения эффективности в элементах разборных листотрубных теплоприёмников солнечных коллекторов воспользуемся выражением для определения термической эффективности теплоприёмников (2.21)

Как показывают выполненные нами исследования, оценка снижения эффективности в тех или иных элементах разборного листотрубного теплоприёмника сводится к определению относительной термической эффективности теплоприёмника. Под относительной термической эффективностью теплоприёмника понимается отношение термической эффективности реального теплоприёмника $(\eta_{\text{тп}_\text{р}})$ к термической эффективности теплоприёмника с идеальной тепловой характеристикой рассматриваемого i - го элемента $(\eta_{\text{тп}_\text{и}})$, относительно которого определяется термическая эффективность теплоприёмника, т.е.

$$\eta_{\text{опт}}^{(i)} = \frac{\eta_{\text{пт}_\text{р}}}{\eta_{\text{тп}_{\text{и}(i)}}} \qquad (2.25)$$

а) Оценка снижения эффективности в тепловом зазоре между

элементами фиксации лучепоглощающих пластин и теплоотводящими каналами

Одним из факторов, существенно влияющих на общую эффективность разборных листотрубных теплоприёмников с пластмассовыми теплоотводящими каналами, является снижение эффективности в тепловом зазоре между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и теплоотводящим каналом [69].

Выражения для определения термической эффективности реального и идеального (т.е. с нулевым термическим сопротивлением теплового зазора между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и теплоотводящим каналом) теплоприёмника имеют вид

$$\eta_{\text{тп}_\text{р}} = \frac{1}{2a_{\text{лп}}К_{\text{пр}_{\text{р-о}}}(A_4+B+C)} \tag{2.26}$$

и

$$\eta_{\text{тп}_\text{и}} = \frac{1}{1+2a_{\text{лп}}К_{\text{пр}_{\text{р-о}}}(B+C)} \tag{2.27}$$

Подставляя (2.26.) и (2.27.) в (2.25.), после некоторых алгебраических преобразований имеем

$$\eta_{\text{отн}}^{\text{тз}} = 1 - \frac{1}{1+К_{\text{тз}}в_{\text{тз}}\eta_{\text{эф}}\left(\frac{1}{2a_{\text{лп}}\eta_{\text{лп}}К_{\text{пр}_{\text{р-о}}}}+B+C\right)} \tag{2.28}$$

При написании выражений (2.26) - (2.28) учтено, что вся наружная поверхность теплоотводящего канала обхвачена элементами фиксации.

Значения $\eta_{\text{лп}}$ и $\eta_{\text{эф}}$ входящие в (2.28), определяются из формул (1.20) и (2.11)

Зависимость $\eta_{\text{отн}}^{\text{тз}}$ от $К_{тз}в_{тз}\eta_{эф}$ при $К_{пр_{р-о}}$=7,2 Вт/(м^2.°С), $\alpha_{к_{w_{в}-f}}$=200 Вт/(м^2.°С), для теплоприёмников, лучепоглощающая пластина которых изготовлена из меди, алюминия и стали ($a_{лп}$= 0,1 м, $\delta_{лп}$=1 мм), а теплоотводящие каналы из теплостойкой полиэтиленовой трубы наружным и внутренним диаметрами соответственно 20 и 16 мм (λ_w=0,44 Вт/(м.°С) $\delta_w = 0{,}002$м, $в_3 = 0{,}0566$ м и $в_4$=0,05026 м) приведена на Рис.2.5.

Как следует из Рис.2.5., основные снижения эффективности листотрубного разборного теплоприёмника в основном приходятся на диапазон изменения величины $К_{тз}в_{тз}\eta_{эф}$ от 10 до 40 Вт/(м^2.°С), что соответствует условной толщине воздушного теплового зазора 0,015- 0,10 мм и больше.

Заполнение рассматриваемого теплового зазора теплопроводной пастой даже с незначительным коэффициентом теплопроводности (1 Вт (м.°С), как отмечено выше, существенно уменьшает снижение эффективности в рассматриваемом тепловом зазоре разборных листотрубных ТП.

б) Оценка снижения эффективности в лучепоглощающей пластине теплоприёмника

Эффективность лучепоглощающей пластины существенно влияет на общую эффективность разборных теплоприёмников. Как следует из (1.20.), чем выше коэффициент теплопроводности материала лучепоглощающей пластины, тем выше её термическая эффективность.

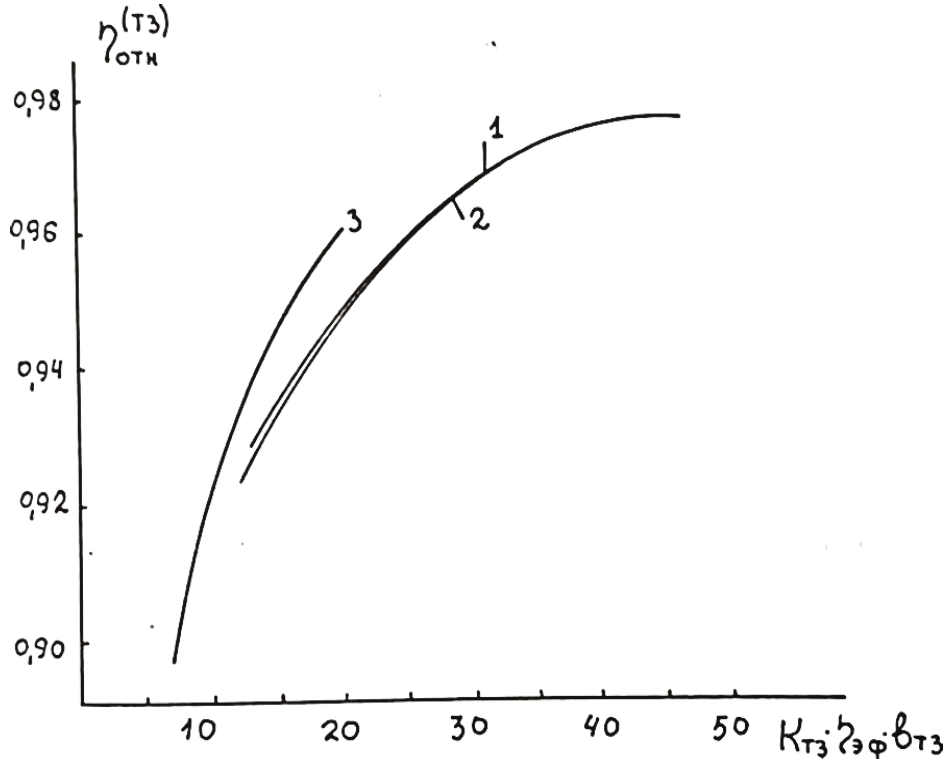


Рис.2.5. Зависимость относительной термической эффективности теплового зазора между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и наружной стенки теплоотводящих каналов ($\eta_{отн}^{(тз)}$) от произведения $К_{тз} в_{тз} \eta_{эф}$

1, 2 - и 3 соответственно для лучепоглощающей пластины из меди, алюминия и стали

По этой причине лучепоглощающие пластины разборных листотрубных теплоприёмников, как правило, изготавливаются из высоко теплопроводных материалов.

Выражение для термической эффективности разборного листотрубного теплоприёмника с идеальной лучепоглощающей пластиной (т.е. $\eta_{лп}$=1) имеет вид

$$\eta_{н}^{лп} = \frac{1}{2a_{лп} К_{прр-о} (A_4 + B + C)} \qquad (2.29)$$

Подставляя (2.26) и (2.29) в (2.25) получим

$$\eta_{\text{отн}}^{\text{лп}} = 1 - \frac{1-\eta_{\text{лп}}}{2a_{\text{лп}}К_{\text{пр}р-о}\eta_{\text{лп}}(A_4+B+C)} \quad (2.30)$$

На Рис.2.6. приведена графическая зависимость $\eta_{\text{отн}}^{\text{лп}}$ от $\eta_{\text{лп}}$ при $К_{\text{тз}}в_{\text{тз}}\eta_{\text{эф}}$=40 Вт/(м^2.°С), $К_{\text{пр}р-о}$=7,2 Вт/(м^2.°С), $\alpha_{к_{w_в-f}}$=200 Вт/(м^2.°С) для разборного листотрубного теплоприёмника с теплоотводящими каналами из полиэтиленовой трубки (λ_w=0,44 Вт/(м.°С) диаметром 20 мм и толщиной стенки δ_w = 2 мм.

Как следует из Рис.2.6., при именении $\eta_{\text{лп}}$ от 0,6 до 1,0 значения $\eta_{\text{отн}}^{\text{лп}}$ соответственно увеличиваются.

в) Оценка снижения эффективности в стенке теплоотводящего канала разборного листотрубного теплоприёмника. Снижения эффективности в стенке теплоотводящего канала в основном зависят от коэффициента теплопроводности материала стенки каналов [70].

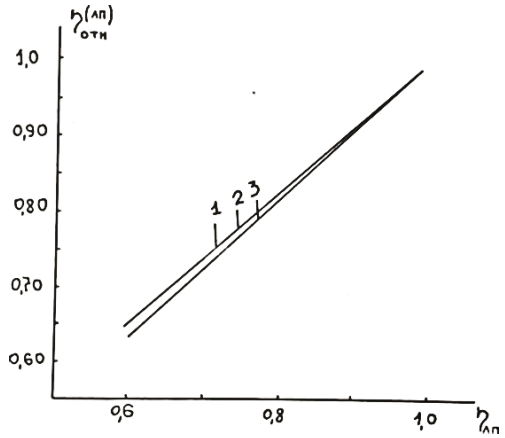


Рис.2.6. Зависимость относительной термической эффективности лучепоглощающей пластины ($\eta_{\text{отн}}^{\text{лп}}$) от её термической эффективности ($\eta_{\text{лп}}$):

1, 2 и 3 - соответственно для лучепоглощающей пластины из меди, алюминия и стали

Аналогично (2.28.) и (2.30.) запишем выражение для относительной термической эффективности для стенки теплоотводящего канала

$$\eta_{\text{отн}}^{w} = 1 - \frac{\text{B}}{\text{A}_4+\text{B}+\text{C}} \qquad (2.31)$$

Графическая зависимость $\eta_{\text{отн}}^{w}$ от $\frac{\lambda_w}{\delta_w}$в$_3$, при $a_{\text{лп}} = 0{,}1$м, К$_{\text{тз}}$в$_{\text{тз}}\eta_{\text{эф}}$=40 Вт/(м^2.°С), К$_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}$=7,2 Вт/(м^2.°С), приведена на Рис.2.7.

Как следует из рис.2.7. при изменении δ_w от 1 до 2 мм изменение $\frac{\lambda_w}{\delta_w}$в$_3$ составляет от 0,0000589 до 0,0001178 для медной, от 0,0000883 до 0,0001766 для алюминиевой, от 0,000353 до 0,000706 для стальной и от 0,04015 до 0,0803 для пластмассовой (полиэтиленовой) трубки.

Из Рис.2.7. также следует, что относительное уменьшение термической эффективности теплоприёмника, связанное с термическим сопротивлением стенки теплоотводящего канала, весьма ничтожно и им можно пренебречь.

Кроме того из Рис.2.7. следует, что из-за низкой теплопроводности пластмассовых материалов относительная эффективность теплоприёмника с пластмассовыми теплоотводящими каналами снижается с 0,96 до 0,93 (т.е. на 3%).

г) Оценка снижения эффективности на внутренней поверхности стенки теплоотводящего канала.

Выражение для относительной термической эффективности на внутренней поверхности стенки теплоотводящего канала разборных листотрубных теплоприёмников имеет вид:

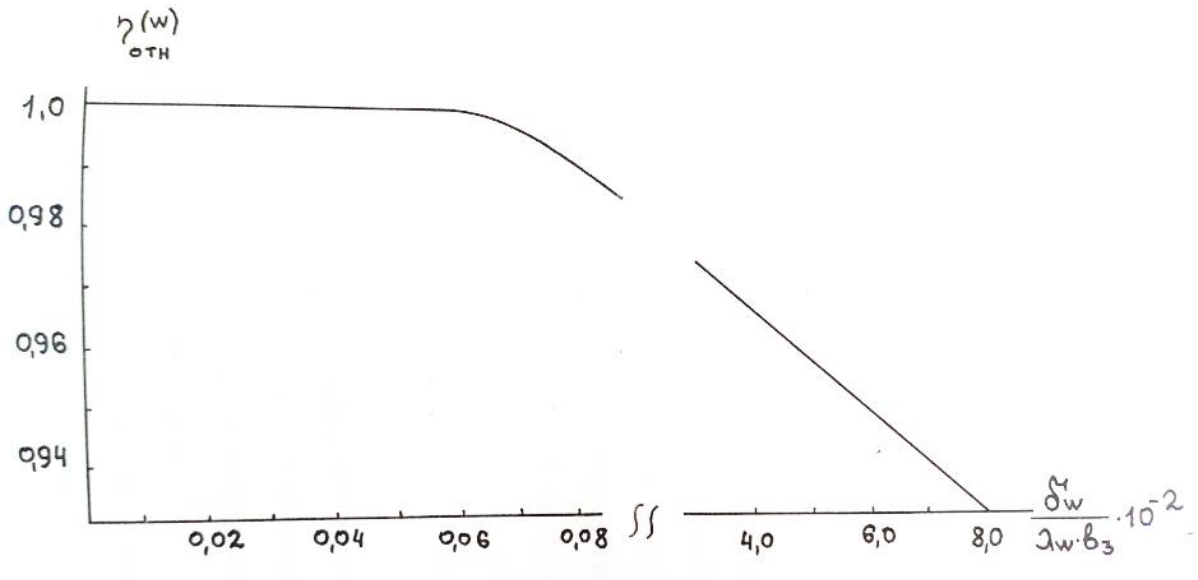


Рис.2.7. Зависимость относительной термической, эффективности стенки теплоотводящих каналов ($\eta_{\text{отн}}^{(w)}$) от отношения $\frac{\lambda_w}{\delta_w}$в$_3$ при $a_{\text{лп}} = 0{,}1$м, К$_{\text{тз}}$в$_{\text{тз}}\eta_{\text{эф}}$=40 Вт/(м^2.°С), К$_{\text{пр}_{\text{р-о}}}$=7,2 Вт/(м^2.°С), $\alpha_{\text{к}_{w_{\text{в}}-f}}$= 200 Вт/(м^2.°С)

$$\eta_{\text{отн}}^{\alpha_{\text{к}}} = 1 - \frac{\text{C}}{\text{A}_4+\text{B}+\text{C}} \qquad (2.32)$$

Зависимость $\eta_{\text{отн}}^{\alpha_{\text{к}}}$ от $\alpha_{\text{к}_{w_{\text{в}}-f}}$ при К$_{\text{пр}_{\text{р-о}}}$=7,2 Вт/(м^2.°С), $a_{\text{лп}} =$ 0,1м, К$_{\text{тз}}$в$_{\text{тз}}\eta_{\text{эф}}$=40 Вт/(м^2.°С) λ_w=0,44 Вт/м.°С, δ_w=0,002 м, в$_3$=0,0566 м и в$_4$=0,05026 м приведена на Рис.2.8

Из Рис.2.8. следует, что при увеличении $\alpha_{\text{к}_{w_{\text{в}}-f}}$ с 200 до 1000 Вт/(м^2 . С) увеличение относительной эффективности теплоприёмника, лучепоглощающая пластина которого изготовлена из меди, алюминия и стали, составляет соответственно от 0,8957 до 0,9772, от 0,8985 до 0,9779 и от 0,9173 до 0,9823.

Из Рис.2.8. также следует, что дальнейшее увеличение более чем 1000 Вт/(м^2.°С) не имеет смысла, т.к. увеличение при этом

незначительное.

Из Рис.2.8. также видно, что выражение (2.32) в дальнейшем может быть использовано для оптимизации расхода теплоносителя через теплоотводящие каналы листотрубных теплоприёмников, изготовленные из различных материалов.

Из Рис.2.5-2.8 видно, что снижение эффективности в отдельных элементах разборного листотрубного теплоприёмника однозначно определяются величиной термического сопротивления этих элементов. Следовательно повышение общей термической эффективности разборных листотрубных теплоприёмников связано с уменьшением термического сопротивления их отдельных элементов и узлов.

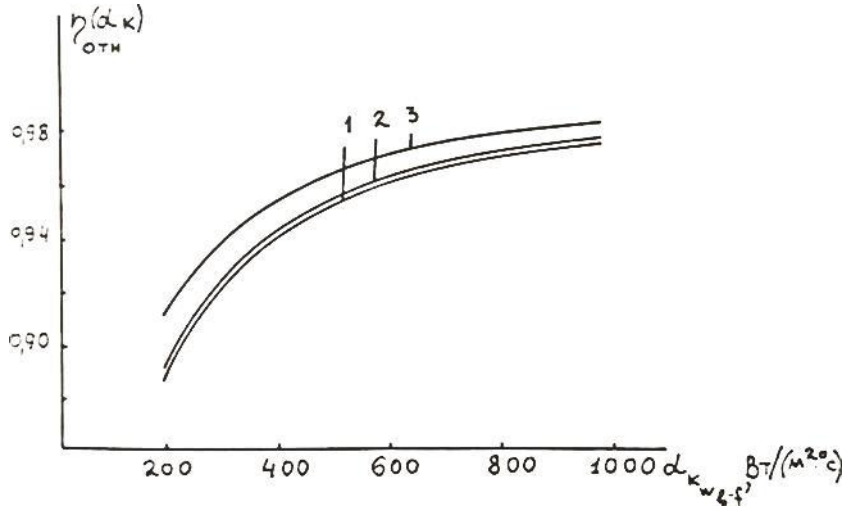


Рис.2.8. Зависимость относительной термической эффективности внутренней поверхности стенки теплоотводящих каналов ($\eta_{\text{отн}}^{\alpha_{\text{к}}}$) от коэффициента конвективного теплообмена на ней:

1, 2 и 3 - соответственно для лучепоглощающей пластины из меди, алюминия и стали при $К_{пр_{р-о}}$*=7,2 Вт/(м².°С),* $a_{лп} = 0{,}1м$, $К_{тз}в_{тз}\eta_{эф}$*=40 Вт/(м².°С)* λ_w*=0,44 Вт/м.°С,* $\delta_{пл}$*=0,002 м*

2.4. Определение снижения температуры в элементах разборного листотрубного теплоприёмника

Одной из основных характеристик солнечных коллекторов является конечная температура получаемой в них горячей воды.

В свою очередь температура получаемой горячей воды зависит от температуры отдельных элементов теплоприёмника, через которые передается поглощенное солнечное тепло, и их термических сопротивлений.

В связи с этим представляет интерес определение снижения температуры в элементах разборных листотрубных теплоприёмников.

Для определения разности температур в различных элементах листотрубного разборного теплоприёмника воспользуемся балансовыми уравнениями для каждого участка теплоприёмника [65].

а) Снижение температуры в лучепоглощающей пластине.

Из распределения температуры по ширине лучепоглощающей пластины разборного листотрубного теплоприёмника солнечного коллектора согласно [66]

$$t_x - t_a = \left(t_a + \frac{q_{\text{погл}}}{\text{К}_{\text{пр}\text{р}-\text{о}}} - t_a\right)\left[1 - \frac{ch\left(x\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}\text{р}-\text{о}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)}{ch\left(a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}\text{р}-\text{о}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)}\right] \qquad (2.33)$$

для её серидины (т.е. x=0) имеем

$$t_{x-0} - t_a = \left(t_0 + \frac{q_{\text{погл}}}{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}} - t_a\right)\left[1 - \frac{1}{ch\left(a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)}\right] \qquad (2.34)$$

Как следует из (2.34), разность между максимальной температурой лучепоглощающей пластины (т.е. в её середине) и температурой в точке её контакта с элементами фиксации (x=a) при прочих равных условиях зависит от параметра $1\text{-}1/\ ch\left(a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)$ т.е. от половины ширины лучепоглощающей пластины ($a_{\text{лп}}$) коэффициента теплопроводности ($\lambda_{\text{лп}}$), толщины ($\delta_{\text{лп}}$) материала лучепоглощающей пластины и приведенного коэффициента тепловых потерь коллектора ($\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}$).

Графическая зависимость параметра $1\text{-}1/\ ch\left(a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)$ от величины $a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}$ приведена на Рис.2.9.

Здесь видно, что с увеличением значения $a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}$ от 0,4 до 1,2 (т.е. в 3 раза) значение $1\text{-}1/\ ch\left(a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)$ соответственно увеличивается от 0,08 до 0,45 (т.е. в 5,6 раза).

Воспользовавшись графической зависимостью параметра $1\text{-}1/\ ch\left(a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)$ от $a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}$ по рис.2.9., можем установить снижение температуры в лучепоглощающей пластине при контактных значениях величины $\left(t_0 + \frac{q_{\text{погл}}}{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}} - t_a\right)$

Например, при $q_{погл}$= 420 Вт/м^2, $\eta_{опт}$=0,6, t_o=30°С, t_a=50°С, $К_{пр_{р-о}}$=7,2 Вт/(м^2.°С) снижение температуры в лучепоглощающей пластине разборного листотрубного теплоприёмника шириной 2 а=0,2 м и толщиной 1мм составляет 4,2°С для медной, 6,0°С - алюминиевой и 17,2°С для стальной лучепоглощающих пластин.

б) Разность температур элементов фиксации лучепоглощающей пластины и наружной поверхности стенки теплоотводящего канала

Полезная энергия, получаемая наружной поверхностью стенки теплоотводящего канала от элементов фиксации лучепоглощающей пластины, отнесенная на единицу длины теплоотводящего канала определяется из формулы (2.16) с учетом (2.12)

С другой стороны количество получаемой элементами фиксации лучепоглощающей пластины полезной энергии, также отнесенной на единицу длины теплоотводящего канала (или лучепоглощающей пластины) может быть определено из уравнения (2.15).

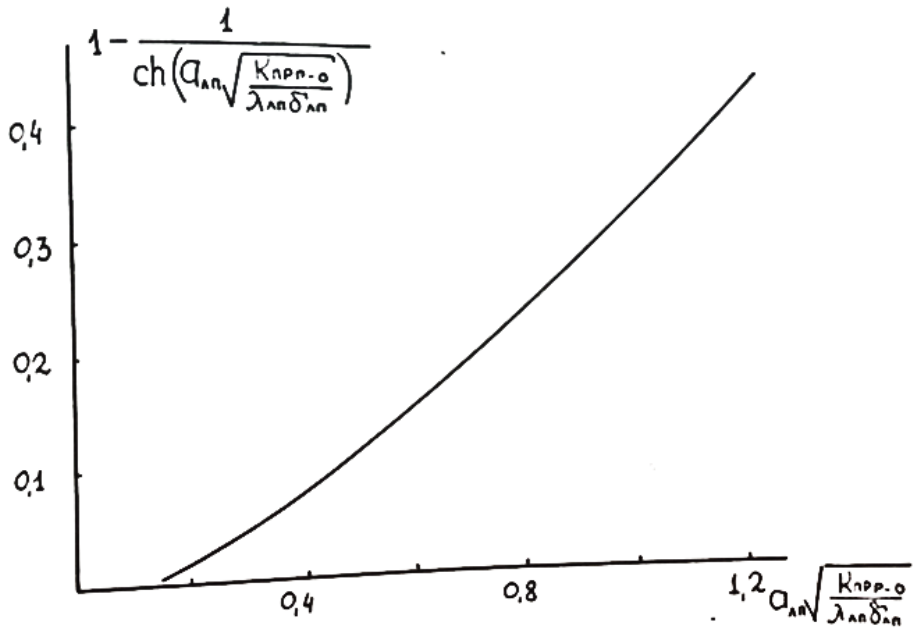


Рис 2.9. Зависимость параметра $1-\frac{1}{ch\left(a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)}$ **от величины**

$a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}$ при $q_{\text{погл}}$= 420 Вт/м^2 , $\eta_{\text{опт}}$=0,6, t_o=30°C, t_a=50°C,

$\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}$=7,2 Вт/(м^2.°C)

Из совместного рассмотрения уравнений (2.12), (2.15) и (2.16) имеем

$$\bar{t}_a^1 - t_{w_{\text{н}}} = \frac{a_{\text{лп}}}{a^{|}}\,\frac{\eta_{\text{лп}}{}^{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}}{\text{К}_{\text{тз}}}\left(t_0 + \frac{q_{\text{погл}}}{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}} - t_a\right) \qquad (2.35)$$

Зависимость от разности температур элементов фиксации лучепог- лощающей пластины и наружной поверхности стенки теплоотводящего канала ($\bar{t}_a^1 - t_{w_{\text{н}}}$) от проводимости зазора между ними ($\text{К}_{\text{тз}}$) приведена на Рис.2.10.

Кривые на Рис.2.10 построены для случая, когда $q_{\text{погл}}$=420 Вт/м^2 , t_o=30°C, t_a=50°C, $\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}$=7,2 Вт/(м^2.°C) $a^{|} = 0{,}0314$м (наружный диаметр трубки 0.02 м), $a_{\text{лп}}$= 0,10 м, лучепоглощающая пластина изготовлена из меди, алюминия и стали. При изменении проводимости теплового зазора между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и теплоотводящими каналами ($\text{К}_{\text{тз}}$) от 500 до 1000 Вт/(м^2.°C) разность температур в рассматриваемом тепловом зазоре уменьшается с 1,63 до 0,81°C для медной, с 1,59 до 0.79°C для алюминиевой и с 1,22 до 0,61°C для стальной лучепоглощающих пластин.

в) Перепад температур наружной и внутренней поверхностей стенки теплоотводящих каналов.

Полезная энергия, переданная через стенки теплоотводящих каналов разборных листотрубных теплоприёмников, определяется по выражению (2.17). С другой стороны эта энергия может быть определена по выражению (2.15).

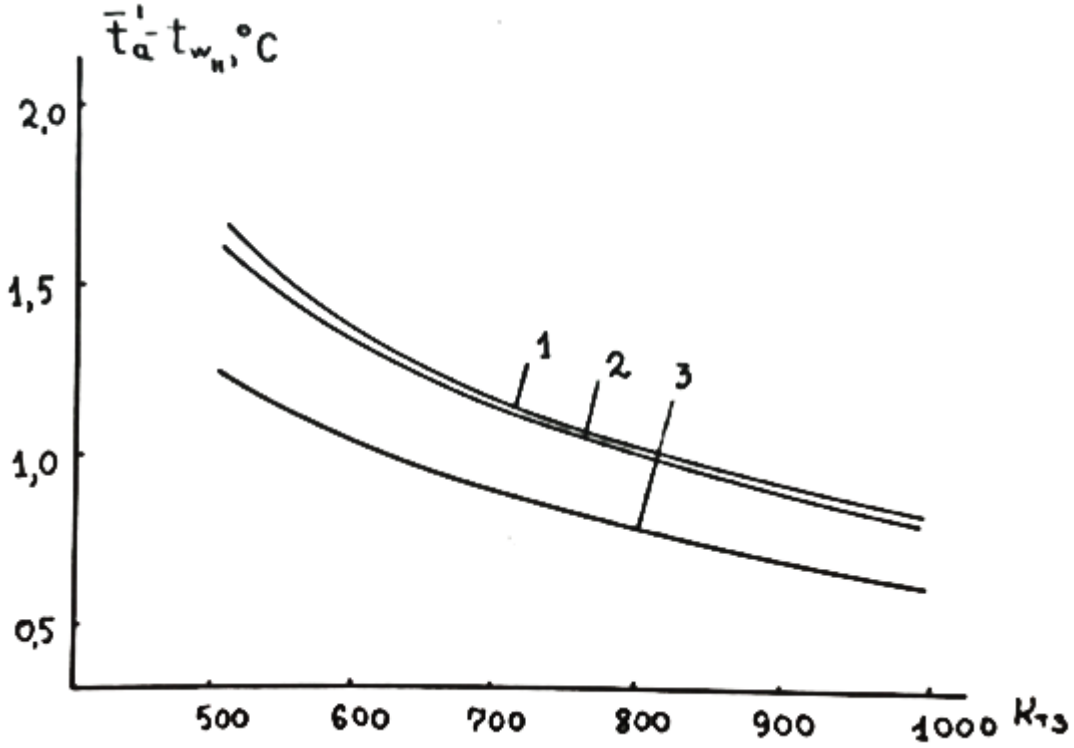


Рис. 2.10. Зависимость разности средних температур элементов фиксации лучепоглощающей пластины и наружной поверхности стенки теплоотводящего канала $\bar{t}_a^1 - t_{w_н}$ от проводимости зазора между ними ($К_{тз}$):

$q_{погл}$=420 Вт/м² , t_o=30°С, t_a=50°С, $К_{пр_{р-о}}$=7,2 Вт/(м².°С) $a^{|} = 0{,}0314$м

Из совместного рассмотрения выражений (2.15) и (2.17) получим

$$t_{w_н} - t_{w_в} = \frac{2a_{лп}\eta_{лп}К_{пр_{р-о}}}{\frac{\lambda_w}{\delta_w}в_з}\left(t_0 + \frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} - t_a\right) \qquad (2.36)$$

Зависимость (2.36) от $\frac{\delta_w}{\lambda_w}в_з$ при $a_{лп} = 0{,}1$м, $\delta_{лп} = 1$мм,

$К_{пр_{р-о}}$=7,2Вт/(м^2.°С) и $\left(t_0 + \frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} - t_a\right)$=38,33^{0}С ($q_{погл}$=420 Вт/м^2 , t_o=30°С, t_a=50°С) для разборного листотрубного теплоприёмника с лучепоглощающими пластинами из меди, алюминия и стали и теплоотводящих каналов из меди, алюминия, стали и пластмассы приведена на Рис.2.11. а. б, в, г.

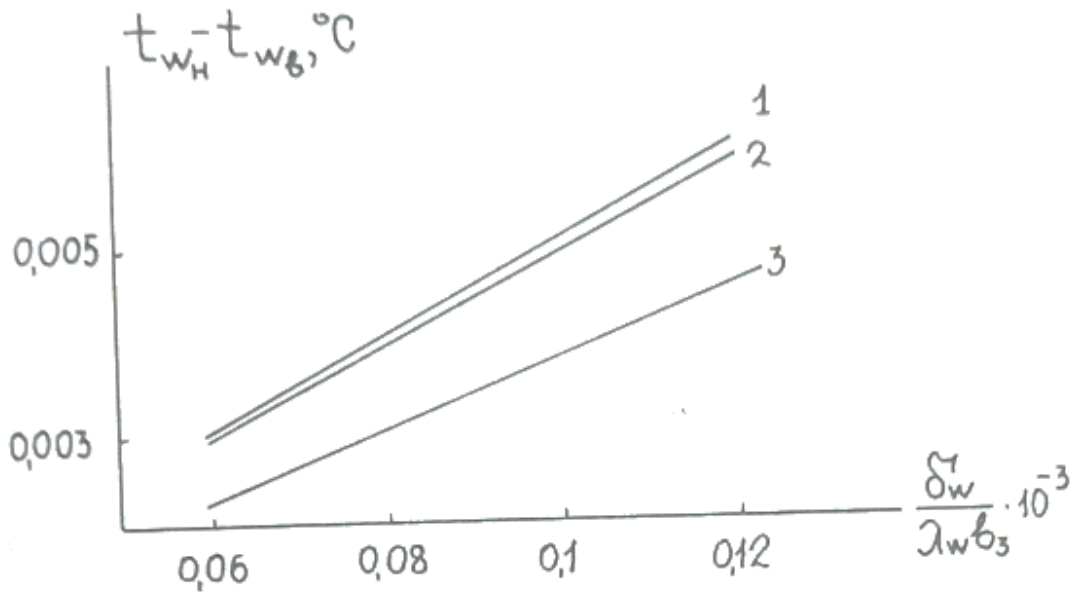
И Рис.2.11 а, б, в видно, что перепады температур наружной и внутренней поверхностей стенки металлических теплоотводящих каналов благодаря их высокой теплопроводности достаточно малы, в практических расчетах могут не учитываться. В то же время, перепад температур на стенках пластмассовых теплоотводящих каналов (Рис.2.II.г) при наружном диаметре 0,02 м и изменении толщины стенки от 1 до 2 мм составляет 2- 4°С для теплоприёмников с медной и алюминиевой лучепоглощающими пластинами и 1,5 -3°С - со стальной лучепоглощающей пластиной.

г) Перепад температур на внутренней поверхности теплоотводящего канала

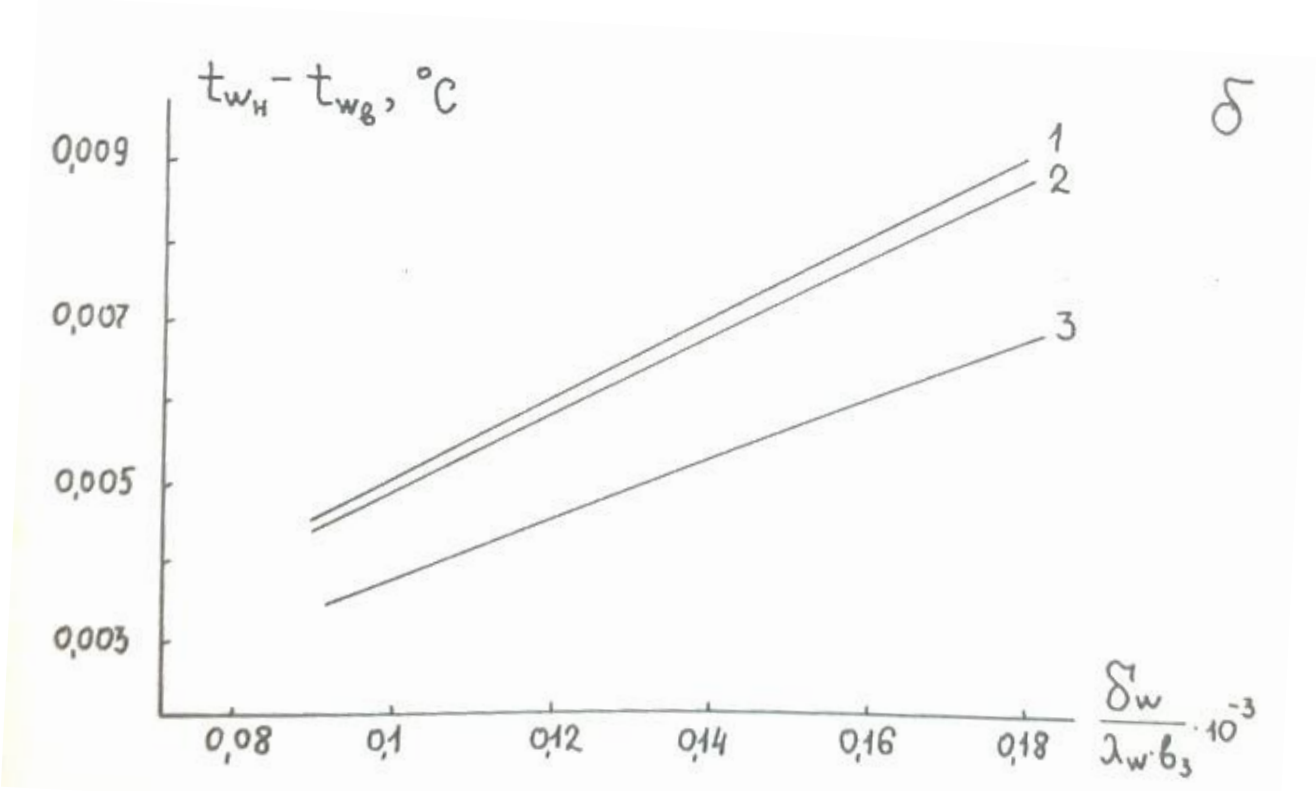
Полезная энергия, полученная теплоносителем от внутренней поверхности стенки теплоотводящего канала, может быть определена по (2.18) или (2.15).

Из совместного решения выражений (2.15) и (2.18) имеем

$$t_{w_в} - t_f = \frac{2a_{лп}\eta_{лп}К_{пр_{р-о}}}{\alpha_{к_{w_в - f}в_4}}\left(t_0 + \frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} - t_a\right) \qquad (2.37)$$


$t_{w_н} - t_{w_в}$, °C
0,005
0,003
1
2
3
0,06
0,08
0,1
0,12
$\frac{\delta_w}{\lambda_w b_3} \cdot 10^{-3}$

а


$t_{w_н} - t_{w_в}$, °C
0,009
0,007
0,005
0,003
1
2
3
0,08
0,1
0,12
0,14
0,16
0,18
$\frac{\delta_w}{\lambda_w \cdot b_3} \cdot 10^{-3}$

б

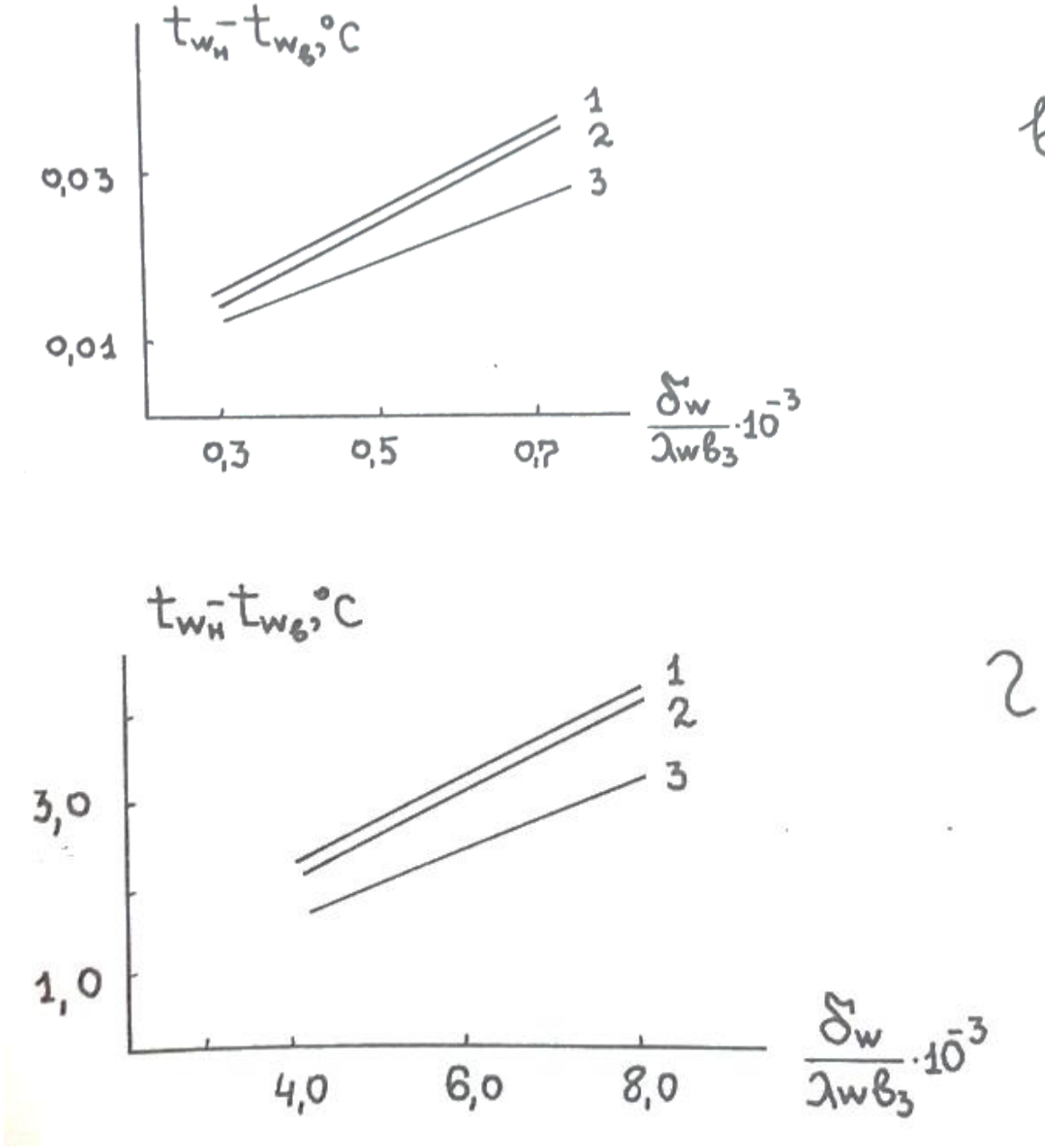


Рис.2.11 Зависимость перепада температур наружной и внутренней поверхностей стенки теплоотводящих каналов $t_{w_н} - t_{w_в}$ от отношения $\frac{\delta_w}{\lambda_{w в_3}}$:

1, 2 и 3 - соответственно для лучепоглощающей пластины из меди, алюминия и стали при $К_{пр_{р-о}}$*=7,2 Вт/(м².°С),* $a_{лп} = 0{,}1$*м,* $\delta_{лп}$*=1 мм и* $\left(\frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} + t_0 - t_a\right)$*=38,33⁰С (*$q_{погл}$*=420 Вт/м² ,* t_o*=30°С,* t_a*=50°С);*

а, б, в, г - соответственно для теплоотводящего канала из меди, алюминия, стали и пластмассы.

Зависимость разности температур внутренней поверхности теплоотводящего канала и теплоносителя $(t_{w_н} - t_{w_в})$ от коэффициента конвективного теплообмена на внутренней поверхности теплоотводящего канала $(\alpha_{к_{w_в - f}})$ при $a_{лп} = 0{,}1$м, $К_{пр_{р-о}}$=7,2 Вт/(м^2.°С), $в_4$=0,05026м и $\left(t_0 + \frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} - t_a\right)$=38,33^{0}С ($q_{погл}$=420 Вт/м^2 , t_o=30°С, t_a=50°С) приведена на Рис.2.12.

Из Рис.2.12. следует, что при повышении $\alpha_{к_{w_в - f}}$ от 200 до 1000 Вт/(м^2.^{0}С) перепад температур на внутренней (теплообменной) поверхности стенки теплоотводящих каналов теплоприёмников, лучепоглощающая пластина которых изготовлена из меди, алюминия и стали, составляет соответственно 5,1 - 1,0°С, 4,9 - 0,9°С и 3,8 - 0,8°С.

д) Разность между средней по ширине температурой лучепоглощающей пластины $(\bar{t}_x)$ и температурой в точке контакта лучепоглощающей пластины с элементами фиксации (t_a).

Средняя температура лучепоглощающей пластины разборных листотрубных теплоприёмников может быть определена из выражения [66]

$$\bar{t}_x = \frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} + t_0 - \eta_{лп}\left(t_0 + \frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} - t_a\right) \qquad (2.38)$$

Вычитая из левой и правой частей уравнения t_a получим

$$\bar{t}_x + t_a = (1 + \eta_{лп})\left(t_0 + \frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} - t_a\right) \qquad (2.39)$$

Зависимость $\bar{t}_x + t_a$ от $\eta_{лп}$ приведена на Рис.2.13.

Если учесть, что для лучепоглощающих пластин, изготовленных из меди, алюминия и стали, шириной 0,1 мм,

толщиной 1 мм при $К_{пр_{р-о}}$=7,2Вт/(м^2.°С) значения $\eta_{лп}$ составляют соответственно 0,927; 0,895 и 0,695, то значения $(\bar{t}_x + t_a)$ при $\left(t_0 + \frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} - t_a\right)$=38,33^{0}С ($q_{погл}$=420Вт/м^2 , t_o=30°С, t_a=50°С) определенные по Рис.2.13., составят соответственно 2,8°С, 4°С и 11,7°С

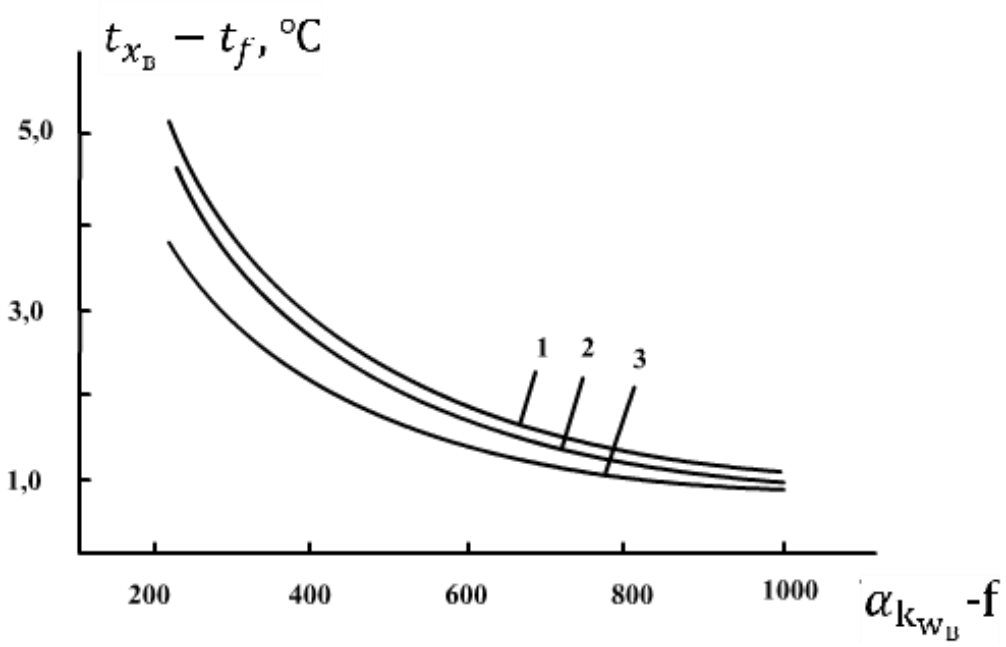


Рис.2.12. Зависимость разности температур внутренней поверхности теплоотводящего канала и теплоносителя от коэффициента конвективного теплообмена на внутренней поверхности теплоотводящего канала ($\alpha_{К_{w_{в-f}}}$) при $а_{лп} = 0,1$м, $К_{пр_{р-о}}$=7,2 Вт/(м^2.°С), $\left(\frac{q_{погл}}{К_{пр_{р-о}}} + t_0 - t_a\right)$=38,33^{0}С ($q_{погл}$=420 Вт/м^2 , t_o=30°С, t_a=50°С);

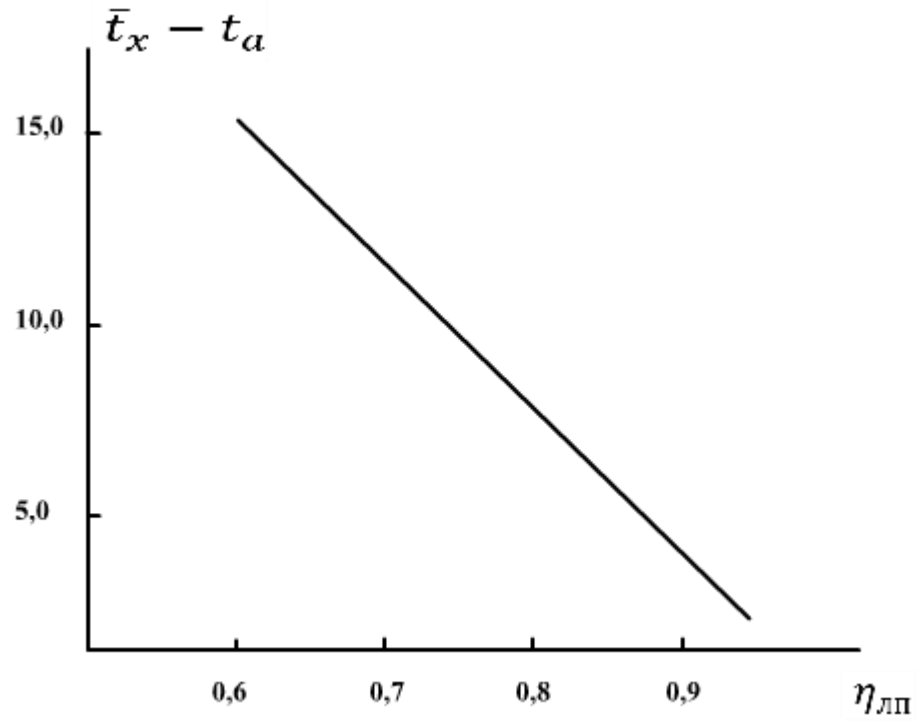


Рис.2.13. Зависимость ($\bar{t}_x - t_a$) от термической коэффициента лучепоглощающей пластины теплоприёмника ($\eta_{лп}$) при $\left(\frac{\mathbf{q}_{погл}}{К_{пр р-о}} + \mathbf{t_0} - \mathbf{t_a}\right)$=38,33^{0}C ($\mathbf{q}_{погл}$=420 Вт/м^2 , t_o=30°C, t_a=50°C)

е) Разность между максимальной (t_x=о) и средней по ширине ($\bar{t}_x$) температурами лучепоглощающей пластины

Из совместного рассмотрения выражений (2.34) и (2.39) получим

$$t_{x-0} - \bar{t}_x = \left(t_0 + \frac{q_{погл}}{К_{пр р-о}} - t_a\right)\left[\eta_{лп} - \frac{1}{ch\left(a_{лп}\sqrt{\frac{К_{пр р-о}}{\lambda_{лп}\delta_{лп}}}\right)}\right] \quad (2.40)$$

Зависимость $(t_{x-0} - \bar{t}_x)$ от параметра $a_{лп}\sqrt{\frac{К_{пр р-о}}{\lambda_{лп}\delta_{лп}}}$

$\left(t_0 + \frac{q_{\text{погл}}}{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}} - t_a\right) = 8{,}33^0\text{C}$ ($\text{q}_{\text{погл}}$=420 Вт/м^2 , $\text{t}_\text{о}$=30°C, $\text{t}_\text{а}$=50°C) и $\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}$=7,2 Вт/(м^2.°C), приведена на Рис.2.14.

Значения $(t_{x-0} - \bar{t}_x)$ для лучепоглощающих пластин, изготовленных из меди, алюминия и стали, шириной 0,1 м, толщиной 1 мм, определенные с помощью графика по Рис.2.14 соответствующим учетом значений $\eta_{\text{лп}}$, $a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}$ и $\frac{1}{ch\left(a_{\text{лп}}\sqrt{\frac{\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}}{\lambda_{\text{лп}}\delta_{\text{лп}}}}\right)}$ составляют соответственно 1,38°C; 1,97°C и 5,47°C

2.5. Оптимизация межтрубного расстояния листотрубного теплоприёмника с пластмассовыми теплоотводящими каналами

Ввиду низкой теплопроводности пластмассы для изготовления солнечных коллекторов практически не применяются, за исключением солнечных коллекторов с теплоприёмниками из пластмассовых труб, уложенных плотно друг к другу [65].

Основной недостаток стальных и алюминиевых теплоприёмников солнечных коллекторов - низкая коррозионная стойкость и высокая металлоёмкость (для стали).

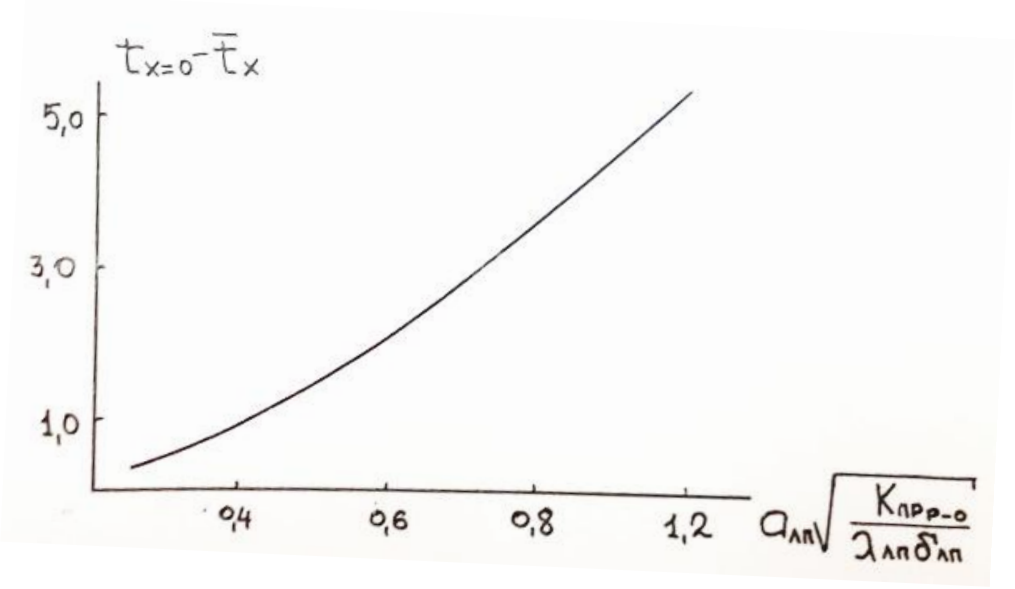


Рис.2.14. Зависимость $(\bar{t}_{x=0}-\bar{t}_x)$ от параметра $a_{лп}\sqrt{\frac{K_{пр\,р-о}}{\lambda_{лп}\delta_{лп}}}$ 420 Вт/м^2 ($q_{погл}$= , t_o=30°С, t_a=50°С) и $K_{пр_{р-о}}$=7,2Вт/(м^2.°С),

С целью повышения коррозионной стойкости, снижения металлоёмкости и предотвращения разрушения теплоприёмника в результате замерзания теплоносителя (воды) в его каналах (в ночные часы зимой) нами разработана конструкция теплоприёмника с пластмассовым теплоотводящим каналом и металлической (стальной) лучепоглощающей пластиной.

Для оптимизации межтрубного расстояния (ширины лучепоглощающей пластины) теплоприёмника с теплоотводящими каналами из пластмассовых труб воспользуемся методикой [71].

Масса теплоприёмника при этом складывается из массы лучепоглощающей пластины (включая часть пластины, находящейся в тепловом контакте с теплоотводящими каналами, и прижимные присобления, обеспечивающие надежный тепловой контакт между пластиной и каналом) $M_{дп}$ и массы пластмассовых теплоотводящих каналов (труб) $M_{тр}$:

$$М_{тп} = М_{лп} + М_{тр} \quad (2.41)$$

В отличие от [71] в разработанном нами теплоприёмнике теплоотводящие каналы размещаются в середине лучепоглощающей пластины в высштампованном желобке с кривизной, соответствующей наружному диаметру теплоотводящего канала.

В связи с этим

$$М_{лп} = 2\rho_{лп}\delta_{лп}n\left(a_{лп} + a^{|}\right) \quad (2.42)$$

$$М_{тр} = m_{тр} \cdot n \quad (2.43)$$

где: $\rho_{лп}$,$\delta_{лп}$- соответственно плотность материала (кГ/м^3) толщина лучепоглощающей пластины, м;

n - число теплоотводящих каналов, отнесенных к единице ширины теплоприёмника 1/м;

$m_{тр}$ - масса одного погонного метра единичного теплоотводящего канала, кГ/(м шт).

Подставляя выражения (2.42) и (2.41), получим

$$М_{тп} = n\left[2\rho_{лп}\delta_{лп}\left(a_{лп} + a^{|}\right) + m_{тр}\right] \quad (2.44)$$

Термическая эффективность разборного листотрубного теплоприёмника солнечного коллектора с пластмассовыми теплоотводящими каналами определяется по (2.23.). Отношение термической эффективности теплоприёмника к её массе равно

$$\frac{\eta_{тп}}{М_{тп}} = \frac{\frac{1}{2a_{лп}К_{пр}{}_{р-о}(А_4+В+С)}}{n\left[2\rho_{лп}\delta_{лп}(a_{лп}+a^{|})+m_{тр}\right]} \quad (2.45)$$

Как следует из отношения (2.45), для тепломеханической

оптимизации ширины лучепоглощающей пластины теплоприёмника ($a_{\text{лп}}$) достаточно установить зависимость отношения $\frac{\eta_{\text{тп}}}{\text{М}_{\text{тп}}}$ от $a_{\text{лп}}$.

Число теплоотводящих каналов n =(2.42) - (2.45) определяется из числа и ширины лучепоглощающих пластин, приходящихся на 1 м ширины теплоприёмника

$$2a_{\text{лп}} \cdot n = 1, \text{м} \tag{2.46}$$

откуда

$$n = \frac{1}{2a_{\text{лп}}} \tag{2.47}$$

На Рис.2.15. приведена зависимость $\frac{\eta_{\text{тп}}}{\text{М}_{\text{тп}}}$ от половины ширины стальной лучепоглощающей пластины ($a_{\text{лп}}$) с коэффициентом теплопроводности $\lambda_{\text{лп}}$=50 Вт/(м.°С) и толщиной 1 мм для теплоприёмников со стальными и пластмассовыми (из полиэтилена) теплоотводящими каналами наружным диаметром 0,02 м стенками толщиной 2 мм.

С увеличением $\frac{\eta_{\text{тп}}}{\text{М}_{\text{тп}}}$ пиковые участки графиков, т.е. оптимальные значения $a_{\text{лп}}$, смещаются влево. Оптимальное значение для теплоприёмников со стальными теплоотводящими каналами 0,086 м, полиэтиленовыми 0,056 м.

Значение $\frac{\eta_{\text{тп}}}{\text{М}_{\text{тп}}}$ в критической точке для теплоприёмника полиэтиленовым теплоотводящим каналом в 1.4 раза больше, чем со стальным.

2.6. Оптимизация расхода теплоносителя в пластмассовых теплоприёмниках солнечных коллекторов

Как следует из (2.23.), а также (2.32), при прочих равных условиях с увеличением коэффициента конвективного теплообмена на внутренней поверхности стенки теплоотводящих каналов $\alpha_{к w_{в}-f}$ повышается термическая эффективность теплоприёмника ($\eta_{тп}$).

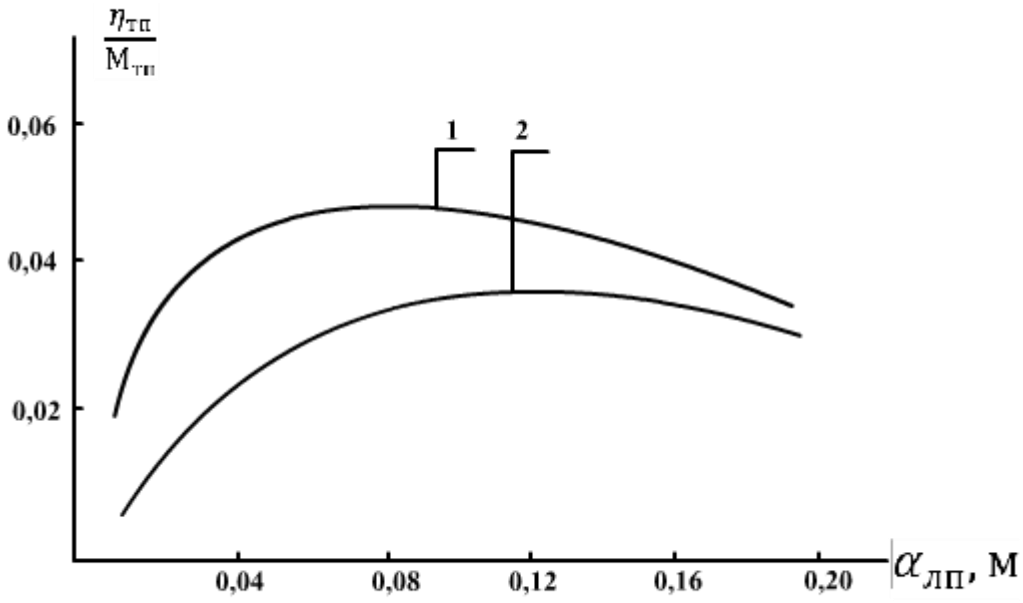


Рис.2.15. Зависимость отношения $\frac{\eta_{тп}}{M_{тп}}$ от половины лучепоглощающей пластины ($а_{лп}$):

1 и 2 - соответственно для теплоотводящих каналов из полиэтилена ($\rho_{пл}$=950 кг/м^3, $\lambda_{лп}$=0,44 Вт/(м.°С)) и стали ($\rho_{лп}$=7900 кг/м^3, $\lambda_{пл}$=50Вт/(м.^{0}С)) со стенкой толщиной 2 мм

В свою очередь значение $\alpha_{к w_{в}-f}$ зависит от режима и характера течения теплоносителя внутри канала. С другой стороны

увеличение $\alpha_{к_{w_{в}-f}}$ требует повышения расхода теплоносителя через теплоотводящие каналы теплоприёмника. Повышение расхода теплоносителя через теплоотводящие каналы теплоприёмника, как известно, приводит к понижению температуры теплоносителя. Как видно, эти два фактора (расход и температура теплоносителя) находятся в противоречии, поскольку с увеличением расхода теплоносителя понижается температура в каналах и наоборот. Поэтому практически интересно установить влияние расхода и температуры теплоносителя на величину $\alpha_{к_{w_{в}-f}}$, а затем на $\eta_{тп}$. Из графических зависимостей $\alpha_{к_{w_{в}-f}}$ и $\eta_{тп}$ от расхода теплоносителя G- определим оптимальный расход теплоносителя через теплоотводящие каналы теплоприёмника.

В качестве расчетного выражения для установления графической зависимости $\eta_{тп}$ от $\alpha_{к_{w_{в}-f}}$ воспользуемся выражением (2.23)

В связи с тем, что теплоотводящие каналы рассматриваемого листотрубного теплоприёмника изготовлены из полиэтиленовой трубки с эквивалентным диаметром равным внутреннему диаметру теплоотводящего канала (0,016 м).

Подставляя численные значения параметров, входящих в формулу (2.23.): $К_{пр_{р-о}}$=7,2 Вт/(м^2.°С), ($a_{лп}$=0,056 м, оптимальные при толщине лучепоглощающей пластины 1мм, $К_{тз}в_{тз}\eta_{эф}$=40 Вт/(м^2.°С) λ_w=0,44 Вт/м.°С, $\delta_{пл}$=0,002 м, $в_3$=0,0566 м и $в_4$=0,05026м. При этом термическая эффективность лучепоглощающей пластины

($\eta_{\text{лп}}$) согласно (1.20.) определяется так

$$\eta_{\text{тп}} = \frac{1{,}24}{1{,}526+\frac{19{,}9}{\alpha_{\text{к}_{w_{\text{в}}-f}}}} \tag{2.48}$$

Коэффициент конвективной теплоотдачи внутренней поверхности теплоотводящих каналов теплоприёмника $\alpha_{\text{к}_{w_{\text{в}}-f}}$ определяется в зависимости от характера и режима теплоносителя.

Как показывают расчеты, при расходе теплоносителя через один змеевикообразный теплоприёмник 0,005 до 0,10 м^3/ч линейная скорость теплоносителя в каналах составляет 0,00696÷0,14 м/с, а критерий Рейнольдса Re в зависимости от средней температуры теплоносителя в каналах (от 20 до 50°С) составляет от 110,2 до 4044,9. Когда произведение (Gr·Re)>10^6, то режим течения теплоносителя является ламинарным, а характер вязкостно-гравитационным

Коэффициент теплоотдачи при ламинарном течении в трубах и каналах может быть определен по критериальной зависимости, предложенной в работе [72]

$$Nu_f = 0{,}17Re^{0{,}33} \cdot Pr^{0{,}43} \cdot Gr^{0{,}1} \left(\frac{Pr_f}{Pr_w}\right)^{0{,}25} \tag{2.49}$$

а при $\left(PePr\,\frac{D}{L}\right) > 10$ - по выражению, предложенному в [73]:

$$Nu_f = 1{,}86\,\left(Re_f \cdot Pr_f \cdot \frac{D}{L}\right)^{0{,}33} \cdot \left(\frac{\mu_f}{\mu_w}\right)^{0{,}24} \tag{2.50}$$

где: μ_f и μ_w - коэффициенты динамической вязкости при средней температуре соответственно теплоносителя и стенки теплоотводящего канала.

Критериальное уравнение (2.50) нельзя использовать для

длинных труб, так как оно может привести к нулевому значению коэффициента теплоотдачи [73]

Зависимость коэффициента конвективного теплообмена на внутренней поверхности стенки теплоотводящего канала $\alpha_{к_{w_{в}-f}}$ от расхода теплоносителя G в листотрубном разборном теплоприёмнике приведена на Рис.2.16.

Подставляя численные значения $\alpha_{к_{w_{в}-f}}$ при соответствующих расходах из Рис.2.16. в формулу (2.48), можем установить зависимость термической эффективности пластмассового разборного листотрубного теплоприёмника ($\eta_{тп}$) от его режима эксплуатации (температуры и расхода теплоносителя через него).

Зависимость термической эффективности рассматриваемого теплоприёмника от расхода (G) и средней температуры ($t_р$) теплоносителя показана на Рис.2.17.

Как следует из Рис.2.17., увеличение расхода теплоносителя через пластмассовый теплоприёмник от 0,005 до 0,04 м^3/ч в зависимости от температуры теплоносителя приводит к заметному повышению $\eta_{тп}$. Дальнейшее увеличение расхода теплоносителя в теплоотводящих каналах теплоприёмника существенно не изменяет $\eta_{тп}$. Расход теплоносителя через пластмассовый теплоприёмник целесообразно увеличить лишь до 0,04 м^3/ч.

Аналогичным образом может быть оптимизирован расход теплоносителя через теплоотводящие каналы теплоприёмников других конструкций

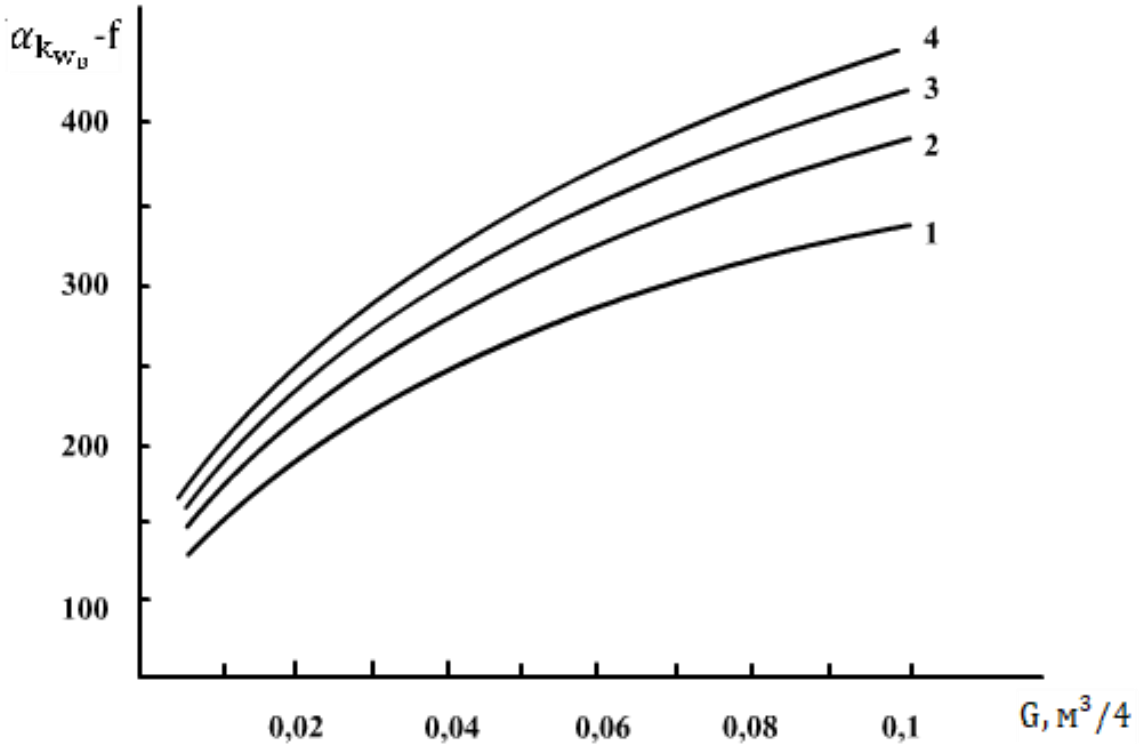


Рис.2.16. Зависимость коэффициента конвективного теплообмена внутренней поверхности стенки теплоотводящего канала листотрубного разборного теплоприёмника ($\alpha_{К_{w_В-f}}$) от расхода теплоносителя G:

1, 2, 3 и 4 - соответственно при средней температуре теплоносителя $t_р$=20; 30; 40 и 50°С

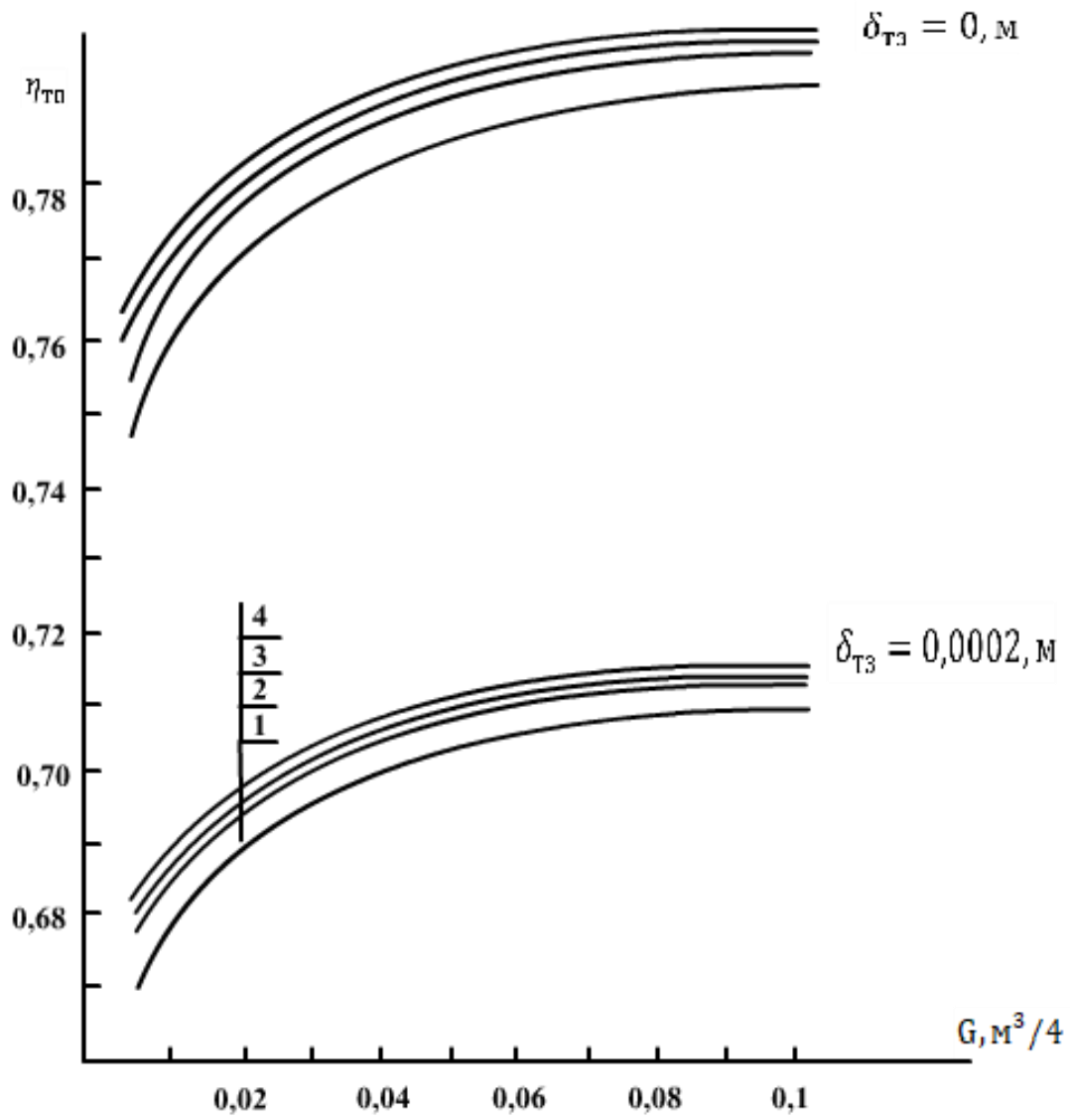


Рис.2.17. Зависимость термической эффективности листотрубного разборного теплоприёмника $\eta_{тп}$ от росхода теплоносителя G при различных значениях толщины воздушного теплового зазора между лучепоглощающей пластиной и наружной поверхностью теплоотводящего канала теплоприёмника ($\delta_{тз}$):

3 и 4 - соответственно при средней температуре теплоносителя t_p =20; 30; 40 и 50°С.

ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С ПЛАСТМАССОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

На основе комплекса выполненных научных исследований по созданию солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами нами разразботаны и испытаны в лабораторных условиях опытные образцы солнечных коллекторов с разборным листотрубным теплоприёмником (со стальной лучепоглощающей пластиной и пластмассовыми теплоотводящими каналами), а также с теплоприёмником, полностью изготовленным из пластмассы (полипропилена) методом экструзии.

Результаты испытаний этих коллекторов сопоставлены с результатами испытаний металлических солнечных коллекторов В.8005 и В.8203 [74], разработанных в Физико-техническом институте НПО «Физика-Солнце» АН Республики Узбекистан в предыдущие годы.

В данной главе приведены результаты натурных исследований эффективности упомянутых двух конструкций солнечных коллекторов и их соспоставление с результатами испытаний коллекторов В.8005 и В.8203.

Целью натурных исследований являлось:

- проверка адекватности расчетно-теоретических и экспериментальных исследований;
- установление фактической эффективности, анализ и обобщение опыта эксплуатации разработанных солнечных коллекторов.

3.1. Методика проведения и обработки результатов опытов

Существующие методы тепловых испытаний низкопотенциальных солнечных коллекторов обобщены в работе [62]. Как показывает анализ, во всех рассмотренных методах значения таких показателей солнечных коллекторов, как эффективность (η), произведения $(\eta_{\text{опт}} \cdot \bar{\eta}_{\text{тп}}), \left(\eta_{\text{опт}} \cdot К_{\text{пр}_{\text{р}-0}}\right)$ без соответствующих изменений и упрощений не могут быть применены для установления средних за день, месяц, сезон значений этих параметров. Определение средних значений этих параметров важно тем, что именно по их величине можно определить фактические ресурсные, а затем технико-экономические показатели.

С учетом этого в данной работе при проведении испытаний и об работке их результатов использован метод, основанный на определении среднедневных значений эффективности солнечного коллектора по [3]

$$\bar{\eta} = \frac{\bar{q}_{\text{пол}}}{\bar{q}_{\text{пад}}} \tag{3.1}$$

где:

$$\bar{q}_{\text{пол}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} G_{f_i} \cdot C_{p_i} \left(t_{f\text{вых}_i} - t_{f\text{вх}_i}\right)}{n \cdot F_{\text{фр}}} \tag{3.2}$$

$$\bar{q}_{\text{пад}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_{\text{пад}}}{n} \tag{3.3}$$

При этом интервалы времени между каждым измерением параметров $\bar{q}_{\text{пад}}, G_f, t_{f\text{вых}}, t_{f\text{вх}}$ и $t_{0_i}^{\partial\text{н}}$ в течение дня должны быть одинаковыми.

Полученные результаты обрабатывались в виде зависимости

$$\bar{\eta} = f\left(\frac{\bar{t}_f - t_0^{\partial}}{\bar{q}_{\text{пад}}}\right) \tag{3.4}$$

где:

$$\bar{t}_f = \frac{\sum_{i=1}^{n} t_{f_i}}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(t_{f\text{вых}_i} - t_{f\text{вх}_i}\right)}{2n} \tag{3.5}$$

$$\bar{t}_0^{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \bar{t}_{0_i}^{\partial}}{n} \tag{3.6}$$

По оси абсцисс откладывается параметр $\frac{\bar{t}_f - t_0^{\partial}}{\bar{q}_{\text{пад}}}$, а по оси ординат $\boldsymbol{\eta}$. Среднедневные значения произведения $(\eta_{\text{опт}} \cdot \eta_{\text{тп}})$ определяются точно в $\bar{\eta} = f\left(\frac{\bar{t}_f - t_0^{\partial}}{\bar{q}_{\text{пад}}}\right)$ точке пересечения прямой $\bar{\eta} = f\left(\frac{\bar{t}_f - t_0^{\partial}}{\bar{q}_{\text{пад}}}\right)$ с осью ординат так как из уравнения

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}_{\text{тп}}\left[\bar{\eta}_{\text{опт}} - \text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}\frac{\bar{t}_f - t_0^{\partial}}{\bar{q}_{\text{пад}}}\right] \tag{3.7}$$

при $\bar{t}_f = \bar{t}_0$ следует

$$\bar{\eta} = \bar{\eta}_{\bar{t}_f - t_0} = \eta_{\text{опт}} \cdot \eta_{\text{тп}} \tag{3.8}$$

Далее, по отношению разности двух значений η на прямой $\eta = f\left(\frac{\bar{t}_f - t_0^{\partial}}{\bar{q}_{\text{пад}}}\right)$ к параметру $\frac{\bar{t}_f - t_0^{\partial}}{\bar{q}_{\text{пад}}}$, т.е. по $\frac{\bar{\eta}_2 \eta_1}{\frac{\bar{t}_f - \bar{t}_0^{\partial}}{\bar{q}_{\text{пад}}}/q_{\text{пад}}}$, легко определяется произведение $\left(\bar{\eta}_{\text{тп}} \cdot \text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}\right)$.

При необходимости значения $\eta_{\text{тп}}$ и $\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}$ в зависимости от конструкции теплоприёмника и корпуса могут быть определены расчетным путем по формулам, приведенным во второй главе, с учетом средних опытных значений параметров, входящих в выражения для определения и $\eta_{\text{тп}}$ и $\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}}$. Сопоставлением расчетных и опытных значений $(\eta_{\text{опт}}\eta_{\text{тп}})$ и $(\eta_{\text{тп}}\,\text{К}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}})$ можно

убедиться в степени достоверности полученных результатов.

В отличие от методов тепловых испытаний, приведенных в работе [62], метод, использованный [3] не требует термостатирования температуры теплоносителя на входе ($t_{f\text{вх}_i}$), постоянства его расхода (G_f), постоянства температуры наружного воздуха ($\bar{t}_0^{\partial}$) а также постоянства прихода солнечной радиации ($q_{\text{пад}}$) и позволяет более корректно определить ресурсные и технико-экономические показатели низкопотенциальных солнечных коллекторов.

Во всех разработанных и обследованных коллекторах использован теплоизоляционный корпус [60], изготовленный методом литья из вспенивающихся материалов на основе эпоксидно-диановой смолы с полиэтилен-полиаминовым отвердителем (Рис.3.1.).

Для этой цели разработана и изготовлена специальная пресс-форма для получения теплоизоляционного корпуса указанного типа.

С целью повышения механической прочности и снижения себестоимости в качестве вспенивающей добавки применяли алюминиевую пудру и силикатный конторский клей при следующем соотношении компонентов [59]: эпоксидная диановая смола 100,0; силикатный конторский клей 10,0-60,0; алюминиевая пудра 2,5-60,0; полиэтилен-полиамин 15,0-30,0.

Отливку теплоизоляционного пеноэпоксидного корпуса проводили в естественных условиях в летнее время при 30^{+}-33°С. Компоненты тщательно смешивали при температуре 25^{+}-3°С в

следующей пропорции: эпоксидная смола ЭД-20 100, полиэтилен-полиамин 22, алюминиевая пудра 15, силикатный конторский клей 20. После чего готовый состав заливали в форму. Процесс вспенивания начинался через 7-10 мин а через 30 мин изделие можно было вынимать из формы. По истечении трех суток можно было использовать пеноэпоксидный корпус для солнечного коллектора со следующими физико-механическими свойствами: объёмный вес 0,286 г/см^3, предел прочности при сжатии 59,5 кгс/см^2 предел прочности при изгибе 160,5 кгс/см^2.

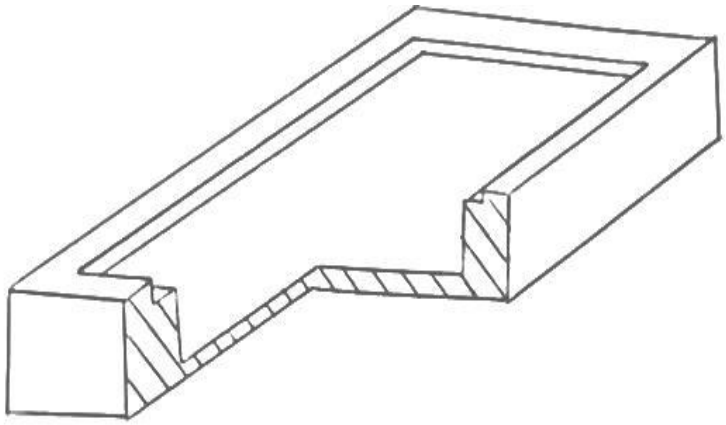


Рис.3.1. Принципиальная схема пеноэпоксидного корпуса солнечного коллектора.

3.2. Результаты экспериментальных исследований

3.2.1. Солнечный коллектор с разборным листотрубным теплоприёмником со стальной лучепоглощающей пластиной и пластмассовыми теплоотводящими каналами

Результаты исследований по разработке методики расчета и оптимизации параметров низкопотенциальных солнечных коллекторов, выполненные во второй главе, приняты за основу при

разработке и создании солнечного коллектора с разборным листотрубным теплоприёмником с пластмассовыми теплоотводящими каналами и стальной лучепоглощающей пластиной (Рис.3.2.а). Эффективность коллектора сопоставлена с эффективностью ранее разработанных в ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз солнечных коллекторов типа В.8005 (с теплоприёмниками из стальных штампо-сварных отопительных радиаторов типа РСГ-2) и В.8203 (с разборным листотрубным теплоприёмником) [74].

Принципиальные схемы сравниваемых коллекторов приведены на Рис.3.2.

Основные технические характеристики солнечных коллекторов В.8005, В.8203 и разборного (с пластмассовыми теплоотводящими каналами теплоприёмника) приведены в Таблице 3.1.

Как следует из Рис.3.2. и Таблицы 3.1., солнечные коллекторы с пластмассовыми теплоотводящими каналами теплоприёмника в основном отличаются от двух других сравниваемых коллекторов конструкцией теплоприёмника. Лучепоглощающая пластина теплоприёмника изготовлена из листовой стали с выштампованными желобами с кривизной соответствующей наружному диаметру теплоотводящего канала. В качестве теплоотводящих каналов теплоприёмника использованы пластмассовые трубки на основе полиэтилена низкого давления и высокой плотности с наружным и внутренним диаметрами 20 и 16 мм, теплоотводящие трубки уложены в выштампованных

лучепоглощающей пластины и сверху полностью покрыты (обхвачены) элементами фиксации, которые также изготовлены из листовой стали. Лучепоглощающая пластина и элементы фиксации между собой заклепками.

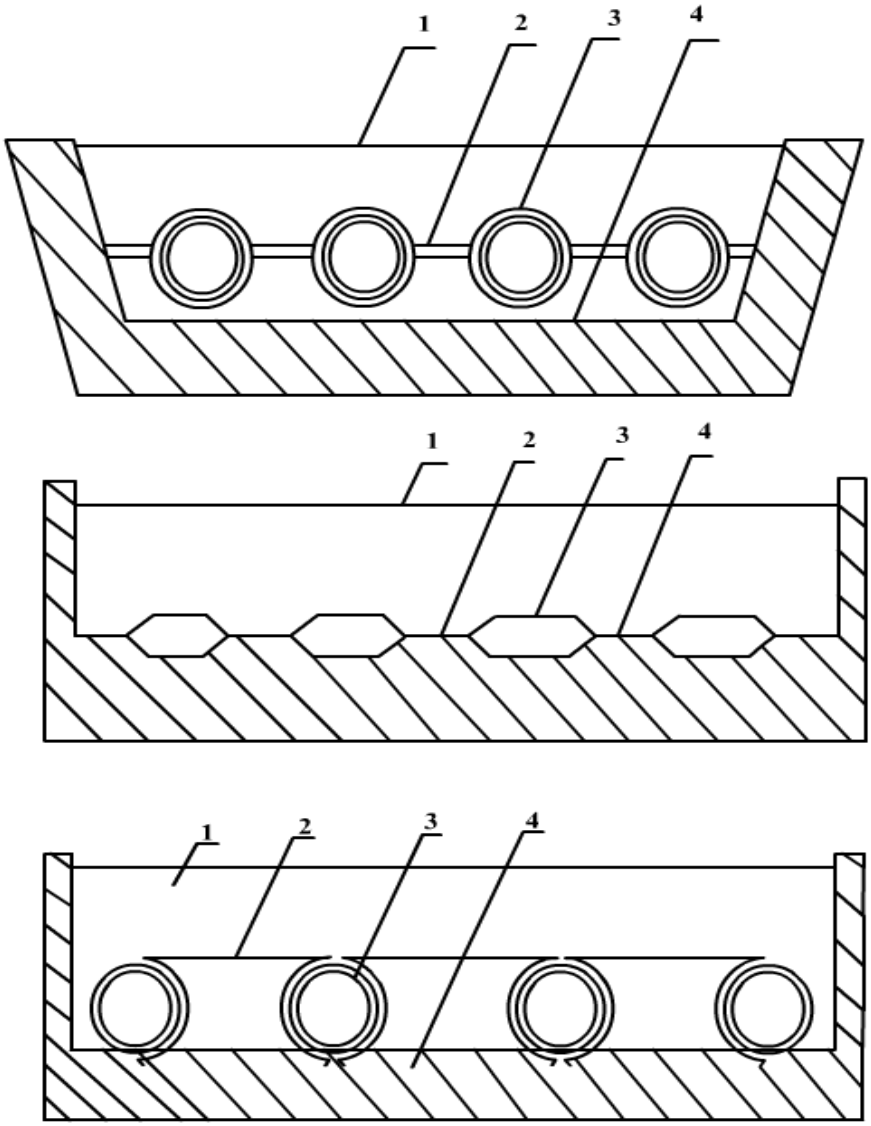


Рис.3.2. Принципиальные схемы солнечных коллекторов: пластмассовый (а), В.8005 (б и В.8203 (в):

1 - светопрозрачное покрытие; 2- лучепоглощающая пластина теплоприёмника; 3- теплоотводязий канал; 4- теплоизоляция и корпус.

Таблица 3.1.

Основные технические характеристики солнечного коллектора с разборным листотрубным теплоприёмником со стальной лучепоглощающей пластиной и пластмассовыми теплоотводящими каналами (т.е. с плаотмассовыми элементами), а также солнечных коллекторов В.6005 и В.8203

Показатели элементов коллектора	Тип солнечного коллектора		
	с пластмассовыми теплоотводящими каналами теплоприёмника	В.8005 ТУ 88 ФТИ нпо «Физика-Солнце» АН РУз 16 - 81	В.8203 ТУ 88 ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз 16-86
1	2	3	4
КОРПУС Габариты: длина, мм ширина, мм высота, мм	 1120 640 85	 1090 650 111	 1096 609 78
Фронтальная лучепоглощающая поверхность ($F_{фр}$), м^2	0,71	0,708	0,667
Материал: боковых стенок и дня корпуса светопрозрачного покрытия теплоизоляции дня	пеноэпоксид δ=30 мм стекло оконное воздушная прослойка δ=20 мм	сталь листовая δ=1 мм стекло оконное стекловата δ=50 мм	сталь листовая δ=1 мм стекло оконное минираловата плита δ=30мм + воздушная прослойка δ=20 мм
Расчетное значение приведенного на 1м^2 фронтальной лучевоспринимающей поверхности коэффициента теплопотерь ($К_{пр_{р-о}}$.) Вт /(м^2, ^{0}С)	7,2	7,0 (а=в=0,90; с=0,148)	7,2 (а=в=0,943; с=0,11)
Масса, кг	5-6	25,6	17,9
ТЕПЛОПРИЁМНИК	разборный листотрубный	отопительный радиатор РСГ2	разборный листотрубный
Габариты: длина, мм ширина, мм	1050 590	1020 573	1058 573
Лучепоглощающая поверхность ($F_р$), м^2	0,62	0,584	0,606
Материал	Лучепоглощающая пластина из листовой стали δ = 1 мм, теплоотводящие каналы из пластмассы (полиэтиленовые)	Сталь листовая δ=1,5 мм	Лучепоглощающая пластина из листовой стали δ=1 мм, теплоотводящие каналы из стальной

	трубы 16 х2,0 мм		газопроводной трубы 15х2,8 мм
Лучепоглощающее покрытие	эмаль ПФ 115 (черная)	эмаль ПФ 115 (черная)	эмаль ПФ 115 (черная)
Коэффициент лучепоглощения покрытия (α_p)	0,94-0,96	0,94-0,96	0,94-0,96
Оптимальное значение расхода теплоносителя через один элемент, кг/ч	30-40	30-40	5-10
Расчетное значение термической эффективности ($\eta_{тп}$) при оптимальном расходе	0,71	0,975	0,75
Объём теплоносителя в теплоотводящих каналах, л.	1,6	5,0	0,9
Коэффициент гидравлического сопротивления	$\xi = \frac{328}{Re^n} \div 0{,}561$ при $200 \leq Re \leq 1500$	Lnξ=18,6-1,96 A=0,64, n≠I при $50 \leq Re \leq 1187$ A=0,3121=0,25 при $1187 \leq Re \leq 10000$ (по методике [75])	$\xi = \frac{328}{Re^n} \div 0{,}561$ при $200 \leq Re \leq 1500$
Масса, кг КОЛЛЕКТОР (в сборе)	3,5-5	14,4	8,6
Отношение лучепоглощающей поверхности теплоприёмника к фронтальной лучепоглощающей поверхности (коэффициент заполнения ($\frac{F_p}{F_{фр}}$)	0,873	0,909	0,826
Среднедневное расчетное значение	0,59	0,55	0,59
Произведение ($\eta_{опт} \cdot \eta_{тп}$)	0,42	0,536	0,443
Произведение ($К_{пр_{р-о}} \cdot \eta_{тп}$), Вт/(м^2.°С)	5,11	6,825	5,40
Масса, кг	15 - 20	40,0	26,5
Необходимое число теплообменных контуров для нормальной эксплуатации в системах горячего водоснабже ния	один (одноконтурные системы	два (двухконтурные системы')	один (одноконтурные системы)
Стоимость одного элемента, руб.	Ориентировочно 15-20	45,75	41,25

Для уменьшения отрицательного влияния теплового зазора между элементами фиксации и теплоотводящими каналами на эффективность коллектора тепловой зазор заполнен теплопроводной пастой.

Малая металлоёмкость листотрубного разборного пластмассового теплоприёмника по сравнению с радиаторами РСГ-2 (в коллекторе В.8005) и металлическим листотрубным разборным теплоприёмником (в коллекторе В.8203) обеспечена в результате тепломеханической оптимизации ширины лучепоглощающей пластины в соответствии с методикой, изложенной в разделе 2.5.

Как следует из таблицы 3.1., благодаря применению пластмассовых теплоотводящих каналов в теплоприёмниках, масса коллекторов может быть существенно уменьшена.

Гидравлическое сопротивление пластмассовых труб, как известно по [54], имеющих гладкую внутреннюю поверхность, мало и практически не изменяется во времени. Коэффициент гидравлического сопротивления пластмассовых теплоотводящих каналов теплоприёмника, аналогично [54], определен расчетным путем по методике [75].

Испытания коллекторов проводились на гелиоплощадке ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз в течение 1987-1990 гг. по описанной в разделе методике. Через каждые 30 мин. измеряли суммарную солнечную радиацию, подающую на фронтальную лучевоспринимающую поверхность ($q_{\text{пад}}$), температуру окружающей среды ($t_0^{\text{дн}}$), скорость ветра (V), температуру теплоносители (воды) на входе ($t_{f\text{вх}}$) и выходе ($t_{f\text{вых}}$)

темплоприёмников, расход теплоносителя в них (G). По проведенным замерам устанавливали значения $\bar{q}_{\text{пад}}$, $\bar{t}_0^{\text{дн}}$, $\bar{t}_f$, $\bar{G}_f$, а также $\bar{q}_{\text{пол}}$.

Осреднение измеренных величин производилось за 7-часовой день, т.е. за 14 замеров.

Кроме указанных параметров были измерены разности температур в различных участках лучепоглощающей пластины теплоприемника с помощью хромель-алюмелевых термопар. Принципиальная схема размещения термопар на поверхности одного элемента лучепоглощающей пластины приведены на Рис.3.3. Для обеспечения симметричности температурного поля относительно середины лучепоглощающей пластины теплоотводящие каналы теплоприёмника были соединены общим гидравлическим коллектором. Подача теплоносителя (воды) снизу вверх.

Для монтажа термопар на поверхности лучепоглощающей пластины выполнялись выемки (впадины) с помощью кернера. Головки термопар после их установки в выемки припаивались к поверхности пластины.

Принципиальная схема лабораторного стенда по испытанию солнечных коллекторов приведена на Рис.3.4.

В процессе проведения экспериментов измеряли: приход солнечной радиации на фронтальную поверхность коллектора (с помощью пиранометра М-80 и актинометрического стрелочного гальванометра типа ГСА-1), температуру окружающего воздуха и теплоносителя на входе и выходе (с помощью лабораторных

термомтетров)

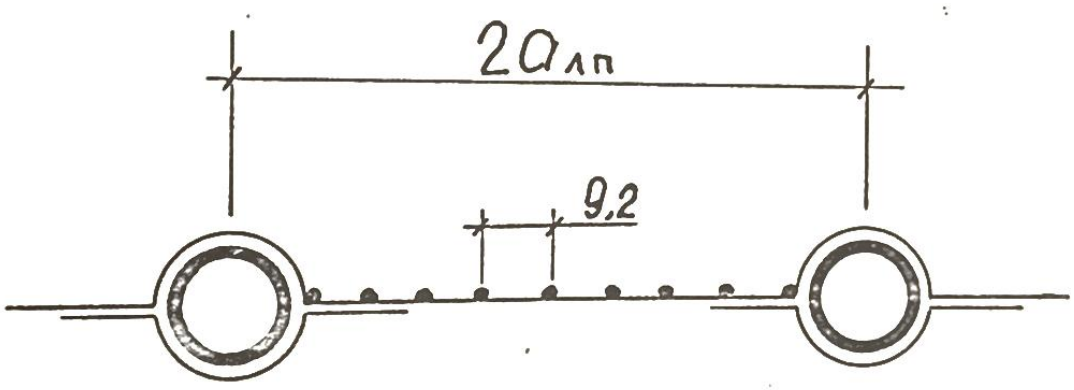


Рис.3.3. Принципиальная схема размещения термопар на поверхности одного элемента лучепоглощающей пластины.

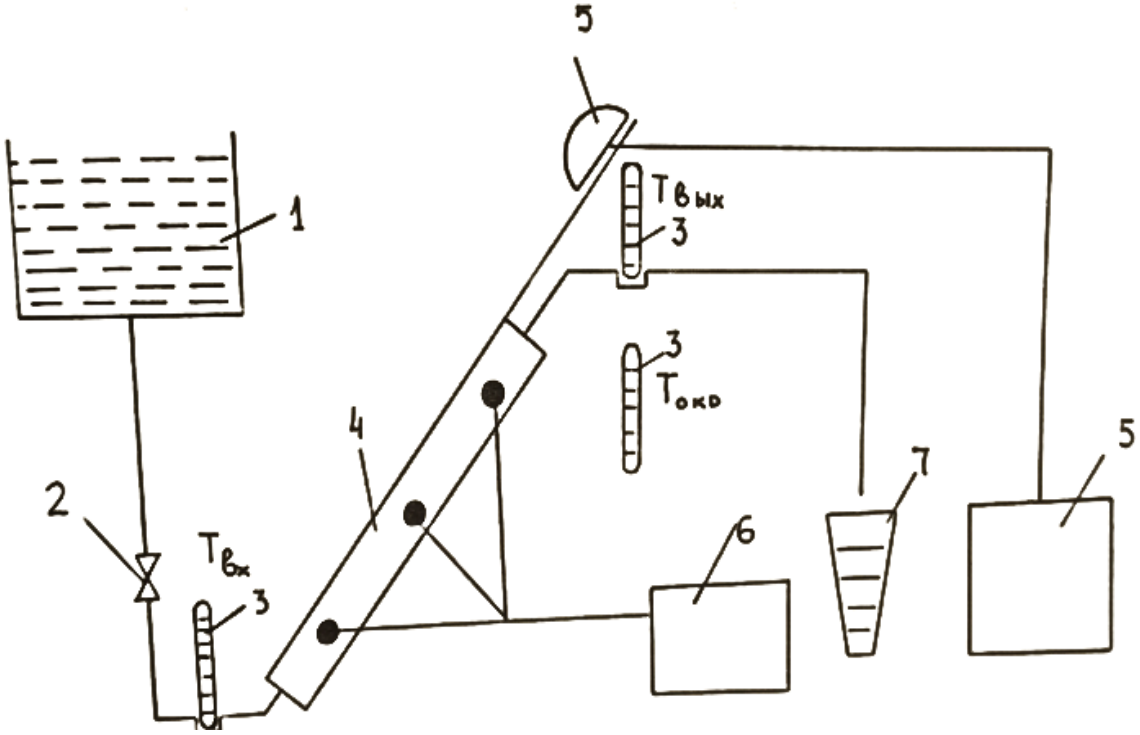


Рис. 3.4. Принципиальная схема стенда по испитанию солнечных коллекторов:

I - бак; 2 - вентиль; 2 - термометры; 4 - коллектор; 5 - пиранометр М-80 и гальванометр ГСА-1; 6 - потенциометр ПИ-63; 7 - мерный сосуд для определения расхода теплоносителя весовым методом

скорость ветра (с помощью чашечного анемометра) и расход воды (весовым методом с помощью мерного сосуда), а также температуру на поверхности лечепоглощающей пластины теплоприёмника, стекла и дна (компенсационным методом с помощью термопар и патенциометра ПП-63). Угол наклона установки к горизонту 40°.

Сопоставление результатов экспериментальных измерений и расчетных данных по определению разности температур в середине лучепоглощающей пластины ($t_{x=0}$) и в точке её сопряжения (контакта) с элементами фиксации (t_a) в трех сечениях теплоприёмника в Таблице 3.2.

Таблица 3.2.

Результаты экспериментальных и расчетных исследований по определению разности температур в середине лучепоглощающей пластины ($t_{x=0}$) и в точке её сопряжения с элементами фиксации (t_a)

Значение $t_0 + \frac{q_{\text{пагл}}}{K_{\text{пр}_{\text{р-о}}}} t_a$	ЗНАЧЕНИЯ	
	Эксперементельные	Расчетные
1	2	3
1. t_0=30^{0}C Г=90^{0}C t_a=18^{0}C t_a=26^{0}C t_a=29^{0}C	 9,3 8,3 7,9	 9,7 8,6 8,2
2 t_0=34^{0}C Г=96,5^{0}C t_a=23^{0}C t_a=30^{0}C t_a=34^{0}C	 9,5 8,6 8,0	 9,9 8,98 8,37
3 t_0=37^{0}C Г=101,16^{0}C t_a=25^{0}C t_a=35^{0}C t_a=41^{0}C	 9,9 8,59 7,8	 10,29 8,94 8,13

Расчетное значение определяли по ($t_{x=0}$ - t_a) при этом определяли по формуле (2.34)

Результаты экспериментов по определению распределения температуры по ширине лучепоглощающей пластины (также в трех сечеииях) и сопоставление их с расчетными данными (по формуле (2.33) приведены на Рис.3.5. Как следует из данных Таблицы 3.2. и Рис. 3.5., результаты теоретических расчетов и экспериментальных исследований имеют хорошую сходимость, что подтверждает достоверность проведенных исследований.

Среднедневные значения эффективности ($\boldsymbol{\eta}$) определяли по отношению (3.1.), в результаты испытаний обрабатывали в виде зависимости (3.4.).

Зависимость среднедневных значений эффективности значений эффективности ($\boldsymbol{\eta}$) исследуемых коллекторов от $\frac{\bar{t}_f - \bar{t}_0^{\text{дн}}}{\bar{q}_{\text{пад}}}$, приведена на Рис.3.6. Как следует из Рис. 3.6., при среднедневной температуре окружающей среды

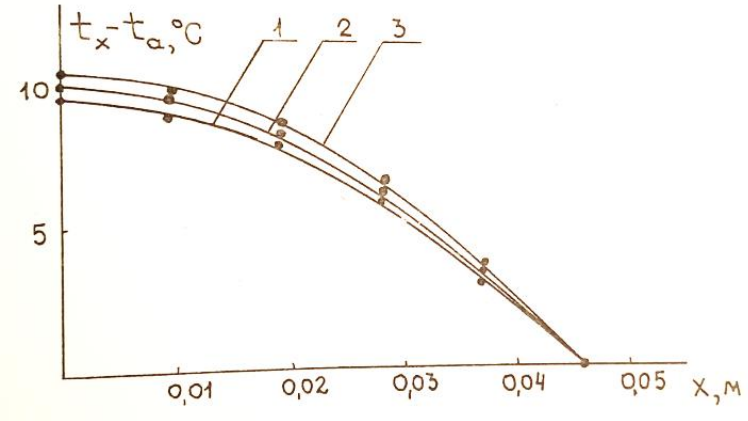


Рис.3.5. Распределение температуры по ширине лучепоглощающей пластины:

1, 2 и 3 - соответственно при $t_0 + \frac{q_{\text{пагл}}}{K_{\text{пр}_{p-0}}} - t_a$ *=90°С, 96,5°С и 101,16°С: сплошные по формуле (2.34.) точки - экспериментальные данные.*

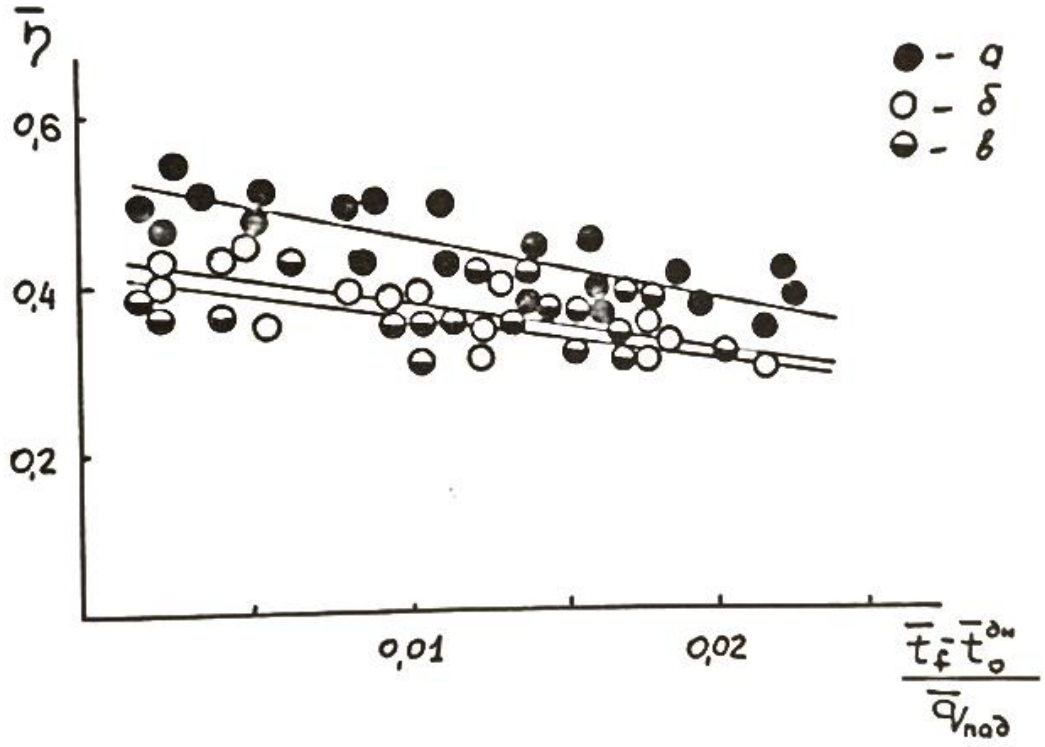


Рис.3.6. Зависимость среднедневных значений эффективности солнечных коллекторов с теплоприёмником из стального штампо-сварного радиатора типа РСГ2 (а) и разборных листотрубных теплоприёмников со стальными (б) и пластмассовыми (в) теплоотводящими каналами от отношения $\frac{\bar{t}_f - \bar{t}_0^{\text{дн}}}{\bar{q}_{\text{пад}}}$.

$\bar{t}_0^{\text{дн}}$=25÷30^{0}С и среднедневном значении прихода суммарной солнечной радиации $\bar{q}_{\text{пад}}$=700÷750 Вт/м^2, температурах исходной воды 15- 20°С, получаемой горячей воды 50÷60°С среднедневные значения эффективности исследованных коллекторов составляла 0,30÷0,33 для разборного солнечного коллектора (с пластмассовыми теплоотводящими каналами теплоприёмника),

0,41÷0,42 для солнечного коллектора В.8005 (с теплоприёмником из стальных штампосварных радиаторов типа РСГ-2) и 0,34 ÷ 0,35 для солнечного коллектора В.8203 [76,77].

Относительно высокая эффективность солнечного коллектора В.8005 по сравнению с коллекторами с разборными листотрубными теплоприёмниками из стали и пластмасс объясняется конструктивным различием их теплоприёмников. Термическая эффективность стального штампосварного радиатора типа РСГ-2 при использовании его в качестве теплоприёмника для солнечных коллекторов 0,95÷0,975 [68]. Термическая эффективность листотрубных разборных теплоприёмников с теплоотводящими каналами из стали и пластмасс как показывают расчеты по методике [65] составляют от 0,7 до 0,83 [78].

Анализ результатов испытаний (Рис.3.6.) позволяет определить среднее значение $\boldsymbol{\eta}_{\text{опт}}$ для исследованных коллекторов. Так при среднедневных значениях температур исходной воды 18°С, получаемой в солнечном коллекторе температуре горячей воды 50°С, температуре окружающей среды 35°С, при которых имеет место максимальное значение $\boldsymbol{\eta}$, произведение $(\bar{\eta}_{\text{опт}} \cdot \bar{\eta}_{\text{тп}})$ составляет 0,54 для коллектора В.8005 с теплоприёмником из штампо-сварного радиатора, 0,44 - для коллектора В.8203 и 0,42 - для коллектора с разборным листотрубным теплоприёмником с пластмассовыми тепловодящими каналами. Значение $(\bar{\eta}_{\text{тп}}\ K_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}})$ составляет- 6,82 Вт/(м^2 ,°С) для коллектора В.8005 ; 5,40 - для коллектора В.8203 и 5.11 для коллектора с пластмассовыми теплоотводящими каналами теплоприёмника.

При расчетных значениях термических эффективностей теплоприёмников рассматриваемых солнечных коллекторов соответственно 0,975; 0,75 и 0,71 (раздел 2.2.) среднее значение $\eta_{опт}$ равно 0,55 для коллектора В.8005 , 0,59 - для коллектора В.8203 и с пластмассовыми теплоотводящими каналами теплоприёмника, а среднее значение $К_{пр_{р-о}}$=7,0 Вт/(м^2.°С) для коллектора В.8005 и 7,2 Вт/(м^2 ,°С) - для коллекторов В.8203 и с пластмассовыми теплоотводящими каналами теплоприёмника, что практически совпадает с расчетными параметрами этих коллекторов, приведенными в разделе 3.1.

На основе анализа результатов проведенных сравнительных испытаний нами установлена (Таблица 3.3.) зависимость эффективности исследуемого и сравниваемых коллекторов от режима эксплуатации (от параметра $(\bar{t}_f - \bar{t}_0^{дн})/\bar{q}_{пад}$ **).**

Таблица 3.3.

Обозначения солнечных коллекторов по Рис.3.3	Выражение для определения средней за период эксплуатации эффективности(η) в зависимости от $(\bar{t}_f - \bar{t}_0^{дн})/\bar{q}_{пад}$
а	η_1=0,42-5,11 $(\bar{t}_f - \bar{t}_0^{дн})/\bar{q}_{пад}$
б	η_1=0,54-6,82 $(\bar{t}_f - \bar{t}_0^{дн})/\bar{q}_{пад}$
в	η_1=0,44-5,40 $(\bar{t}_f - \bar{t}_0^{дн})/\bar{q}_{пад}$

3.2.2. Солнечный коллектор с теплоприёмником, изготовленным из пластмассовых труб

На основе расчетно-теоретических исследований, выполненных в разделе 2.2., нами созданы опытные образцы солнечного коллектора с пластмассовым трубчатым теплоприёмником и пеноэпоксидным корпусом.

Корпус пластмассового солнечного коллектора изготовлен из пеноэпоксида (на основе ЭД-20 и отвердителя - полиэтиленполиами на) по технологии, разработанной в ФТИ НПО «Физика-Солнце» АН РУз [60]. Конструктивно дно и боковые стенки толщиной 30 мм являются одновременно тепловыми изоляторами.

Теплоприёмник коллектора представляет собой плотно уложенные друг к другу ряды пластмассовых труб (из теплостойкой полиэтиленовой трубки) с наружным диаметром 20 мм и толщиной стенки 2 мм. Теплоприёмник состоит из 27 параллельно расположенных и присоединенных к гидравлическому коллектору пластмассовых труб (с теплопроводностью $\lambda_{пл}$ = 0,44 Вт/(м °С) и плотностью ρ=950 кг/м^3). Он имеет размеры: длина 1120 мм, ширина 640 мм и высота 25 мм, общая фронтальная площадь 0,72 м^2 (Рис.3.7.).Теплоотводящие каналы поглощают падающую на фронтальную поверхность коллектора солнечную радиацию и передают теплоносителю.

Испытания коллекторов с однослойным светопрозрачным покрытием и без него проводились на гелиоплощадке ФТИ Н0 «Физика-Солнце» АН РУз.

Среднедневные значения эффективности пластмассовых солнечных коллекторов со светопрозрачным покрытием и без него ($\boldsymbol{\eta}$) определяли по отношению (3.1.), а результаты испытаний обрабатывали в виде зависимости (3.4.)

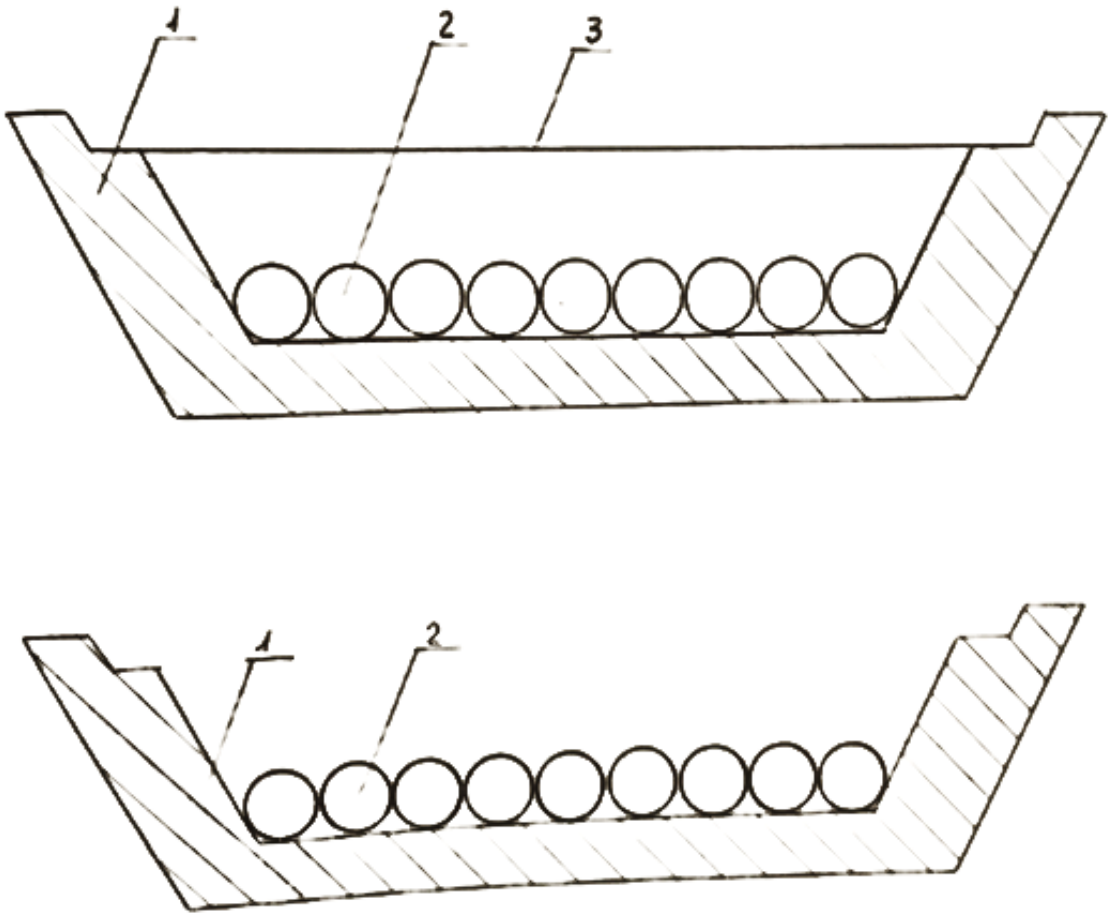


Рис.3.7. Принципиальные схемы солнечных коллекторов с теплоприёмником из пластмассовых труб: а и б - соответственно со светопрозрачным и без него:

1 - теплоизоляция и корпус; 2 - теплоотводящий канал; 3 - светопрозрачное покрытие.

Зависимости среднедневных значений эффективности ($\boldsymbol{\eta}$) исследуемых коллекторов от отношения $(\bar{\boldsymbol{t}}_{\boldsymbol{f}} - \bar{\boldsymbol{t}}_{\boldsymbol{0}}^{\text{дн}})/\bar{\boldsymbol{q}}_{\text{пад}}$ приведены на Рис.3.8. Как следует из Рис.3.8., при средней температуре окружающей среды $\bar{\boldsymbol{t}}_{\boldsymbol{0}}^{\text{дн}}$=20-30°С и среднедневном значении прихода суммарной солнечной радиации $q_{\text{пад}}$=700 -800 Вт/м^2 , температурах исходной воды $\bar{\boldsymbol{t}}_{\boldsymbol{f}_{\text{вх}}}$ = 15÷ 25°С и при низких

температурах получаемой горячей воды $\bar{t}_{f_{\text{вых}}}$=30÷40°С среднедневное значение эффективности пластмассовых солнечных коллекторов с однослойным светопрозрачным покрытием и без него составляет соответственно 0,54 и 0,67 [79,80].

Результаты испытания пластмассовых солнечных коллекторов показывают, что для повышения средней температуры теплоносителя в теплоотводящем канале по сравнению с температурой окружающей среды на 14÷15°С целесообразно применять солнечные коллекторы без светопрозрачного покрытия. Эффективность их существенно зависит от скорости ветра (по сравнению с солнечными коллекторами со светопрозрачным покрытием).

Из Рис.3.8. следует, что сопоставление эффективности пласт массовых солнечных коллекторов сводится к сопоставлению термической эффективности пластмассовых солнечных коллекторов с одно слойными светопрозрачными покрытиями и без него.

Термическая эффективность трубчатого теплоприёмника пластмассового солнечного коллектора с однослойным светопрозрачным покрытием 0,974, а для коллектора без светопрозрачного покрытия но с тепловой изоляцией дна теплоприёмника 0,847. Коэффициент теплопередачи ограждающих элементов ($К_{пр_{р-о}}$) для листотрубного солнечного коллектора со светопрозрачным покрытием принят $К_{пр_{р-о}}$=7,2 Вт/(м^2.°С), а без него $К_{пр_{р-о}}$=21 ВТ/(м^2.°С).

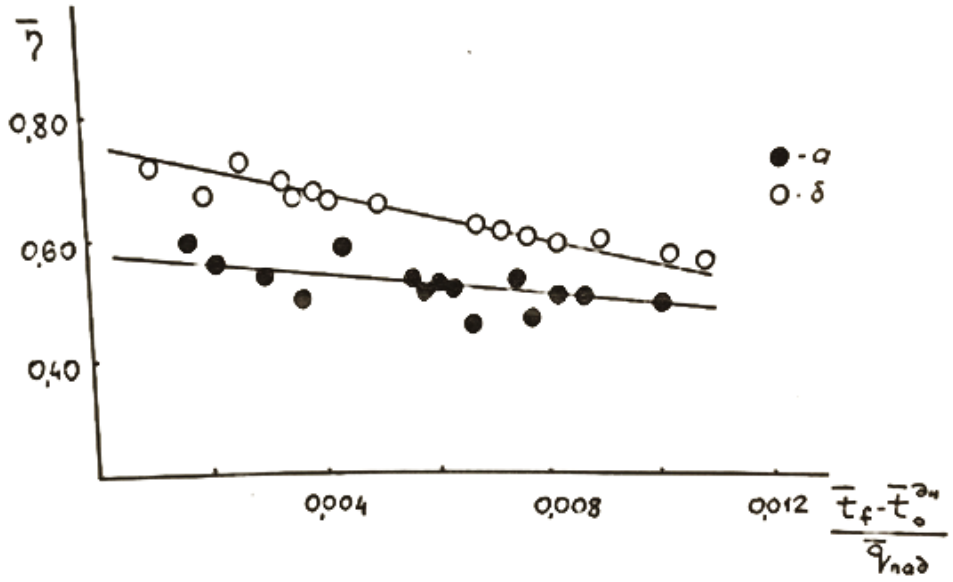


Рис.3.8. Зависимость среднедневных значений эффективности солнечных коллекторов с теплоприёмником из пластмассовых труб от отношения $(\bar{t}_f - \bar{t}_0^{\text{дн}})/\bar{q}_{\text{пад}}$:

а - с однослойным светопрозрачным покрытием;
б - без светопрозрачного покрытия, с теплоизоляцией дна теплоприёмника

Значения произведений $(\bar{\eta}_{\text{опт}} \cdot \bar{\eta}_{\text{тп}})$ и $(\bar{\eta}_{\text{тп}}\ \bar{K}_{\text{пр}_{\text{р}-\text{о}}})$, деленные по методу наименьших квадратов, составляют соответственно 0,58 и 7,01 и 0,76 и 17,79 для пластмассового солнечного коллектора со светопрозрачным покрытием и без него.

3.2.3. Солнечный коллектор с теплоприёмником, изготовленным из пластмасс методом экструзии

Анализ результатов экспериментальных расчетных исследований солнечных коллекторов, изложенных в разделах 3.2.1 и 3.2.2. показывает, что повышение эффективности солнечных коллекторов при прочих равных условиях сводится к повышению термической эффективности их теплоприёмников. В свою очередь

термическая эффективность теплоприёмников, как следует из (2.21.) и (1.24.), зависит от конструктивных и теплотехнических характеристик их отдельных элементов. Из опыта разработки и создания, разборных листотрубных теплоприёмников также следует, что для повышения их эффективности в первую очередь необходимо стремиться к повышению термической эффективности лучепоглощающей пластины ($\boldsymbol{\eta}_{\text{лп}}$). Для случая теплоприёмников, полностью изготовленных из пластмасс, данная задача может быть решена усовершенствованием конструкции и технологии изготовления теплоприёмника.

Расчеты показывают, что для пластмассовых теплоприёмников наиболее оптимальной является конструкция, приведенная на Рис.1.2. Термическая эффективность такого теплоприёмника достигает до 0,95÷0,96, что практически приближается к термической эффективности металлических теплоприёмников из отопительных стальных радиаторов типа РСГ-2.

На основе обобщения и анализа опыта по разработке солнечных коллекторов с пластмассовыми теплоприёмниками (разделы 3.2.1. и 3.2.2.) нами разработан опытный образец солнечного коллектора, корпус и теплоприёмник которого полностью изготовлены из пластмасс.

Результаты испытания лабораторного образца такого коллектора общей площадью 0,5 м^2 (Рис.3.9.) показывают, что теплоприёмник, принципиальная схема которого приведена на Рис.1.2., обеспечивает значение термической эффективности

теплоприёмника в среднем 0,95. Результаты проведенных расчетов и лабораторных испытаний этого коллектора явились основой для разработки опытного образца солнечного коллектора нового поколения.

Корпус коллектора изготавливается из жесткого поливинилхлоридного профиля, серийно выпускаемого Ташкентским заводом солнцезащитных изделий. Данный профиль предназначен для изготовления оконных и дверных рам и разработан совместно с итальянскими специалистами (совместное советско-итальянское производство).

Теплоприёмник коллектора представляет собой панель специального профиля. Теплоприёмник разработан малым предприятием «Доля» (Киев) по заказу научно-производственного предприятия МИТРА.

Принципиальная схема пластмассового солнечного коллектора приведена на Рис.3.10. Размеры солнечного коллектора: длина 1851 мм; ширина 1122 мм; высота 76 мм, общая фронтальная площадь солнечного коллектора составляет 2 м^2 , общая масса (без воды) - 45 кг.

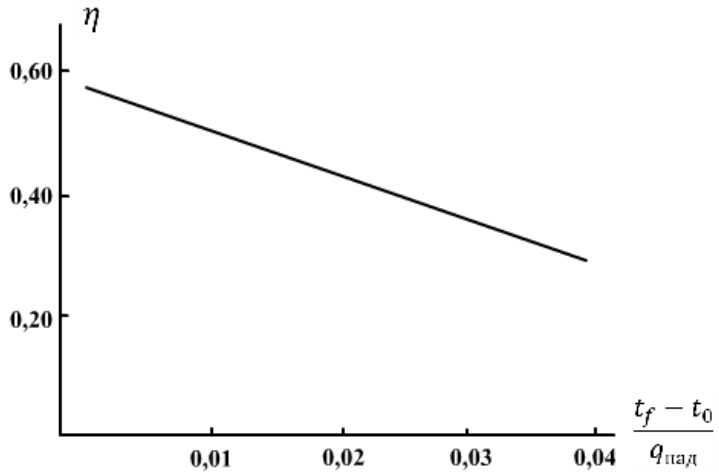


Рис.3.9. Зависимость среднедневных значений эффективности солнечного коллектора, полностью изготовленного из пластмасс, от отношения $(\bar{t}_f - \bar{t}_0^{\text{дн}})/\bar{q}_{\text{пад}}$:

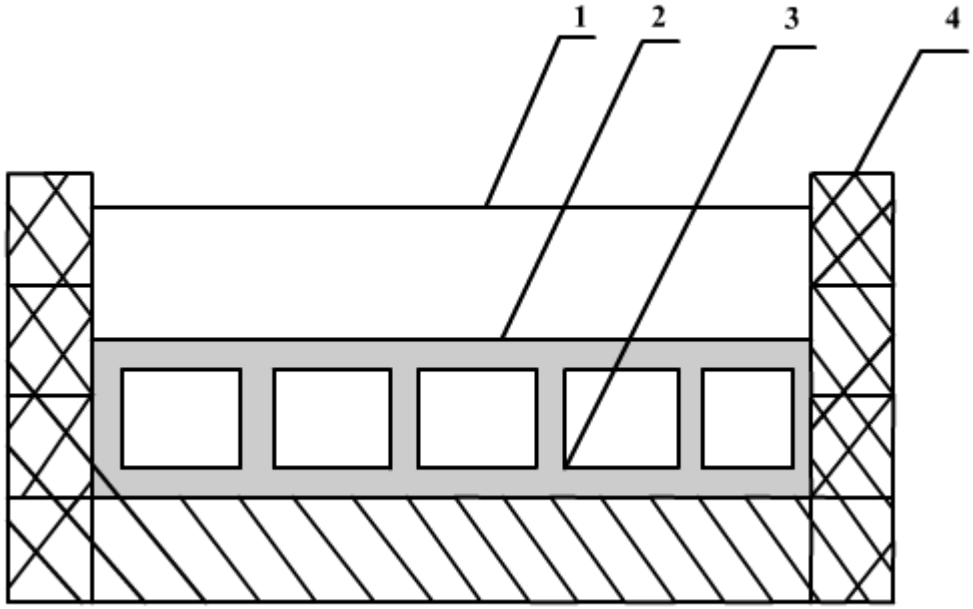


Рис.3.10. Принципиальная схема пластмассового солнечного коллектора:

1 - светопрозрачиое покрытие; 2 - пластмассовый теплоприемник; 3 - теплоизоляция; 4 – корпус.

Расчетная эффективность коллектора, определенная по формуле (1.24.) при в= 0,009 м, $К_{пр_{р-о}}$=7,2 Вт/м^2,°С), $\lambda_{пл}$ = 0,22 Вт/(м.°С), $\delta_{пл}$=0,001 м, $в_3$=0,02670 м, $в_4$=0,02513, $\alpha_{К_{w_в-f}}$= 200÷800 Вт/(м^2.°С); составляет 0,95÷0,97.

Расчетная графическая зависимость термической эффективности теплоприёмников (из полипропилена и стального штампосварного радиатора типа РСГ-2) от коэффициента теплоотдачи внутренней поверхности теплоотводящих каналов

теплоприёмника приведена на Рис.3.11. Здесь видно, что при $\alpha_{К_{w_в-f}}$= 200÷800 Вт/(м^2.^{0}С) значение термической эффективности полностью пластмассового теплоприёмника ($\eta_{тп}$) на 3,06% меньше, чем у РСГ-2 [81].

Разработанный пластмассовый солнечный коллектор по своим конструктивным и теплотехническим показателям соответствует требованиям ГОСТа [2], а также мировому техническому уровню (Таблица 3.4.).

Таблица 3.4.

Показатель	Средний мировой технический уровень	По ГОСТу 28310-89	Разработанный коллектор
Площадь габаритная, м^2	1,6÷2,5	0,8÷2,5	2
Отношение площади теплоприёмника к общей площади коллектора	0,86÷0,94	0,9	0,9
Удельная масса (отнесенная к габаритной площади), кг/м^2	20÷25	30(25)	22,5
Удельный объём каналов для теплоносителя, л/м^2	0,8÷1,8	I,8(4,0)	0,36

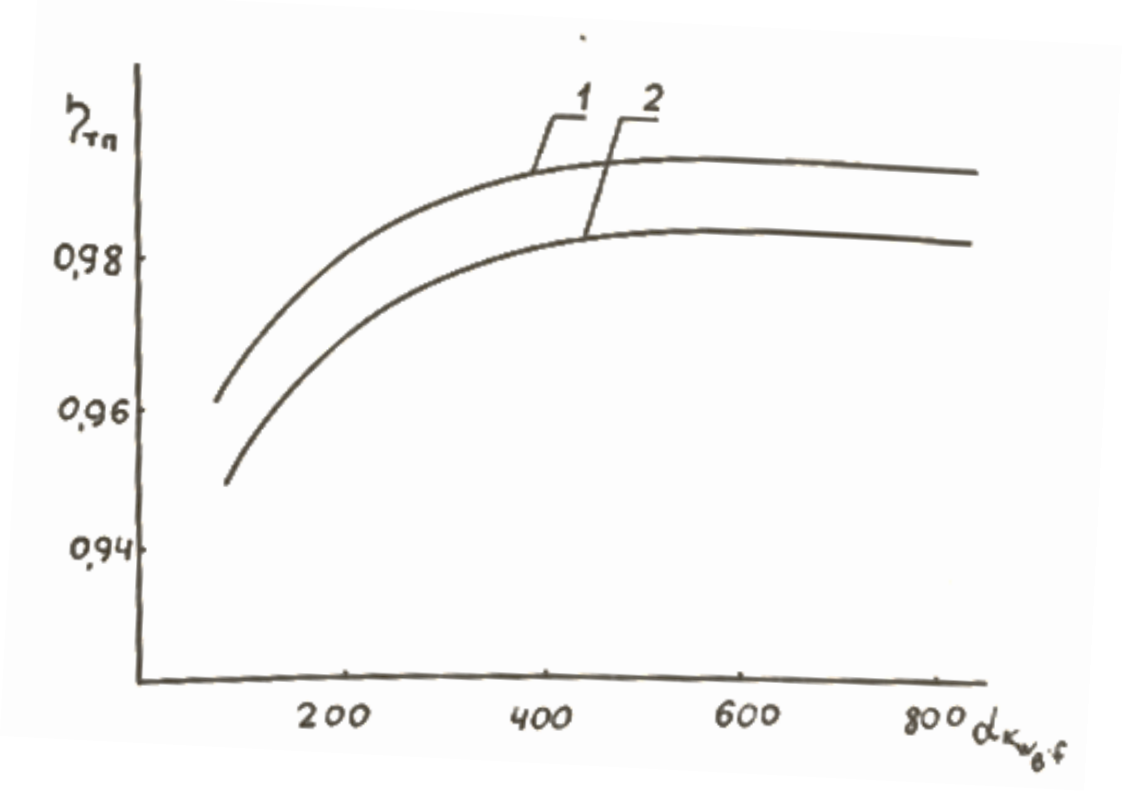


Рис.3.11. Зависимость термической эффективности теплоприёмника $\eta_{\text{тп}}$ от коэффициента конвективного теплообмена на внутренней поверхности теплоотводщего канала($\alpha_{\text{К}_{w_{\text{в}}-f}}$):

1 и 2 - соответственно для стального штампа-сварного радиатора типа РСГ-2 и пластмассого, изготовленного методом экструзии.

Проведенные научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки приняты за основу для разработки солнечного коллектора нового поколения по заданию *НПП* «МИТРА».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа и обобщения мирового опыта в области разработки и создания низкопотенциальных солнечных коллекторов с пластмассовыми элементами для подогрева воды выявлены основные тенденции их развития и предложена классификация их теплоприёмников, а также выбор материалов для их изготовления.

2. Изучено распределение температуры по ширине элементов фиксации лучепоглощающей пластины и на этой основе установлена корректная зависимость для определения термической эффективности разборных листотрубных теплоприёмников с лучепоглощающей пластиной из металла и теплоотводящим каналом из пластмассы.

3. Изучено снижение эффективности в элементах разборных листотрубных теплоприёмников и установлены соответствующие выражения для определения относительной эффективности лучепоглощающей пластины, теплового зазора между элементами фиксации лучепоглощающей пластины и теплоотводящими каналами, а также стенки теплоотводящего канала. Установлены степень влияния снижения эффективности в отдельных элементах теплоприёмника на общую эффективность солнечного коллектора.

4. Изучено снижение температуры в лучепоглощающей пластине, в элементах фиксации, а также в элементах теплоотводящего канала разборных листотрубных теплоприёмников и на этой основе установлены соответствующие зависимости для определения разности температур в этих

элементах.

5. Оптимизированы основные конструктивные и режимные параметры разборных листотрубных теплоприемников с пластмассовыми теплоотводящими каналами, а также теплоприёмников, полностью изготовленных из пластмасс

6. Разработаны и созданы опытные образцы солнечных коллекторов с разборным листотрубным теплоприёмником с металлической (стальной) лучепоглощающей пластиной и пластмассовыми теплоотводящими каналами, а также с теплоприёмником, полностью изготовленным из пластмассы. Проведены натурные испытания и на их основе установлены эмпирические зависимости для определения термической эффективности, хорошо согласующимися с теоретическими расчетами.

7. Установлены экономически выгодный режим эксплуатации разработанных и обследованных солнечных коллекторов и предельно-допустимые значения отношения удельных капитальных затрат к стоимости тепловой энергии при их эксплуатации в системах летнего горячего водоснабжения

ЛИТЕРАТУРА

1. Отчет о патентных исследованиях по теме «Солнечные водонагреватели». Ташкент: Государственный Комитет СССР по делам изобретений. Всесоюзный центр потентных услуг. Ташкентский филиал, 1987, 219 с.

2. ГОСТ 28310-89 Солнечные коллекторы. Общие технические условия. Издательство стандартов, 1990.

3. Авезов Р.Р. Повышение эффективности использования низкопотенциальных солнечных нагревателей в системах теплоснабжения. Автореф.дис...док.техн,наук. - М.:1990. 46 с.

4. Смирнова А.Н. Плоские солнечные коллекторы. Анализ патентного фонда // Гелиотехника 1990, № 6, с.14-17.

5. Кенисарин М.М. Состояние и перспективы использования солнечной энергии в народном хозяйстве.

6. Energy products spetification guide, 1984 Solar Vision

7. Пат.США № 4538592 Corb R., Sundguist; Швеция № 820381 от 27.05.82г., опубл.3.09.85 г.

8. Пат.США № 4548196 Ьеопагй В ТогИп Ма1;ег±а1з Тес1то1о§у Согр. № 944643 от 21.09.78 г., опубл.22.10.85 г.

9. Пат.США № 4210129 Adwor F.O. Hanlou. Опубл.1.7.80г.

10. Пат.США № 4271825 Phend Engineering s, a, r, e Опубл.9.06.81

11. Заяв. Великобритании № 1554969 ITEH Cor.США № 652023 от 26.01.76г., опубл.31.10.79г.

12. Заяв.Великобритании №21338933 Sun Star System AB Швеция № 8203281 от 27.05.82г., опубл.31.10.84г.

13. Заяв. ФРГ № 2649639 Klaus Esser HB. от 29.10.76г., опубл. 11.05.78г.

14. Пат. США № 4526162 Sharp Kabushiki Kaisha, Япония, № 57-164793 И от 29.10.82г., опубл. 2.07.85г.

15. Франция № 2354520 Spindlar № 7618337 от 9.06.76г., опубл. 10.02.78г.

16. Япония № 53-17173 Тэраака Сейти № 49-46641 от 26.04.74г., опубл.6.07.78г.

17. Заяв. Великобритании № 1508593 BritishPetrolium Co. Ltd № 26458176 заяв. 14.06.74г., опубл.26.04.78г.

18. Пат. США № 4269172 Peter D.Porker и др. Австралия № PC 8037 от 8.11.76г., опубл.26.05.81г.

19. Пат. США № 4414960 Insolar Inc. № 376419 от 10.05.82г. опубл. 15.11.83г.,

20. Курбанов Н.Н., Назаров Г.Р., Курбанов Н.П. Солнечные коллекторы на основе полиэтиленовых труб. Тезисы докладов научно-техн.конф. «Основные направления и опыт использования нетрадиционных источников энергии в народном хозяйстве» Душанбе 1988, с.36.

21. Заяв.ФРГ № 2822970 U.Barats Marine and industrial Engin. Ltd. Израиль от 26.05.78г., опубл.29.11.79г.

22. А.с. СССР Аверьянов В.К. и др. № 3703488 от 3.09.84г опубл.7.12.85г

23. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки М: - Энергоатомиздат 1991г.

24. Пат. США № 4060070 Solar Industrial Inc. № 651479 от

22.01.76г., опубл. 29.11.77г.

25. Дат. США № 4136672 Lowrence W.H. № 780899 от 24.03.77г. опубл.30.01.79г.

26. Пат. США № 4164932 Grunmou Corp № 869718 от 16 01 78 опубл. 21.08.79г.

27. Пат. США № 4426999 Romada Energy Systems Inc. № 350290 от 18.02.82г . , опубл. 24.01.84г .

28. Заяв. Великобритании № 1517449 Wickremasifria DBI №35910/76 от 28.08.76 г., опубл.12.07.78г., F 24 j 3/02.

29. Заяв.Великобритании № 1540390 Dow Cormin Corp. США, №617553 от 29.09.75г., опубл.14.02.79г.

30. Заяв.Великобритании № 20484460 FENEMORER № 7915510 от 3.05.79г., опубл. 10.12.80г.

31. Пат. США № 4170222 Roy D. Barker № 825932 от 19.08.77г., опубл.30.01.79г.

32. Заяв. ФРГ № 2641325 C.Conradty Nurenberg Cm bH IcoKG от 14.09.76г., опубл.10.03.78г.

33. Япония № 54-305533 Кураха кагаку коге К.К. № 50-17952 от 14.02.75г. опубл.1.10.78 г.

34. Япония № 57-55988 Юниэта К.К. № 55-95037 от 14.07.80г., опубл.27.II.82 г.

35. Синтетические солнечные коллекторы для подогрева воды MITRA SOLARTECHNIC

36. Солнечные коллекторы типа «СЭНДВИЧ»

37. РСТ № 79/00994 Stifler, Mario. Чехословакия № 4548/78 - бот от 27.04.78г., опубл.29.11.79г.

38. Пат. США № 4476855 Wnified echologes № 368902 от 15.04.82г., опубл.16.10.84г. F 24 j 3/02.

39. Пат.США № 452С793 Charles P. Hall (Calif) № 517277 от 26.07.83г., опубл.4.06.85г.

40. Заяв. ФРГ № 2700714 Boettcher Alfred от 10.01.77г., опубл.13.07.78г.

41. Заяв. Великобритании № 1535960 Evans R.I. № 16266/76 заяв.22.01.76г., опубл.13.12.78 г. опубл.13.12.78г. j 3/02

42. Заяв. Великобритании № 2097114 MYSON GROUP PLC №8112064 от 16.04.81г., опубл. 27.10.82г.

43. Заяв. Великобритании № 2045423 Holter H. ФРГ № 2911191 от 22.03.79г., опубл.29.10.82г. F 24 j 3/02

44. Пат. США № 4237867 William C. Boulr № 920490 от 29.06.78г., опубл.9.12.80г.

45. Заяв. ФРГ № 0 3500507 Schmidt Sigfried № 4300728.8 от 11.01.84г., опубл. 18.07.85г.

46. Пат. США № 4375808 Cobdobum Corp.- № 26274 от 2.04.79г., опубл.8.03.83г.

47. Пат. США № 4517961 FRUVOR T. Bioor и др. Австралия № 6712 от 9.11.82г. опубл.21.05.85г.

48. Заяв. Франции № 2412794 Tinn Michael и др. № 7905010 от 27.02.79 г., опубл. 24.08.79 г.

49. Сарапов А.А. Результаты испытания плоского пластмассового гелиоколлектора в условиях Сибири // Энергосбережение и нетрадиционные источники энергии в сельской местности АН СССР. СО Сиб. Энергетический институт.

Иркутск. 1989, с.112-114.

50. Кокорин А.И. Использование полимеров в гелиоэнергетике. Тезисы докладов Всесоюзной конференции «Возобновляемые источники энергии», Ереван 28—31 мая, Черноголовка, 1985, с.157.

51. Абуев И.М., Т'арнижевский Б.В. Выбор материалов для солнечных коллекторов // Гелиотехника 1990, № 5, с. 12 17.

52. Gillett W.B., Moon T.E. Solar collector. Test Methods and Design Guide-Lines // Solar Energy R&D in Europ. Community, Sera, 1985, V. 6.

53. Harris M.C., Miller C.E., Thomas T.E. Solar Energy Systema Design Part 11, Flat-Plate Solar Collectors . J. Wilay and Sons, 1986.

54. Рейзин Б.Л., Стрижевский И.В., Созанов Р.П. Защита сетам горячего водоснабжения от коррозии. М., Стройиздат, 1986 - 100 с.

55. Николаев А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. М., Л.,: Химия. 1964. 784 с.

56. Справочник по пластмассовым трубам под редакцией д.т.н., проф.В.С.Кима Л.: Химия, 1985, 246 с.

57. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии М.,: Мир, 1977, 420 с.

58. Анденсон Б. Солнечная энергия. Основы строительного проектирования. -М.: Стройиздат, 1982, 374 с.

59. Каменев Е.И., Мяснмков Г.Д., Платонов М.А. Применение пластических масс Л.: Химия, 1985, 448 с.

60. А.С. № 1507773 СССР Авезов Р.Р., Алимов Р.Р., Гунер

Е.А. и др. Композиция для получения пенопласта, 1989.

61. Авезов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения Т.: ФАН, 1988, 284 с.

62. Фрид С.Е., Методы тепловых испытаний солнечных коллекторов // Препринт ИВТАН № 3-248 -М.: 1988, 56 с.

63. Авезов Р.Р., Кахаров Н.А. К определению приведенной теплоёмкости ограждающей конструкции низкотемпературных солнечных установок // Гелиотехника, 1978, № 5, с.62-69.

64. Урунбаев А.Х., Сердюк В.В., Авезов Р.Р. и др. О влиянии тепловых потерь боковых стенок корпуса солнечного водонагревателя на его эффективность // Гелиотехника, 1983, № 6, С.66-68.

65. Авезов Р.Р., Кахаров Н.А. и др. Обобщенная методика расчета эффективности теплоприёмников солнечных водонагревателей // Гелиотехника, 1987, № 1, с. 28/33.

66. Умаров Г.Я., Авезов Р.Р., Кахаров Н.А. К исследованию распределения температуры по ширине экрана низкотемпературных солнечных водонагревателей с трубчатыми теплоприёмниками // Гелиотехника, 1978, № 6, с.41-45.

67. Авезов Р.Р., Кахаров Н.А. Исследование теплопередачи и эффективности экрана трубчатых теплоприёмников низкотемпературных солнечных водонагревателей // Гелиотехника, 1979, К" I, с.35-38

68. Авезов Р.Р., Дибиров М.Г., Хожиев К.Б. и др. Теплотехнические характеристики стального штампованного радиатора типа РСГ-2 при использовании его в качестве

теплоприёмника для солнечных водонагревателей //Гелиотехника, 1983, № 2, с.46-48.

69. Хожиев К.Б., Кахаров Н.А. Оценка потери эффективности в тепловом зазоре листотрубных разборных теплоприёмников солнечных коллекторов // Тезисы докладов республиканской научно-практической конференции // Использование солчненой энепгии в народном хозяйстве. Ташкент, 1991, с.114-115.

70. Хожиев К.Б., Алиев Р.Н. Влияние теплофизических характеристик на эффективность листотрубных теплоприёмников //Гелиотехника 1989, № I, с.82-84.

71. Авезов Р.Р., Кахаров Н.А. и др. Оптимизация ширины лучепоглощающей пластины листотрубного теплоприемника солнечных водонагревателей // Гелиотехника № 3, 1987. с.51-53.

72. Михеев М.А. Основы теплопередачи - М. - Л.:Госэнергоиздат, 1956 с.392.

73. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. - М.: Мир, 1983, 512 с.

74. Авезов Р.Р., Кахаров Н.А., Гафуров А.М. Результаты экспериментальных исследований теплотехнических характеристик солнечных коллекторов для подогрева воды//Гелиотехника, 1988, № 4, с.58-60.

75. Теймурханов А.Т. Метод расчета неустановившихся теплогидравлических процессов в термосифонных системах. Автореф. дис. канд.техн.наук. М., 1986, 16 с.

76. Хожиев К.Б., Авезов Р.Р., Гафуров А.М., Гунер Е.А. Результаты испытания пластмассовых солнечных коллекторов

//Тезисы докладов республиканской научно-практической конференции «Использование возобновляемых источников энергии в практике народного хозяйства республики». Фрунзе, 1988, с.42-44.

77. Гафуров А.М., Хожиев К.Б., Гунер Е.А., Алиев Р.Н. Результаты испытания солнечных коллекторов с пластмассовыми теплоотводящими каналами теплоприёмника и пеноэпоксидным корпусом. // Тезисы док. республиканской научно-практической конференции «Основные направления и опыт использования солнечной энергии и опыт использования солнечной энергии в народном хозяйстве», Карши, 1988, с.91-92.

78. Хожиев К.Б. Сравнение эффективности солнечных коллекторов с пластмассовыми и металлическими теплоотводящим каналом // Гелиотехника, 1991, № 3, с.46-48.

79. Хожиев К.Б., Авезов Р.Р., Гафуров А.М. Результаты испытания пластмассового солнечного коллектора на основе стеклянных труб // Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции «Проблемы и перспективы использования нетрадиционных источников энергии», Кишинев, 1989, с.79-80.

80. Хожиев К.Б., Авезов Р.Р., Гафуров А.М., Симонова А.О. Испытания пластмассового солнечного коллектора с теплостойкими трубами // Судостроительная промышленность. Серия: промышленная энергетика, охрана окружающей среды, энергоснабжение судов, 1990, выпуск 14, с.12.

81. Авезов Р.Р., Хожиев К.Б., Гафуров Л.М. Сопоставление

эффективности солнечных коллекторов с пластмассовыми и металлическими теплоприёмникоми // Тезисы докладов республиканской практической конференции «Использование солнечной энергии в народном хозяйстве», Ташкент, 1991, с.111-113.

82. Справочник проектировщика. Часть I. Отопление, водопровод и канализация. Под ред. И.Г.Староверова. - М.: Изд-во литература по строительству, 1967. С.372-373.

83. Легейдо С.М. Методика оценки экономической эффективности использования солнечной энергии для теплоснабжения, отопления и вентиляции. Сб. научных трудов ЦНИИЭП инженерного оборудования Госгражданстроя СССР, М.: 1981. с.156-162.

84. Рекомендация по технико-экономическому обоснованию применения нетрадиционных солнечных и солнечно-топливных систем теплохладоснабжения на гражданских и промышленных объектах. ЦНИИЭП инженерного оборудования Госгражданстроя СССР. М.: 1987, 55 с.

85. Методические рекомендации по определению экономической эффективности установок и устройства, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии. Государственный комитет по науке и технике при Совете Министров Грузинской ССР, Тбилиси: 1987. -107 с.

86. Временные методические рекомендации по определению социально-экономического эффекта прикладных научно-исследовательских работ. Ташкент: ФАН, 1984, -40 с.

87. Установки солнечного горячего водоснабжения. Нормы проектирования ВСН. с.52-86.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКИ ВЫГОДНОГО ЗНАЧЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НАГРЕВА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В КАНАЛАХ ТЕПЛОПРИЁМНИКА СОЛНЕННЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

Методы оценки экономической эффективности использования солнечных коллекторов для горячего водоснабжения рассмотрены в [82- 86]. В отличие от [82-86] технико-экономический анализ эффективности внедрения солнечных коллекторов предложенный нами метод предусматривает определение экономически выгодного значения температуры нагрева теплоносителя в каналах теплоприёмника солнечных коллекторов.

В связи с тем, что в период перехода и становления рыночных экономических отношений определение экономической эффективности внедрения солнечных коллекторов на основе прейскурантных стоимостей солнечных коллекторов и минерального топлива (на уровне цен 1990 г.) уже не представляет практического интереса. Нами для определения экономически выгодного значения температуры нагрева теплоносителя в солнечных коллекторах использовано соотношение удельне капитальных затрат на солнечные коллекторы и удельной стоимости тепловой энергии.

Метод определения экономически выгодного значения температуры нагрева теплоносителя в теплоприёмниках солнечных

коллекторов базируется на установлении экономически выгодного режима их эксплуатации.

Согласно этому методу солнечный коллектор считается экономически выгодной, если срок окупаемости меньше нормативного срока амортизации $(\frac{1}{\mathrm{E_н}})$ т.е.

$$\mathrm{T_{ок}} = \frac{1}{\mathrm{E_н}} \tag{1}$$

($\mathrm{E_н}$ - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений) Срок окупаемости низкопотенциальных солнечных нагревателей ($\mathrm{T_{ок}}$) определяется отношением удельных капитальных затрат на их создание $\left(\mathrm{C_{ту}^{уд}}\right)$ к ежегодному удельному экономическому эффекту от их эксплуатации $\left(\mathrm{Э_{гу}^{уд}}\right)$.

$$\mathrm{T_{ок}} = \frac{\mathrm{C_{ту}^{уд}}}{\mathrm{Э_{гу}^{уд}}} \tag{2}$$

где

$$\mathrm{Э_{гу}^{уд}} = Q_{\mathrm{пол}}^{\mathrm{уд}} C_{\mathrm{тепл}}^{\mathrm{уд}} - \mathrm{C_{ту}^{уд}}(\mathrm{E_н} + \sum \mathrm{в}_i) \tag{3}$$

где: $C_{\mathrm{тепл}}^{\mathrm{уд}}$ - предельно допустимая удельная стоимость тепловой энергии;

$\sum \mathrm{в}_i$ - средневзвешенные коэффициенты амортизации, текущего ремонта, на заработную плату и прочих расходов.

Подставляя (2) и (3) в (I) с учетом, что

$$Q_{\mathrm{пол}}^{\mathrm{уд}} = \eta_{\mathrm{тп}} \left(\eta_{\mathrm{опт}} - \mathrm{К}_{\mathrm{пр}_{\mathrm{р-о}}} \frac{t_f - t_0^{\mathrm{дн}}}{\bar{q}_{\mathrm{пад}}}\right) Q_{\mathrm{пад}}^{\mathrm{уз}} \tag{4}$$

$$\bar{t}_{f_{\mathrm{эк}}} = \bar{t}_f \tag{5}$$

$$\frac{C_{ту}^{уд}(2E_н+\sum в_i)}{C_{тепл}^{уд}} \leq \bar{\eta}_{тп}\left(\bar{\eta}_{опт} - К_{пр_{р-о}}\frac{\bar{t}_{f_{эк}}-\bar{t}_0^{дн}}{\bar{q}_{пад}}\right) \quad (6)$$

определим $\bar{t}_{f_{эк}}$ из (6)

$$\bar{t}_{f_{эк}} \leq \bar{t}_0^{дн} + \frac{\bar{q}_{пад}}{\bar{\eta}_{тп}\bar{К}_{пр_{р-о}}}\left[\bar{\eta}_{опт}\bar{\eta}_{тп} - \frac{C_{ту}^{уд}(2E_н+\sum в_i)}{C_{тепл}^{уд}Q_{пад}^{уз}}\right] \quad (7)$$

Если учесть, что $E_н$=0,15 (для новой техники) и $\sum в_i$=0,1 [87], то (7) примет вид

$$\bar{t}_{f_{эк}} \leq \bar{t}_0^{дн} + \frac{\bar{q}_{пад}}{\bar{\eta}_{тп}\bar{К}_{пр_{р-о}}}\left[\bar{\eta}_{опт}\bar{\eta}_{тп} - \frac{0{,}4C_{ту}^{уд}}{C_{тепл}^{уд}Q_{пад}^{уз}}\right] \quad (8)$$

Значения произведений $\bar{\eta}_{опт}\bar{\eta}_{тп}$ и $\bar{\eta}_{тп}\bar{К}_{пр_{р-о}}$ в (8) определяются по результатам испытаний, а значения $Q_{пад}^{уз}$, $\bar{q}_{пад}$ и $\bar{t}_0^{дн}$ о в общем случае определяются по формулам

$$Q_{пад}^{уз} = \bar{q}_{пад}z \quad (9)$$

$$\bar{q}_{пад} = \frac{\sum_i\left(\bar{q}_{пад_i}z_i\right)}{\sum_i z_i} \quad (10)$$

$$\bar{t}_0^{дн} = \frac{\sum_i(\bar{t}_0^{дн}z_i)}{\sum_i z_i} \quad (11)$$

Значение -z: в (9)-(11) определяется из

$$z = \frac{2}{15}arccos(-tq\varphi tq\delta_i) \quad (12)$$

где δ_i - склонение Солнца

$$\delta_i = 23{,}45 \sin\left(360 \frac{n_i+284}{365}\right) \quad (13)$$

(n_i - порядковый номер дня года).

Как следует из (8), для установления экономически выгодного значения температуры нагрева теплоносителя в солнечных нагревателях достаточно иметь информацию о средних за сезон их эксплуатации значениях $\bar{q}_{\text{пад}}$, $\bar{t}_0^{\text{дн}}$, $\bar{\eta}_{\text{опт}} \cdot \overline{\eta}_{\text{тп}}$, $\bar{\eta}_{\text{тп}} \overline{\text{К}}_{\text{пр}_{\text{р-о}}}$, $Q_{\text{пад}}^{\text{уз}}$ а также отношения $\frac{\text{С}_{\text{гу}}^{\text{уд}}}{\text{С}_{\text{тепл}}^{\text{уд}}}$

На Рис.11.1. приведена зависимость экономически выгодного значения t_f от отношения $\frac{\text{С}_{\text{гу}}^{\text{уд}}}{\text{С}_{\text{тепл}}^{\text{уд}}}$ для разработанных и обследованных нами солнечных коллекторов.

Как следует из Рис.11.1., в режимах эксплуатации, при которых $t_f < 35^0\text{C}$ предпочтение имеет применение солнечного коллектора без светопрозрачного покрытия по Рис.3.7. б, (т.е. с теплоприёмником полностью изготовленных из пластмассовых труб), а при $35<t_f<70$°C - солнечного коллектора по Рис.3.7. а с таким же теплоприёмником, но со светопрозрачным покрытием.

Следует отметить, что пользуясь выражением (б), можно установить предельно допустимые значения отношения $\frac{\text{С}_{\text{гу}}^{\text{уд}}}{\text{С}_{\text{тепл}}^{\text{уд}}}$ в системах солнечного горячего водоснабжения:

$$\frac{С_{ту}^{уд}}{Э_{тепл}^{уд}} \leq \left(\overline{\eta}_{опт}\overline{\eta}_{тп} - \overline{\eta}_{тп}\overline{К}_{пр_{р-о}}\frac{\bar{t}_f - t_0^{дн}}{\bar{q}_{пад}}\right) Q_{пад}^{уз} \quad (14)$$

В Таблице 11.1. приведены предельно допустимые значения $\frac{С_{ту}^{уд}}{Э_{тепл}^{уд}}$ для разработанных и обследованных нами солнечных коллекторов при $\bar{t}_f$=37,5^{0}С ($\bar{t}_{f_{вх}} = 17{,}5^0С, \bar{t}_{f_{вых}} = 57{,}5^0С$)

Как видно из Таблицы 11.1., для летнего горячего водоснабжения наилучший показатель имеет солнечный коллектор со светопрозрачным покрытием корпуса и теплоприёмником, изготовленным из пластмассовых труб.

Таблица 11.1

Предельно допустимые значения $\frac{С_{ту}^{уд}}{Э_{тепл}^{уд}}$ для разработанных и обследованных нами солнечных коллекторов ГДж/м^2

Типы солнечных коллекторов		
1	2	3
6,33	6,23	4,59

Обозначения I и 2 в Таблице 11.1, соответствуют солнечным коллекторам с теплоприёмниками, изготовленными из пластмассовых труб (в виде параллельно уложенных друг к другу труб) со светопрозрачным покрытием корпуса и без него, а 3 - солнечному коллектору с листотрубным теплоприёмником со светопрозрачным покрытием корпуса

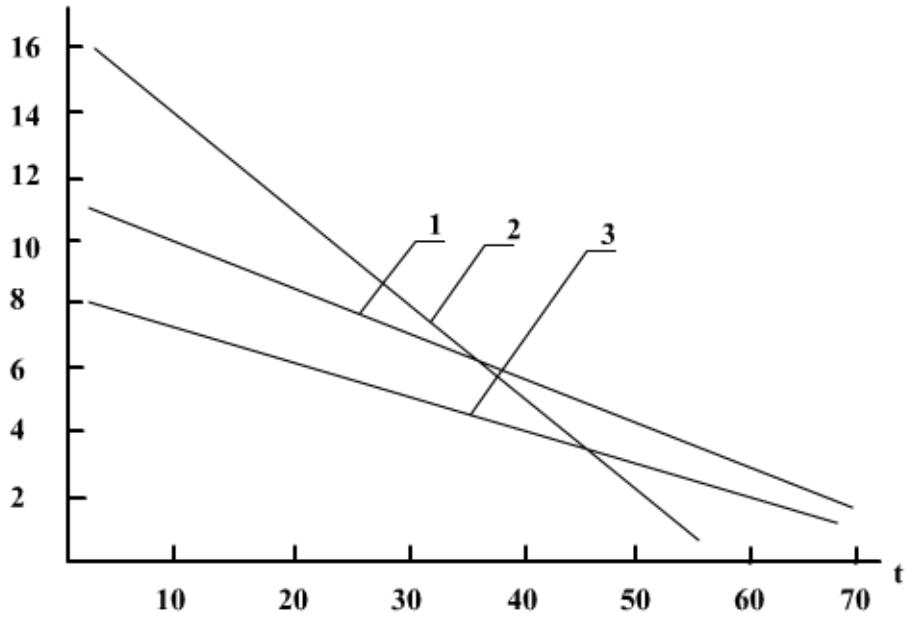


Рис.11.1. Зависимость экономически выгодного значения t_f от отношения $\frac{С_{ту}^{уд}}{Э_{тепл}^{уд}}$ для солнечных коллекторов:

1, 2 и 3 - соответствуют порядковому номеру типов солнечных коллекторов по Таблице 11.1.