А.Л. Торопов

**КОМБИНИРОВАННЫЕ
ТЕПЛОВЫЕ ГЕЛИОСИСТЕМЫ**

Часть 1

**Тепловые солнечные коллекторы для индивидуальных
и децентрализованных систем отопления
и горячего водоснабжения**

Учебное пособие

Москва
2019

УДК 621.472

ББК 31.368

Т61

Торопов А.Л.
Т61 **Комбинированные тепловые гелиосистемы. Ч. 1.**
Тепловые солнечные коллекторы для индивидуальных
и децентрализованных систем отопления и горячего
водоснабжения: учебное пособие. – М.: Издательский
дом Академии Естествознания, 2019. – 88 с.

ISBN 978-5-91327-570-7

DOI 10.17513/np.346

Учебное пособие посвящено вопросам устройства тепловых солнечных коллекторов для индивидуальных и коллективных систем отопления и горячего водоснабжения. Предназначено для специалистов в области традиционной теплоэнергетики и энергии возобновляемых источников.

ISBN 978-5-91327-570-7

© Торопов А.Л., 2019

© ИД «Академия Естествознания»

© АНО «Академия Естествознания»

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
Введение. ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ. ТЕРМИНОЛОГИЯ. ПРИМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ.....	7
Глава 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛОВОГО КОЛЛЕКТОРА	17
1.1. Принцип работы солнечного теплового коллектора	17
1.2. Основные элементы коллектора. Абсорбер, селективное покрытие, защитные стекла, теплоноситель	21
Глава 2. ТИПЫ СОЛНЕЧНЫХ ЖИДКОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ	31
2.1. Открытые тепловые солнечные коллекторы	31
2.2. Плоские закрытые солнечные трубчатые тепловые коллекторы	36
2.3. Закрытые трубчатые и объемные солнечные коллекторы	47
2.4. Вакуумные трубчатые коллекторы	49
2.4.1. Вакуумные трубки и их характеристики	49
2.4.2. Тепловые каналы вакуумных солнечных коллекторов.....	52

2.4.3. Преимущества и недостатки, показатели эффективности вакуумных трубчатых солнечных коллекторов	57
Глава 3. ОРИЕНТАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В ПРОСТРАНСТВЕ, СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ	64
3.1. Ориентация и угол наклона плоских солнечных коллекторов.....	64
3.2. Сравнительный анализ применения солнечных коллекторов различных типов	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	74
ГЛОССАРИЙ	76
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	80
ПРИЛОЖЕНИЕ	82

ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие посвящено вопросам устройства энергоэффективных индивидуальных и децентрализованных коллективных систем отопления и горячего водоснабжения и состоит из четырех частей. В первой части, «Тепловые солнечные коллекторы для индивидуальных и децентрализованных систем отопления и горячего водоснабжения», рассмотрено современное состояние и перспективы применения тепловых коллекторов на территории Российской Федерации, их конструкции и оценке энергетической эффективности.

Гелиосистема – оборудование для преобразования энергии солнечной радиации в другие, удобные для использования виды энергии – тепловую или электрическую. Тепловые гелиосистемы используются в следующих направлениях:

- Горячее водоснабжение и отопление частных домов
- Горячее водоснабжение и отопление многоквартирных домов при децентрализованной системе предоставления услуг теплоэнергетики.
- Горячее водоснабжение промышленных и коммерческих объектов.

Комбинированные тепловые гелиосистемы – энергетические тепловые технические устройства, использующие для своей работы, как традиционные источники энергии – ископаемые углеводороды, так и энергию возобновляемого источника – Солнца.

Вопросы работы гелиосистем для выработки электроэнергии с последующим преобразованием ее в тепловую, в данной работе, не рассматриваются. Фотоэлектрические гелиосистемы современного уровня имеют коэффициент полезного действия преобразования солнечной энергии в электрическую, равный 0,17–0,22,

и при последующем преобразовании ее в тепловую энергию с КПД 0,95–0,97, имеют суммарный КПД не более 0,2. Тепловые солнечные коллекторы, непосредственно преобразующие солнечную энергию в тепловую, имеют КПД, достигающий значения 0,8.

Также не рассматриваются конструкции солнечных коллекторов, в дальнейшем (СК), производящих одновременно и тепловую и электрическую энергию. Поскольку, с точки зрения подготовки и использования тепловой энергии в системах горячего водоснабжения (ГВС) и отопления, применение данных устройств неэффективно. Стоимость таких систем значительно выше, а эффективность производства тепловой энергии значительно ниже, чем у классических тепловых солнечных коллекторов. Для удобства работы по изучению представленного материала, термины и определения, встречающиеся впервые, выделены жирным шрифтом и представлены в конце учебного пособия в отдельном разделе Глоссарий.

Учебное пособие может быть рекомендовано студентам и специалистам строительных и энергетических специальностей и всем другим, кого интересуют вопросы энергоэффективности систем индивидуальных и децентрализованных коллективных хозяйств.

Введение. ПАРАМЕТРЫ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ. ТЕРМИНОЛОГИЯ. ПРИМЕНЕНИЕ СОЛНЕЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В СИСТЕМАХ ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Энергоэффективность – эффективное (рациональное) использование энергетических ресурсов – достижение экономически оправданной эффективности использования топливно-энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологии и соблюдении требований к охране окружающей среды.

Коэффициент полезного действия (КПД) – характеристика эффективности системы (устройства, машины) в отношении преобразования или передачи энергии. Определяется отношением полезно использованной энергии к затраченной энергии, полученной системой.

Возобновляемые источники энергии – означают неископаемые источники энергии (ветер, солнечная энергия, геотермальная, энергия волн, приливы, гидроэнергия, биомасса, газ из органических отходов, газ установок по обработке сточных вод и биогазы) (Директива 2003/54/ЕС).

Человечество потребляет энергию, в подавляющем большинстве, полученную при сжигании традиционных ископаемых углеводородов, с каждым годом все больше. Но суммарное количество этой потребляемой энергии составляет всего около 0,0125% доли процента от энергии возобновляемых источников, имеющих на планете Земля, главная из которых – энергия Солнца [1]. Задача в том, как научиться эффективно использовать эти ресурсы.

Кроме того, энергия возобновляемых источников экологически чистая энергия.

Последние десятилетия постоянно поднимается вопрос о снижении странами выбросов в атмосферу парниковых газов, влияющих, по мнению ряда ученых, на потепление климата планеты и выживание человечества [2, 3]. Теплоэнергетика, наряду с другими отраслями, вносит большой вклад в накопление парниковых газов, поскольку именно при сжигании ископаемого топлива в котлах коммунального хозяйства и индивидуальных домов, происходит выброс диоксида углерода. Применение, при решении вопросов теплоснабжения, высокоэффективных технологий, возобновляемых источников энергии, позволит сохранить планету.

В мире сложная экономическая ситуация. Экономика многих стран-лидеров благосостояния стагнирует, либо развивается очень низкими темпами. В такие периоды мирового развития актуальным становится вопрос экономии энергоресурсов. Отопление и потребление горячей воды – значительные статьи расходов бюджетов, как индивидуальных домовладельцев, так и государств (к примеру, Россия), исторически взявших на себя затраты на поддержание функционирования систем жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ). Снижение стоимости киловатта тепловой энергии, доставленной конечному потребителю – одна из важнейших экономических задач, стоящей перед техническими и фундаментальными науками.

Тепловой солнечный коллектор (ТСК) – устройство для сбора тепловой энергии Солнца, переносимой видимым светом и ближним инфракрасным излучением.

Инсоляция – облучение поверхности или пространства параллельным пучком лучей, поступающих с направления, в котором виден в данный момент центр солнечного диска.

Фактическая инсоляция всегда зависит от ориентации и конфигурации освещаемого солнцем объекта.

Единицей измерения потока солнечной энергии в системе СИ является ватт на квадратный метр ($\text{Вт}/\text{м}^2$). При среднем расстоянии от Земли до Солнца – 150 миллионов километров – плотность энергии солнечного излучения, которое достигает атмосферы Земли, составляет в среднем $1,367 \text{ кВт}/\text{м}^2$. На рис. 1 представлена интенсивность падающего на Землю солнечного излучения в зависимости от длины волны.

Рис. 1. Интенсивность падающего на Землю солнечного излучения в зависимости от длины волны

Солнечная радиация – энергетическая освещенность (облученность или поверхностная плотность потока излучения), создаваемая электромагнитным излучением, поступающим от Солнца, атмосферы и земной поверхности, единицы измерения:

мгновенное значение в кВт/м^2 , часовые и суточные суммы в МДж/м^2 . Тепловая энергия солнца – излучение солнечной радиации в диапазоне частот 350–1100 нм.

Суммарное солнечное излучение – прямое и рассеянное солнечное излучение, поступающее на горизонтальную поверхность. Единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м^2 , часовые и суточные суммы в МДж/м^2 .

Прямое солнечное излучение – энергетическая освещенность, поступающая на деятельную поверхность в виде пучка параллельных лучей, исходящих непосредственно от диска Солнца. Единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м^2 , часовые и суточные суммы в МДж/м^2 .

Рассеянное солнечное излучение – энергетическая освещенность, поступающая на земную поверхность со всего небесного свода под действием атмосферных и оптических факторов, за исключением действия прямого солнечного излучения. Единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м^2 , часовые и суточные суммы в МДж/м^2 .

Отраженное солнечное излучение (применительно к ТСК) – энергетическая освещенность, создаваемая направленным солнечным излучением, отраженным от поверхности отражателя на поверхность ТСК. Единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м^2 , часовые и суточные суммы в МДж/м^2 .

В пасмурные дни прямая солнечная радиация отсутствует и нагрев солнечных коллекторов зависит только от рассеянного солнечного излучения. Прямое солнечное излучение отсутствует, если в дневное время, предметы не дают тени. В средней полосе России осень и зима пасмурные и доля рассеянной энергии в эти периоды времени составляет до 90% от общей солнечной энергии. Соотношение всех видов энергий солнечного излучения сильно зависят от климатических и географических данных. Эти

показатели представлены во многих изданиях, большинство из которых относятся к периоду образования СССР, например [4, 5].

Одним из важнейших вопросов эффективной работы ТСК является их правильное расположение относительно солнца. Конструкции солнечных коллекторов могут быть стационарными, ориентированными на положение солнца в определенный момент времени, или оснащенными механизмами, способными отслеживать его движение.

Солнечный треккер – это устройство, позволяющее следить за движением солнца по небосводу, и перемещать СК в положение, в котором поглощение солнечных лучей происходит наиболее эффективно. Использование этих устройств позволило бы значительно увеличить эффективность работы гелиосистемы.

Но далеко не всегда используются такие устройства. Причина этому их стоимость и необходимость в квалифицированном техническом обслуживании. Большинство ТСК, применяемых для индивидуальных и децентрализованных объектов строительства, являются стационарными, ориентированными на фиксированное положение Солнца, конструкциями. Их расположение определяется формой крыши или опорной рамы. Очень важно правильно выбрать направление на Солнце и угол наклона фиксированных солнечных панелей.

Для оптимальной ориентации коллекторов, необходимо знать основные угловые параметры вращения Земли вокруг Солнца и вокруг своей оси (широта места установки φ , часовой угол ω , угол солнечного склонения δ , угол наклона к горизонту β , азимут α). Их схема представлена на рис. 2.

Широта места φ – одна из географических координат: дуга меридиана между экватором и параллелью данного места, или угол между плоскостью экватора и отвесной линией в данном месте земной поверхности. Изменяется от 0 до 90°; от экватора до Северного полюса – северная широта, от экватора до Южного полюса – южная широта.

Рис. 2. Основные и дополнительные углы движения Солнца:
 а – схема кажущегося движения солнца по небосводу;
 б – углы, определяющие положение точки А на земной поверхности относительно солнечных лучей

Часовой угол Солнца (ω) – угол между меридианом данного пункта наблюдений и кругом склонения светила; или дуга экватора между плоскостями меридиана и круга склонения. Величина (ω) отсчитывается от меридиана к западу. **Часовой угол (ω)** переводит местное солнечное время в число градусов, которое солнце проходит по небу. По определению часовой угол равен нулю в полдень. Земля поворачивается на 15° за один час. Утром угол направления Солнца отрицательный, вечером – положительный.

Необходимо помнить о разнице директивного времени часовых поясов и реального астрономического солнечного времени. К примеру, в Москве в январе эта разница составляет 2298 секунд, в Краснодаре 1964 секунды, Екатеринбурге – 3971 секунды. Во Владивостоке – 4339 секунды. Это отличие астрономического и директивного времени надо учитывать при установке солнечных коллекторов. Значение астрономического времени места вычисляется по формулам, но сейчас легко найти различные автоматические калькуляторы, где нужно только ввести искомое место и происходит автоматический

расчет астрономического времени, директивного и разницы между ними. К примеру, такой ресурс на <https://time.satmaps.info/>, <http://dateandtime.info/ru/citysunrisesunset.php?id=524901>, продолжительность светового дня для любого места в любое время <https://planetcalc.ru/300/>.

В Москве, продолжительность светового дня меняется от 7 до 17 часов 30 минут, следовательно, Солнце перемещается за это время по дуге около 105 градусов зимой и 260 градусов летом.

Угол склонения Солнца (δ) зависит от вращения Земли вокруг Солнца, поскольку орбита вращения имеет эллиптическую форму и сама ось вращения тоже наклонена, то угол меняется в течение года от значения $23,45^\circ$ до $-23,45^\circ$. Угол склонения становится равным нулю два раза в год в дни весеннего и осеннего равноденствия.

Склонение солнца для конкретно выбранного дня определяется по формуле:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right), \quad (1)$$

где n – порядковый номер дня в году, отсчитанный от 1-го января.

Наклон к горизонту (β) образуется между горизонтальной плоскостью и солнечной панелью.

Азимут (α) характеризует отклонение поглощающей плоскости коллектора от южного направления, при ориентировании солнечного коллектора точно на юг азимут $= 0^\circ$.

Вопросы эффективного расположения солнечных тепловых коллекторов в зависимости от периода эксплуатации в течение года и другие вопросы проектирования солнечных тепловых коллекторов будут рассмотрены в других разделах учебного пособия.

По данным института АЕЕ INTEC, на конец 2012 г. в мире установлено 383 млн квадратных метров солнечных тепловых установок общей тепловой мощностью 268,1 ЕВт с годовой выработкой тепловой энергии 225 ТВт·ч [6]. С каждым годом эти показатели только возрастают. К сожалению, в России общая площадь солнечных тепловых установок оценивается в 30 тыс. м² [7].

По удельной тепловой мощности гелиоустановок на 1000 человек первое место занимает Кипр (542 кВт, площадью 774 м²), второе – Австрия (406 кВт, 580 м²), третье – Израиль (400 кВт, 571 м²). На сегодняшний день большинство гелиоустановок построены в Китае – на площади 217,4 млн м² (152,2 ЕВт), или 64,9% от общемирового использования этих установок. В Европе – 56,1 млн м² (39,3 ЕВт), или 16,7% [7].

Исследования, проведенные лабораторией возобновляемых источников энергии Института высоких температур РАН, позволили создать «Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России» [8]. Согласно данным, представленным в этой работе, более 60% территории России, в том числе и многие северные районы, характеризуются среднегодовым поступлением солнечной радиации от 3,5 до 4,5 кВт·ч/м² в день, а регионы Приморья и юга Сибири от 4,5 до 5,0 кВт·ч/м² в день, что не сильно отличается от аналогичных показателей центральной Европы (5,0–5,5 кВт·ч/м² в день).

Карта распределения суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность (угол равен широте) для территории России, представлена на рис. 3 [8].

В табл. 1П Приложения приведены усреднённые данные по среднемесячной энергии солнечного излучения (инсоляции) для некоторых городов с учётом климатических условий (частоты и силы облачности) для неподвижных панелей,

ориентированных на юг под разными углами наклона, и для систем, отслеживающих движение Солнца. Инсоляция измерялась на открытом пространстве. Растительный покров, соседние здания, снежный покров, близость открытых водных поверхностей и другие факторы могут влиять на реальные значения полной солнечной энергии, падающей на тепловой коллектор. Для определения дневных средних показателей, разделите указанные значения на количество дней в месяце. Реальные дневные показатели могут отличаться от средних в несколько раз, но с точки зрения работы солнечного теплового коллектора, важны именно средние значения.

Рис. 3. Распределение суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность (угол равен широте) для территории России [8]

Все данные указаны в джоулях на квадратный метр (Дж/м²). В скобках справочно приведены те же величины в кВт·ч/м² (1 кВт·ч = 3,6 МДж).

Также в Приложении указаны значения доли **рассеянного излучения** в общей инсоляции для городов **Москва** и **Алма-Ата**.

Литература по разделу Введение

1. Шуткин О.И. Перспективы в мире и состояние в России // Energy Fresh. 2011. № 3. С. 25-27.
2. United Nations on Climate Change. General Convention Kyoto, 1997.
3. Грицевич И. Протокол конференции по глобальному климату в Киото: новые правила игры на следующее десятилетие // Экономическая эффективность. Ежеквартальный бюллетень Центра по эффективному использованию энергии (ЦЭНЭФ). М., 1998. № 18 (январь-март).
4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6, вып. 1–34. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1989–1998.
5. ГОСТ 16350-80 Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей.
6. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение в мире и в России // С.О.К. 2013. № 8.
7. Бутузов В.А. Обзор мирового рынка солнечных систем теплоснабжения // С.О.К. 2013. № 12.
8. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. – М.: ОИВТ РАН, 2010. – 84 с.

Глава 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ И ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СОЛНЕЧНОГО ТЕПЛООВОГО КОЛЛЕКТОРА

1.1. Принцип работы солнечного теплового коллектора

Примитивнейший ТСК – это стальная, покрашенная черной краской, бочка с водой, установленная на крыше. Вариант такого устройства представлен на рис. 4.

Рис. 4. Примитивный солнечный тепловой коллектор в виде бочки

Не смотря на свою примитивность, такой ТСК выполняет главную функцию – преобразует солнечную тепловую энергию в нагретую и готовую к использованию воду.

Стальная поверхность бочки – устройство, преобразующее солнечную радиацию в тепловую. Бочка покрыта черной краской для увеличения поглощения солнечной энергии, внутри бочки находится вода, которая нагревается за счет внутреннего теплообмена.

Данная конструкция обладает множеством недостатков. Нагрев воды в таком солнечном коллекторе происходит только под воздействием прямых солнечных лучей. Если на небе облака, или пасмурно, то нагрева не происходит. Более того, если вода нагрелась, то при заходе солнца в облака, она остывает, поскольку бочка не имеет никакой термоизоляции, а температура окружающего воздуха, даже летом, бывает ниже 25 градусов. Если дует ветер, то охлаждение происходит еще быстрее. Но с точки зрения процесса преобразования солнечной энергии в удобную для использования человеком горячую воду, данное устройство является полноценным.

На рис. 5 представлены некоторые типы солнечных коллекторов промышленного производства, предназначенные для подготовки горячей воды в индивидуальных и многоквартирных домах.

Работа СК, независимо от конструктивных особенностей, состоит в следующей последовательности.

А) Солнечная энергия видимого и ближайшего инфракрасного излучения спектров, в диапазоне 300–1100 нм попадает на абсорбер солнечного коллектора, поверхность которого покрыта селективным покрытием.

Абсорбер – элемент СК. Техническое устройство, предназначенное для преобразования солнечной энергии в тепловую.

Б) Абсорбер, передает тепло непосредственно жидкости или трубкам произвольной формы, по которым течет нагреваемая жидкость (теплоноситель).

Теплоноситель – жидкое или газообразное вещество, применяемое для передачи тепловой энергии.

Рис. 5. Тепловые солнечные коллекторы, установленные на крышах и стенах индивидуальных и коммерческих сооружений

Как видно из формулировки, теплоносителем может быть как жидкость, так и воздух. Соответственно по этому определению, тепловые солнечные коллекторы могут быть:

- жидкостные;
- воздушные.

В) Теплоноситель передает тепло приборам водоснабжения или отопления, либо непосредственно используется потребителем.

На рис. 6 показана конструкция примитивного воздушного ТСК. В качестве абсорбера выступает окрашенная черным цветом алюминиевая гофрированная воздушная труба, теплоносителем является воздух, движение которого создается вентилятором.

Если в жидкостном коллекторе абсорбер непосредственно нагревает теплоноситель, а циркуляция теплоносителя определяется разницей плотности холодного и нагретого теплоносителя (естественной циркуляцией), то такие солнечные тепловые

коллекторы называются коллекторы со **свободной (прямоточной) циркуляцией**. Если движение теплоносителя осуществляется циркуляционным насосом, то коллекторами с **принудительной циркуляцией**. Также, по условию циркуляции теплоносителя тепловые коллекторы можно классифицировать, как **энергетически независимые** – если на циркуляцию воды не тратится дополнительная энергия, и **энергетически зависимые**, если для этого процесса нужна дополнительная энергия.

Рис. 6. Простейший воздушный тепловой солнечный коллектор

Если абсорбер солнечного коллектора нагревает теплоноситель и он непосредственно передается в систему отопления и ГВС то такие коллекторы называются **одноконтурные или одноступенчатые**. В том случае, если абсорбер нагревает элементы, в которых циркулирует легкоиспаряемая жидкость и она, нагреваясь превращается в насыщенный пар, который в последствии

конденсируется на теплосъемнике отдельной циркулирующей с теплоносителем системе, то такой солнечный теплообменник называется **двухконтурным или двухступенчатым**.

Более подробно все типы солнечных тепловых коллекторов будут рассмотрены в последующих главах данного учебного пособия.

1.2. Основные элементы коллектора. Абсорбер, селективное покрытие, защитные стекла, теплоноситель

Как было указано выше, абсорбер – главный элемент СК. В нём происходит нагрев теплоносителя систем отопления и горячего водоснабжения. Отсюда рождаются важнейшие требования к материалу абсорбера:

- высокая теплопроводность;
- низкая стоимость;
- стойкость к температурным нагрузкам и другим атмосферным факторам;
- иметь длительный срок жизни;
- простота в обработке.

В некоторых случаях, к абсорберам предъявляется требование прочности. Так, к примеру, в варианте простейшего ТСК, в виде бочки, представленного на рис. 4, материал бочки-абсорбера должен быть прочным, поскольку это еще и резервуар для хранения жидкости.

В большинстве случаев, материалами изготовления абсорберов являются: медь, алюминий, сталь. В простейших дешевых абсорберах применяют пластик.

В табл. 1 указаны значения показателей коэффициентов теплопроводности основных материалов абсорберов и других материалов, используемых в солнечных тепловых коллекторах.

Из таблицы видно, что наилучшим материалом, с точки зрения теплопроводности, является медь. Железо имеет теплопроводность

в четыре раза меньше меди и в 2,5 раза меньше алюминия. Однако стоимость меди и алюминия значительно выше. Теплопроводность пластика в 200 раз хуже стали, поэтому абсорберы из пластика применяются только для бытовых дешевых солнечных коллекторов, когда эффективность их работы не интересует потребителя. Могут быть абсорберы из стекла с напылением. Стекло имеет теплопроводность в 20 раз хуже стали, но оно имеет ряд преимуществ – длительный срок службы, относительно низкая цена, стойкость к старению, агрессивным средам и температуре.

Т а б л и ц а 1

Коэффициенты теплопроводности различных веществ

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Графен	$4840 \pm 440 \dots 5300 \pm 480$
Медь	401
Алюминий	202–236
Латунь	97–111
Железо	92
Сталь нелегированная	47–58
Термопасты высокого качества	5–12 (на основе соединений углерода)
Стекло	1–1,15
Вода при нормальных условиях	0,6
Свежий снег	0,10–0,15
Пенополистирол (горючесть Г1)	0,038–0,052
Экструдированный пенополистирол (горючесть Г3 и Г4)	0,029–0,032
Стекловата	0,032–0,041
Воздух (300 К, 100 кПа)	0,022
Вакуум (абсолютный)	0 (строго)

Конструктивные исполнения абсорберов будут рассмотрены в следующих разделах.

Абсорберы должны поглощать энергию и передавать ее теплоносителю. Для того, чтобы абсорберы не излучали тепловую энергию в пространство их покрывают специальным селективным покрытием.

Селективное покрытие – покрытие, обеспечивающее максимальное поглощение солнечной энергии при минимальной отражающей способности.

Селективное покрытие абсорберов СК играет очень важную роль в показателях эффективности их работы. Такое покрытие может быть выполнено в виде многослойной краски, однослойной или многослойной пленки и нанесено на поверхность абсорбера способами напыления, гальваники или вакуумного формования. Есть еще один способ улучшить поглощающую способность поверхности абсорбера – химически обработать его поверхность.

Важно обратить внимание на устойчивость селективного покрытия к атмосферным факторам, особенно для открытых абсорберов, а также, на способность к старению (срок службы) – сохранению постоянных теплофизических характеристик при длительном температурном воздействии.

Селективные покрытия характеризуются тремя показателями:

- Поглощающая способность.
- Излучающая способность.
- Общая эффективность.

Поглощающая способность, важнейший показатель, определяется тем, какое количество солнечного излучения материал может преобразовать в тепловую энергию.

Излучающая способность (отрицательный показатель), характеризует количество тепла, которое отдает абсорбер в окружающую среду в виде излучения.

Общая эффективность – отношение первых двух показателей. Это относительный коэффициент, показывает эффективность селективного покрытия.

В табл. 2 показаны значения показателей эффективности различных селективных покрытий, применяемых для солнечных тепловых коллекторов.

Таблица 2

Показатели эффективности различных селективных покрытий

Поверхность	Поглощающая способность для солнечной энергии	Излучающая способность для плоских солнечных коллекторов	Общая эффективность
1	2	3	4
Co ₃ O ₄ на серебре; методом осаждения и окисления	90%	0,27	3,3
Кристаллы PbS на Al	89%	0,20	4,5
CuO на Ni; медь в качестве электрода с последующим окислением	81%	0,17	4,8
«Черная медь» на Cu; методом обработки Cu раствором NaOH и NaClO ₂	89%	0,17	5,2
«Черный никель» на оцинкованном железе	89%	0,17	5,2

Окончание табл. 2

1	2	3	4
«Эбанол С» на Cu; промышленная обработка чернением Cu, обеспечивающая покрытие в основном на CuO	90%	0,16	5,6
CuO на анодированном Al; обработка Al горячим раствором $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ –KMnO	85%	0,11	7,7
«Черный никель»; содержит окиси и сульфиды Ni и Zn на полированном Ni	92%	0,11	8,4
CuO на Al; методом набрызгивания разбавленного раствора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ на горячую алюминиевую пластину с последующей горячей сушкой	93%	0,11	8,5
Горячая сушка Al_2O_3 –Mo– Al_2O_3 Mo– Al_2O_3 Mo– Al_2O_3 ; промежуточные слои на Mo (при 260 °C	91%	0,09	10,7
«Черный никель» 2 слоя поверх гальванопокрытия из Ni на мягкой стали (после 6-часового погружения в кипящую воду)	94%	0,07	13,4

Что будет, если покрасить абсорбер СК простой черной масляной краской?

Краски поглощают, в основном, видимую часть солнечного спектра, а тепловая энергия распространяется и на ближайшую инфракрасную часть. Краски выцветают под воздействием длительного ультрафиолетового излучения, теряют способность поглощать энергию, излучают энергию в инфракрасном диапазоне. Кроме того, простые строительные краски действуют, как тепло-изоляция. Солнечная панель с абсорбером, покрашенным такой краской, будет крайне неэффективной.

Современные селективные многослойные покрытия на основе черного хрома и черного никеля имеют поглощающую способность, достигающую значений 0,95. Производители некоторых селективных красок, на пример, компания «Stancolac», заявляют, что их краска «Илиолак» обладает поглощающей способностью 0,99.

Другой тип покрытия абсорбера- селективные пленки. Бывают однослойные и многослойные пленки на металлизированной подложке. Качественные селективные пленки имеют излучающую способность 5% и менее, а поглощающую способность 0,95. Общая эффективность таких покрытий достигает 20 и выше. Главным недостатком таких покрытий является их цена.

Применяются также и химические способы улучшить свойства поглощения солнечной энергии поверхностью абсорбера. Оксидная пленка на меди черного цвета, имеет хороший коэффициент поглощения солнечного излучения.

К примеру, если поверхность абсорбера выполнена из меди, то ее можно обработать (окислить) персульфатом калия, или хлоридом натрия. Или просто калением металла при высокой температуре. С последующей защитой окисленной поверхности.

Защитные стекла солнечных коллекторов

Абсорберы нагреваются под действием солнечной радиации и для того, чтобы уменьшить их тепловое излучение их накрывают прозрачными для солнечных лучей защитными стеклами.

Прозрачное защитное покрытие должно обладать следующими свойствами:

- высокая прочность (выдерживать попадание града и другие механические нагрузки);
- высокая светопроницаемость;
- обладать малым весом;

- стойкость к УФ излучению;
- противостоять повышенным температурам;
- иметь стабильные светотехнические характеристики в течение всего времени эксплуатации;
- иметь длительный срок эксплуатации;
- иметь способность к самоочищению.

Очень важно, чтобы солнечная энергия максимально проходила через защитное стекло, без отражения. На рис. 7 показана схема прохождения солнечных лучей через стеклянную поверхность. Стекла для солнечных коллекторов антирефлексные, со специальным покрытием с двух сторон, уменьшающим долю отраженной энергии. Данные стекла обеспечивают прохождение до 96% солнечной энергии, в то время, как обычные закаленные стекла имеют светопропускающую способность не более 92%.

Рис. 7. Схема прохождения солнечных лучей через защитное стеклянное покрытие плоских тепловых коллекторов

Рассмотрим существующие варианты защитных прозрачных покрытий.

Самое обычное стекло, которое применяют при изготовлении окон, обладает светопропускаемостью около 90–92%, и долговечностью, но хрупкое и имеет большой вес и низкую термостойкость.

Закаленное стекло представляет собой листовое стекло, подвергнутое специальной термической обработке с целью повышения механической прочности и обеспечения безопасного характера разрушения, обладает высокой светопрозрачностью 0,92, прочностью, высокой термостойкостью, долговечностью, но тяжелое и дорогое.

Иногда, в качестве прозрачного защитного слоя используют прозрачный поликарбонат. Сотовый поликарбонат имеет светопрозрачность около 80 %, устойчив к воздействию ультрафиолета и температурным нагрузкам, имеет малый вес, легко обрабатывается, безопасный, но имеет ограниченный срок службы (5–7 лет), теряет светопрозрачность со временем.

В настоящее время наибольшее распространение в конструкциях плоских ТСК получили закаленные антирефлексные стекла с низким содержанием железа, толщиной около 3,0-3,5 миллиметра, с внешним самоочищающимся покрытием из диоксида титана, способствующего выгоранию на солнце всего органического мусора.

Теплоносители солнечных тепловых коллекторов

Теплоноситель обеспечивает транспортировку тепловой энергии от СК в систему отопления и ГВС потребителя.

Как было отмечено выше, теплоносители ТСК могут быть жидкими и газообразными. В качестве теплоносителя газообразных СК используется воздух.

В качестве теплоносителя в жидкостных солнечных тепловых системах часто используют воду. Она имеет высокую теплоёмкость и общедоступна. Однако, использование воды в чистом виде ограничено районами, в которых не бывает отрицательных температур. В других случаях необходимо предусмотреть предотвращения заморозания воды и разрушение системы.

Требования к теплоносителям для солнечных тепловых систем могут быть общими и специальными. В большинстве случаев, специальные требования обусловлены максимальной температурой эксплуатации систем, зависящей от типа СК и ограничениями в химической активности применяемых материалов.

Общие требования к теплоносителям:

- быть инертным по отношению к материалам, использованным для изготовления системы;
- невысокой вязкость;
- высокая теплоемкость;
- высокая теплоотдача.

Вода – наиболее распространенный теплоноситель. У нее практически нет стоимости, она не токсична, но замерзает при отрицательных температурах и обладает высокой коррозионной активностью при соприкосновении с металлами (основными материалами абсорберов), кроме того, содержит растворенные соли жесткости и, при высоких температурах, возможно появление накипи. Коррозионную активность воды можно снизить добавкой ингибиторов, а соли жесткости можно убрать с помощью фильтрационных систем обратного осмоса. Главный недостаток – замерзание при температуре ниже нуля градусов Цельсия.

Антифриз – общее название для всех жидкостей не замерзающих при низких температурах.

Требования к антифризам:

- не должен быть легко возгораемым;
- не должен содержать ядовитые и токсичные вещества;
- не должен быть химически активным и разрушать элементы систем отопления.

Антифриз на основе пропиленгликоля представляет собой трудновоспламеняемую, нетоксичную жидкость. Температура кипения около 188 °С, плотность – 1,04 г/см³. Пропиленгликоль –

это органическая жидкость. Для увеличения срока службы теплоносителя, а как следствие, всей гелиосистемы в жидкость добавляют специальные антиокислительные присадки. Кроме того, при очень высоких температурах работы солнечных коллекторов в пропиленгликоль добавляют силиконы и масла. Все эти добавки, к сожалению, повышают вязкость и снижают теплоотдачу теплоносителя.

В солнечных коллекторах нельзя использовать в качестве теплоносителя антифризы на основе этиленгликоля из-за его токсичности, на основе этилового спирта из-за его низкой температуры кипения и высокой испаряемости.

Если конструкция солнечного теплового коллектора используется в климате с положительной температурой в течение года и температура в системе не превышает 100 °С, то фильтрованная вода с противокоррозионными присадками является хорошим теплоносителем.

Глава 2. ТИПЫ СОЛНЕЧНЫХ ЖИДКОСТНЫХ ТЕПЛОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ

2.1. Открытые тепловые солнечные коллекторы

Открытые СК бывают двух типов:

- конструкция из трубок или других последовательно соединенных элементов, по которым течет теплоноситель (трубчатые);
- емкость с теплоносителем (объемные).

В обоих случаях это простейшие конструкции у которых поверхность (абсорбер) непосредственно нагревается солнечными лучами. Элементы конструкции открытого теплообменника закрепляются на простейшей раме – каркасе и не защищены (открыты) от внешних воздействий окружающей среды. В качестве теплоносителя применяется вода, антифриз.

Обычно, теплообменники открытого типа применяются на садовых и приусадебных участках для подогрева воды в летних открытых душевых и открытых детских бассейнах. Часто они изготавливаются самостоятельно из подручного материала.

На рис. 8 представлены несколько оригинальных конструкций СК открытого типа.

Преимущества коллекторов открытого типа:

- дешевизна конструкции,
- обеспечивает подогрев воды для бытовых нужд летних садовых участков.

Недостатки коллекторов открытого типа:

- низкая эффективность подогрева теплоносителя;
- использование только в летнее время в теплых регионах страны;
- отсутствует защита от температурных воздействий окружающей среды, теплоноситель быстро остывает;

- нагрев теплоносителя происходит только при солнечной погоде и отсутствии облачности;
- требуется время на подогрев теплоносителя после остывания в ночной или облачный периоды времени;
- обеспечивает небольшой (до 20 °С) перепад температуры теплоносителя и окружающего воздуха;
- нагрев теплоносителя происходит только в безветренную погоду.

Рис. 8. Некоторые примеры исполнения простейших водяных и воздушных тепловых солнечных коллекторов

Существуют и промышленные СК открытого типа. Некоторые из них представлены на рис. 9.

В большинстве случаев, промышленные СК открытого типа – это поверхности из пластика черного цвета внутри которых размещены

каналы с циркулирующей водой. Солнце нагревает поверхность такого коллектора, которая, в свою очередь, нагревает воду. Нагретая вода поступает в бассейн или резервуар летнего душа.

Рис. 9. Солнечные тепловые коллекторы открытого типа промышленного изготовления

Главное преимущество таких устройств- дешевизна.

Разберем более подробно недостатки солнечных коллекторов открытого типа. Это поможет понять, что нужно сделать для повышения их эффективности.

Главный недостаток, определяющий название таких систем – отсутствует защита от температурных воздействий окружающей среды, теплоноситель быстро остывает. СК лежит на земле или на поверхности затененной от солнца, следовательно, контактирует с холодной средой, минимум равной температуре воздуха в тени. Летом днем это примерно 20 °С. Значит с одной стороны поверхность нагревается солнцем, а с другой стороны – охлаждается окружающей средой.

Решение данной проблемы простое – изолировать нижнюю поверхность коллектора. То есть установить на внутренней поверхности теплоизоляционный слой.

Рассмотрим другой пример. На небе появились тучи, СК попал в тень и нагретая передняя поверхность, теперь будет нагревать не внутренние трубки с теплоносителем, а окружающий воздух. Решение данной проблемы – закрыть переднюю поверхность СК от остывания прозрачной пластиной или стеклом. Все это защитит также от ветра, поскольку открытые солнечные коллекторы при ветре также быстро остывают. Эти изменения в конструкции, увеличат эффективность работы коллектора, но превратят его в конструкцию принципиально другого типа – закрытые от воздействия атмосферных факторов солнечные тепловые коллекторы.

Открытые СК могут обеспечивать только небольшой перепад температур (до 20 °С) между температурой теплоносителя и окружающей температурой воздуха. Это обусловлено тем, что коллекторы данного типа излучают очень много энергии в окружающую среду и имеют очень низкий коэффициент полезного действия.

Открытые СК не применяются в автономных системах отопления и подготовки горячего водоснабжения из-за низкой эффективности их работы.

КПД солнечных коллекторов открытого типа

Мгновенный коэффициент полезного действия. Угол падения солнечных лучей на коллектор постоянно меняется. За час он изменяется на 15 градусов, следовательно, меняется и количество энергии, падающей на поверхность коллектора.

КПД солнечного коллектора, подсчитанный при фиксированном положении Солнца, называется мгновенным. Максимальное значение КПД, при нулевой разницы температур между окружающей средой и коллектором. Солнце непосредственно нагревает абсорбер коллектора, Значение мгновенного КПД зависит от материала абсорбера, его толщины, апертурной площади коллектора, качества селективного покрытия.

Обычно, абсорберы СК открытого типа выполнены из стали, окрашенной в черный цвет или пластика. Если коллектор выполнен из труб, то важна плотность их навивки. При недостаточно плотной навивке, большая часть солнечной энергии проходит мимо и не нагревает трубы.

Если коллектор объемного типа и его абсорбер стальной лист, покрашенный простой черной краской, то площадь поглощения солнечной энергии большая. Но простая черная масляная краска имеет плохой коэффициент поглощения и значительная часть солнечной энергии отражается в атмосферу.

При отсутствии тепловой изоляции на задней поверхности коллектора происходят потери, преобразованной в тепло солнечной энергии на нагрев воздуха или поверхности грунта, если он находится на земле.

Определять точно КПД открытых солнечных коллекторов не имеет смысла, поскольку, в большинстве случаев, эти коллекторы делаются самостоятельно из подручного материала, а промышленные коллекторы этого типа, являются, в большей

степени, декоративными или маркетинговыми решениями и греют воду очень плохо.

Во многих статьях и учебных пособиях максимальный мгновенный КПД открытых солнечных коллекторов указывают в диапазоне 90 %, объясняя, что этот параметр, практически равен поглощающей способности абсорбера. Но у трубчатых солнечных коллекторов данного типа, плотность навивки редко бывает более 60 %, а при размещении на земле, практически никогда, не удастся направить коллектор строго перпендикулярно углу падения солнечных лучей. Поэтому реальный максимальный КПД таких систем не превышает 30–50 %. Вопросы расчета КПД солнечных коллекторов будут рассмотрены в следующих разделах.

2.2. Плоские закрытые солнечные трубчатые тепловые коллекторы

Исходя из названия, солнечные теплообменники данного типа закрыты от воздействия атмосферных факторов и имеют плоскую поверхность. Конструкция устройства представлена на рис. 10.

Плоский трубчатый солнечный коллектор состоит из:

- несущего корпуса;
- плоского абсорбера;
- трубки с теплоносителем;
- прозрачного закаленного стекла (однослойное, двухслойный пакет);
- теплоизоляции задней стенки корпуса;
- входных и выходных патрубков подсоединения к магистрали системы отопления и ГВС.

Плоские солнечные коллекторы располагаются непосредственно на склонах крыш, направленных по направлению к югу, или на специальных рамах для установки на плоских крышах или площадках.

Рис. 10. Конструкция закрытого плоского трубчатого солнечного коллектора

Принцип работы данных устройств заключается в следующем.

Солнечные лучи проходят через переднее плоское прозрачное защитное стекло, способное выдержать снеговые нагрузки, град и другие механические воздействия, через воздушную прослойку в несколько сантиметров, которая является теплоизолятором, и нагревают поверхность абсорбера. Для лучшего поглощения солнечных лучей, поверхность абсорбера покрыта селективным покрытием. К абсорберу прикреплены трубки из теплопроводного материала, по которым циркулирует теплоноситель. Абсорбер нагревает трубки, которые передают тепло теплоносителю. Движение теплоносителя в системе создается циркуляционным насосом. Вся конструкция смонтирована на прочной раме.

Конкретные значения размеров элементов плоских солнечных коллекторов определяются их производителями и являются решениями проектировщиков, но типовыми значениями можно признать следующие:

- защитное прозрачное стекло – 3–3,5 мм. При меньшей толщине, трудно обеспечить прочность, при большей, возрастает вес и снижается КПД;

- воздушный зазор между стеклом и абсорбером – 25–35 мм. При меньшем размете растут теплотери, при большем, габариты и вес;

- толщина нижнего теплоизоляционного слоя – 35–50 мм. При меньшем значении, плохая термоизоляция, при большем, растут габариты и вес.

Некоторые конструкции плоских солнечных коллекторов и их варианты размещения представлены на рис. 11.

Абсорберы плоских коллекторов бывают цельнолистовыми и перьевыми.

Рис. 11. Некоторые конструкции плоских солнечных коллекторов и варианты их размещения на крышах зданий

В первых абсорберах к отдельным пластинам прикреплена или приварена трубка, в которой циркулирует теплоноситель. Трубки в таких абсорберах соединяются между собой в виде «арфы» (коллекторный тип).

В цельнолистовых абсорберах система распределения теплоносителя бывает в виде «меандра» или же трубки соединенные коллекторным типом.

На рис. 12 представлены перьевые и цельнолистовые абсорберы плоских коллекторов, а на рис. 13, схемы соединения трубок.

Рис. 12. Перьевые и цельнолистовые абсорберы плоских коллекторов

Рис 13. Варианты соединения трубок в плоских коллекторах

В первом варианте соединения трубок, возникает вопрос равномерного распределения жидкостей по каналам. Обычно это достигается увеличением диаметра горизонтальных участков труб коллектора. Во втором варианте, необходимо предусмотреть уклоны для обеспечения вытеснения воздуха при его заполнении.

Апертурная площадь (aperture area). Площадь прозрачного ограждения солнечного коллектора, через которое солнечное излучение поступает в коллектор [1].

Однако лучше сказать, что это площадь видимой части плоского абсорбера через прозрачное ограждение.

Преимущества закрытых плоских трубчатых коллекторов

Высокая эффективность работы летом. При правильном выборе направления ориентации на солнце.

Имеют значительно более высокую эффективность, чем открытые солнечные коллекторы.

Перепад температур между коллектором и атмосферным воздухом может достигать 20–60 °С.

Хорошее соотношение цена- эффективность при эксплуатации систем только в летний период времени.

Способность самоочищаться от снега и инея. Данная способность определяется не конструкцией самого плоского солнечного коллектора. Снег оседает на поверхность и иней образуется на ней и у плоского и у другого любого коллектора в ночные часы или при полной облачности. У систем ГВС и отопления с использованием плоских трубчатых коллекторов есть возможность принудительно подогреть теплоноситель в трубках, и он нагреет абсорбер, который, в свою очередь, нагреет стекло солнечного коллектора. Снег и иней, находящийся на поверхности коллектора, растают. Применение вакуумных пакетов плоских коллекторов позволяет их использовать в более холодные периоды, но исключают возможность самоочищения.

Эффективно преобразовывает прямую солнечную радиацию. Плоские солнечные коллекторы имеют наибольшее соотношение площади абсорбера к площади всего коллектора, значит, при определенном направлении падения солнечных лучей, они имеют возможность использовать всю энергию солнца, действующую на квадратный метр поверхности.

Недостатки закрытых плоских трубчатых коллекторов

Низкая эффективность работы в холодное время года. Воздушная прослойка между защитным стеклом и абсорбером и стекло имеют значительную теплопроводность и если на улице холодно, то большая часть солнечной энергии, которая преобразуется на абсорбере в тепловую, отдается в атмосферу. Особенно

это усиливается в ветряную погоду. Таким образом, чем ниже температура, тем менее эффективен плоский солнечный коллектор.

Использование вакуумных трубчатых плоских коллекторов возможно, но они обладают очень высокой ценой и экономическая эффективность применения их сомнительна. Рекомендуемая температура эффективного использования солнечных коллекторов данного типа, выше 10°C , что ограничивает районы круглогодичного использования данных приборов.

Ограниченный период эффективной работы в дневное время. Плоские коллекторы – стационарные объекты строго ориентированные в пространстве. Поскольку Солнце перемещается по 15 градусов каждый час, то эффективная работа плоского солнечного коллектора длится не более 5 часов в сутки, в то время, как продолжительность светового дня в летний период, к примеру в Москве, составляет до $17,5$ часов.

Сложность транспортировки и монтажа. Плоские солнечные коллекторы, в собранном виде – это габаритная тяжелая конструкция, которую трудно транспортировать личным транспортом и монтировать на крышах домов. Работы должны выполняться с применением грузоподъемной техники несколькими людьми. В пассажирские лифты и лестничные марши частных домов данные устройства, как правило, не помещаются.

Сложность ремонта. При повреждении стеклянного защитного покрытия, или выходе из строя элементов плоских солнечных коллекторов, требуется полная замена всего коллектора. Ремонт должен быть выполнен в мастерской. Фактически, данная проблема приводит к полной остановке работы системы до замены поврежденного коллектора.

Высокая парусность. Плоские коллекторы имеют высокую парусность. Они могут быть установлены непосредственно на склоны крыш домов, но такая установка, как правило, приводит

к значительному падению эффективности работы устройства, поскольку реальные дома имеют склоны крыш с разной ориентацией на солнце и разные уклоны. Для большей эффективности, коллекторы устанавливаются на раму, которая крепится на крыше. Но из-за больших габаритов, парусности и веса, данные конструкции должны быть прочными.

КПД закрытых плоских солнечных коллекторов

В данном разделе мы рассматриваем значения максимального мгновенного КПД солнечных коллекторов (при фиксированном положении Солнца).

Оптический КПД солнечного коллектора определяет, какой процент излучения, попадает через прозрачное покрытие на коллектор и поглощается абсорбером. Данный показатель полностью характеризует применяемые материалы защитного прозрачного, материала и покрытия абсорбера, не зависит климатических факторов и конструктивных и тепловых параметров гелиосистемы. Наилучшие показатели оптического КПД современных солнечных коллекторов составляют 0,92–0,94.

Мгновенный КПД можно определить по формуле:

$$\text{КПД} = \text{КПД}_{\text{опт}} - K \cdot (T_1 - T_2) / I_s, \quad (2)$$

где КПД – КПД плоского солнечного коллектора, %;

КПД_{опт} – оптический коэффициент пропускной способности стекла, %;

K – эффективный коэффициент теплопотерь солнечного коллектора, Вт/(м²·°C);

T_1 – температура теплоносителя, град. К;

T_2 – температура окружающей среды, град. К;

I_s – интенсивность солнечного излучения, Вт/м².

Параметры, влияющие на КПД солнечного коллектора:

- интенсивность солнечной энергии;
- температура наружного воздуха;
- конструктивные характеристики солнечного коллектора;
- свойства поверхности абсорбера – материал и толщина листа, толщина, коэффициент теплопроводности тепловой изоляции, шаг труб;
- рабочие параметры всей гелиосистемы (расход теплоносителя и его температура на входе).

При сравнении различных материалов, используемых для изготовления абсорбера, – меди, алюминия, стали, пластмассы – установлено, что с увеличением произведения толщины листа на его коэффициент теплопроводности, значение КПД коллектора возрастает. При одинаковой толщине абсорбер из металлов и пластика, КПД конструкции из пластика в два раза меньше [2].

Расстояние между трубками в плоском абсорбере обычно меняется от 50 до 150 миллиметров, при этом, его КПД меняется от 0,989 до 0,948 если он выполнен из меди, от 0,88 до 0,934, для алюминия и 0,984 до 0,819 для стали [2].

Уменьшение диаметра трубок снижает эффективность на 2–4 %.

Очень большую роль в эффективности работы плоских солнечных коллекторов играют атмосферные факторы, так при уменьшении температуры окружающего воздуха с 25 до 10 °С, КПД падает примерно на 25 %. При появлении облачности – в два раза, допустим интенсивность солнечного излучения упала с 1000 до 500 Вт/м², тогда коллектор площадью один квадратный метр произведет примерно в 4 раза меньше тепловой энергии, чем в первом случае.

Чем ниже температура входящего теплоносителя, тем выше КПД.

Увеличение расхода теплоносителя влечет увеличение КПД до определенной величины и потом остается неизменным.

Важным фактором также является качество селективной поверхности абсорбера. У лучших, показатель их эффективности составляет 0,96, в то время, как простая черная краска имеет данный показатель на уровне 0,5.

На рис. 14 показаны зависимости мгновенного КПД закрытого плоского солнечного коллектора с высокоселективной поверхностью абсорбера от интенсивности солнечного потока (1000, 800, 500, 300 Вт/м², разности температур теплоносителя и окружающего воздуха, при наилучших показателях оптического КПД (0,82) и углу падения солнечных лучей перпендикулярно поверхности при коэффициенте потерь, равным 7 Вт/м²·°С.

КПД

$$\Delta T = T_{\text{вх}} - T_{\text{вых}}$$

Рис. 14. Зависимости КПД плоского высокоселективного солнечного коллектора от разности температуры на входе и выходе из коллектора при разных значениях интенсивности солнечного излучения

Из рисунка видно, что при максимальной интенсивности солнечного излучения, равной 1000 Вт/м^2 , мгновенный максимальный КПД солнечного коллектора меняется от 82 до 58 %, при перепаде температур 60°C . Но, все таки, перепад температур в 60°C система создать может. Но при интенсивности солнечного излучения в пасмурную погоду, плоский солнечный коллектор способен нагреть теплоноситель на температуру не более 25°C .

2.3. Закрытые трубчатые и объемные солнечные коллекторы

Простейшим открытым объемным солнечным коллектором является бочка, установленная на крыше (см. рис. 4). Данная конструкция, как и другие открытые трубчатые коллекторы (см. рис. 5) обладают рядом недостатков. Главным преимуществом открытых солнечных является их дешевизна. Последнее время, ряд компаний стали выпускать новые конструкции солнечных коллекторов. Если закрыть коллектор прозрачным колпаком, то мы уменьшим теплопотери при понижении температуры воздуха, защитим от ветра, утеплим нижнюю теневую часть конструкции. Все это увеличит эффективность работы таких систем. Данный тип солнечных коллекторов, по прежнему, относится к сезонным дачным установкам подогрева вода и цена таких конструкций невысокая. Делаются такие коллекторы из пластика методом вакуумного формования, который применяется для массового производства. Срок службы таких коллекторов до пяти лет. На рис. 15 показаны конструкции таких коллекторов. Закрытые объемные солнечные коллекторы предназначены для эксплуатации в теплый период времени года, когда продолжительность светового дня более 12 часов. Для увеличения времени освещенности солнечными лучами поверхности коллектора их производят в виде сфер, полуцилиндров, пирамид.

Рис. 15. Закрытые трубчатые и объемные солнечные коллекторы

Солнечные коллекторы данного типа размещают на крышах летних домиков и на площадках. Из за использования пластмасс в качестве конструктивных материалов прозрачного защитного слоя и корпуса коллектора, данная конструкция дешева и применяется, в основном, для подготовки горячей воды на приусадебном хозяйстве, подогрева воды в детских бассейнах и летних душевых. Такие солнечные коллекторы обладают невысоким КПД, но они более защищены от влияния атмосферных факторов, чем коллекторы открытого типа и лишены ряда их недостатков.

2.4. Вакуумные трубчатые коллекторы

2.4.1. Вакуумные трубки и их характеристики

В трубчатых вакуумных солнечных коллекторах применяются два типа трубок:

- двухстенные коаксиальные;
- одностенные.

Коаксиальная вакуумная трубка солнечного коллектора – сосуд Дьюара, выполненный в виде тонкостенных стеклянных коаксиальных трубок, запаянных с торца. Из пространства между стенками труб выкачан воздух.

Конструкция вакуумной трубки солнечного коллектора представлена на рис. 16. Свободный конец внутренней трубки поддерживается держателем, выполненным из нержавеющей стали.

Рис. 16. Конструкция тонкостенной коаксиальной вакуумной трубки солнечного коллектора

Требования к вакуумным трубкам солнечных коллекторов:

- стекло должно иметь высокую прочность;
- высокую светопропускную способность;
- устойчивость к старению при высоких температурах;

- сохранять в течение длительного времени высокий уровень вакуума;

- иметь индикаторы уровня вакуума.

Трубки вакуумных коллекторов выполнены из чрезвычайно крепкого боросиликатного стекла, которое выдерживает удары града, падающего со скоростью 18 м/с диаметром до 35 мм. Боросиликатное стекло пропускает волны солнечной радиации в диапазоне 0,4–2,7 нм, – весь спектр теплового излучения. Толщина стенок у разных производителей разная и составляет около 1,7 мм для внешней трубы и 1,5 мм для внутренней. Массово выпускаются несколько типоразмеров труб, наиболее популярны вакуумные трубы длиной от 1,5 до 2,0 м с внешним диаметром 57 и 75 мм, но есть и трубы с внешним диаметром 150 мм. Зазор между трубами составляет около 3,5 мм.

Для визуальной индикации наличия вакуума в межтрубном пространстве, на нижнюю часть внутренней трубы наносят соли бария. Они активно поглощаются присутствующие в воздухе газы и, в случае снижения или потери вакуума, меняют цвет. Белый матовый цвет конца внутренней трубы – свидетельство нарушения вакуума в межтрубном пространстве. На рис. 17 показаны окончания вакуумных труб солнечного коллектора в варианте требуемого уровня вакуума и его отсутствия.

Внутренняя колба вакуумной трубы выполнена из боросиликатного стекла и покрытая специальным многослойным селективным абсорбционным покрытием, которое концентрирует всю энергию солнечного излучения внутри центрального канала. Температура в центре трубок может достигать 380 °С, причем внешняя поверхность вакуумной трубы остается холодной.

Рис. 17. Индикация уровня вакуума в трубках солнечного коллектора

Абсорбционное покрытие делается многослойным.

Первый слой – это теплопередающий слой напыления меди, $M-AL-N/Cu$, который имеет низкий коэффициент эмиссии и высокую теплопередачу через внутреннюю стеклянную стенку к теплоносителю.

Второй слой (антиэмиссионный), это пленка нитрида алюминия $Al-N-Al$ служит для предотвращения перекрестной миграции энергии. Этот слой позволяет меди первого слоя нагреваться до температур свыше $400^{\circ}C$ за счет предотвращения потерь тепла.

Третий слой металлокерамический (высокоселективный абсорбирующий) – напыление нитрида алюминия $AL-N/M-AL-N$ распыленных одновременно в газовой смеси аргона и азота для получения покрытия, которое поглощает солнечное излучение с очень низкой теплоотдачей.

Эффективность абсорбционного покрытия не менее 95%; эмиссия не более 5%.

Стандартный уровень вакуума в межтрубном пространстве коаксиальных труб составляет $5 \cdot 10^{-3}$ Па.

В солнечных коллекторах применяются также вакуумные коаксиальные трубки без нанесенного на внутреннюю трубу селективно-абсорбционного покрытия или с нанесением отражающего покрытия на часть поверхности трубы, при этом половина трубы по всей длине остается прозрачной.

Вторым типом вакуумных труб, которые применяются в солнечных коллекторах, являются **одностенные вакуумные трубки**. Иногда их называют «перьевыми». Данные трубки представляют собой одностенную длинную стеклянную колбу, заглушенную с одного торца. Колба выполнена из более толстого закаленного стекла толщиной до 3 миллиметров. Внутри колбы вакуум уровня $5 \cdot 10^{-3}$ Па. Как правило, данные колбы имеют внешний диаметр несколько больший, чем коаксиальные вакуумные трубки.

2.4.2. Тепловые каналы вакуумных солнечных коллекторов

В центральном канале вакуумных трубок помещается тепловой узел.

В солнечных трубчатых коллекторах применяются несколько типов тепловых узлов (другие названия: тепловые каналы, тепловые трубки):

- U образные трубки прямого нагрева;
- коаксиальные трубки прямого нагрева;
- тепловая трубка «Heat pipe». (термотрубка испарение-конденсация).

Тепловой узел состоит из абсорбера и трубок по которым течет теплоноситель, в вариантах прямого нагрева и специальной тепловой трубе с легкоиспаряемой жидкостью, в варианте «Heat pipe».

Перьевые и цилиндрические абсорберы вакуумных трубок (сечения) представлены на рис. 18. Форма абсорберов и их крепление к трубкам с теплоносителем может быть любая.

Рис. 18. Перьевые и цилиндрические абсорберы тепловых трубок

На рис. 19 представлен вариант U-образной медной трубки прямого нагрева с цилиндрическим алюминиевым абсорбером.

Теплоноситель поступает в трубку прямого нагрева по каналу с холодной водой. Абсорбер, нагретый солнечными лучами в центральном канале коаксиальной стеклянной вакуумной трубы, передает тепло теплоносителю. Движение теплоносителя принудительное с помощью циркуляционного насоса.

Рис. 19. U образная трубка прямого нагрева с цилиндрическим абсорбером

На рис. 20 показана конструкция прямооточной коаксиальной трубки прямого нагрева с цилиндрическим и перьевым абсорберами. По внутреннему каналу трубки поступает холодная вода. Обратно, нагреваемая абсорбером вода, возвращается в распределительный узел.

Рис. 20. Прямоточная коаксиальная трубка в вариантах с цилиндрическим и перьевым абсорберами:

- 1 – стеклянная колба; 2 – вакуумная прослойка;
- 3 – медный абсорбер с высокоселективным покрытием;
- 4 – внутренний тепловой канал с теплоносителем (подающий);
- 5 – наружный тепловой канал с теплоносителем

Вариант «термотрубка «Heat pipe» работает по другому принципу. На рис. 21 показана конструкция с цилиндрическим абсорбером. Но применяются и термотрубки «Heat pipe» с перьевым абсорбером. На рис. 22 показана схема работы данного варианта тепловой трубки.

Рис. 21. Тепловая трубка «Heat pipe» с цилиндрическим абсорбером

Рис. 22. Схема работы тепловой трубки «Heat pipe»

Принцип работы состоит в следующем.

Внутри запаянной с концов трубки находится легко-испаряемая жидкость. В качестве такой жидкости может применяться дистиллированная вода. Если в трубке сделать давление ниже атмосферного, то температура кипения воды снижается и вода вполне может использоваться в качестве такой жидкости. Кроме того, вода, экологически абсолютно безопасная жидкость. Также, в качестве легкоиспаряемых жидкостей в тепловых трубках, используют ацетон и другие хладагенты.

Солнечная энергия нагревает абсорбер и тепловую трубку. При температуре около 30 °С происходит испарение жидкости (поглощение теплоты испарения). Тепловые трубки расположены вертикально, под углом не менее 20–30 градусов. При этом, пары жидкости поднимаются в верх трубки на конце которой расположен теплосборник (цилиндр увеличенного диаметра 14–24 мм), соединенный с поглотителем (полый медный цилиндр), расположенный в канале (манифолд) с теплоносителем системы отопления и ГВС. Теплосборник охлаждается поглотителем. В теплосборнике происходит конденсация пара легкоиспаряемой жидкости, сопровождающаяся выделением тепла, которое передается через поглатитель теплоносителю. Конденсированная жидкость под действием силы тяжести стекает обратно в нижнюю часть тепловой трубы. Процесс циркуляции пассивный, повторяющийся.

Манифолд – это устройство в виде металлического блока, который выступает в качестве теплосборника. К нему подсоединены вакуумные трубки, которые передают тепловую энергию через конденсатор, располагающийся в самом верху трубки. Манифольд и тепловые трубки закреплены на общей металлической раме.

Термосифонные трубки солнечных коллекторов

Коаксиальные вакуумные трубки с селективно-абсорбционным покрытием внутренней трубки могут также использоваться в солнечных коллекторах, использующих в своей работе термосифонный эффект. Более подробно данные системы будут описаны во второй части учебного пособия, поскольку, данный эффект не может существовать в отдельной трубке коллектора. Для его работы нужна система, состоящая из коллектора, интегрированного в накопительный бак. Холодная вода имеет более высокую плотность и находится в нижней части накопительного бака. К нижней части накопительного бака, под углом, присоединены вакуумные коаксиальные трубы, заполненные водой и составляющие с баком единый гидравлический объем. Поскольку, теплая вода имеет более низкую плотность, чем холодная, то, нагреваясь под воздействием солнечных лучей в коаксиальной трубке, теплая вода поднимается в бак, вытесняя холодную воду в трубку коллектора. Данный эффект циркуляции объемов воды с разной плотности называется термосифонным (естественной конвекции). В термосифонных системах бак должен быть расположен выше коллектора. Преимуществом данной схемы работы является то, что вода нагревается непосредственно в вакуумных трубках без промежуточных элементов, что повышает КПД системы. Главный недостаток - данная система безнапорная. Ее невозможно подключить к централизованной системе ГВС и отопления без дополнительных элементов (коллекторов съема тепла накопительного бака).

2.4.3. Преимущества и недостатки, показатели эффективности вакуумных трубчатых солнечных коллекторов

Кпд трубчатых элементов солнечных коллекторов

Как и в предыдущем разделе по эффективности плоских коллекторов, мы рассматриваем значения мгновенного КПД. Вопрос

сравнения полной эффективности применения солнечных коллекторов в течении суток и различных времен года, будет рассмотрен в следующей главе.

Методологически, расчет мгновенного КПД трубчатого вакуумного коллектора совпадает с расчетов КПД плоского. Также есть понятие оптического КПД, селективных покрытий, эффективности абсорбера, теплопередачи энергии теплоносителю. Наилучшие образцы вакуумных трубчатых коллекторов имеют оптический КПД, равный 0,80–0,85.

Но есть два серьезных отличия между плоскими и трубчатыми коллекторами в расчете КПД.

Первое, касается конструктивных особенностей монтажа коллекторов. Плоские коллекторы воспринимают только прямое солнечное излучение, поскольку имеют прозрачное покрытие только со стороны, направленной на Солнце. Вакуумные трубчатые коллекторы, могут быть расположены на склоне крыши и, в случае монтажа непосредственно на крышу, также воспринимают, в основном, прямое солнечное излучение. Но, если такие же коллекторы установлены на раме, а крыша плоская, то свет может попадать и на обратную сторону коллектора и вакуумные трубки воспринимают рассеянное и отраженное от других объектов солнечное излучение. В варианте коллектора с вакуумными трубками могут быть конструкции с отражателями – концентраторами, установленными в зазорах между труб и за ними. Доля рассеянного излучения в ясную погоду может составлять около 20 % от прямого излучения. А в облачную, прямого излучения вообще нет. Следовательно, если в расчете КПД вакуумного трубчатого коллектора брать его апертурную площадь, то можно столкнуться с ситуацией, когда КПД окажется более единицы. Это не нарушение законов сохранения энергии, это факт, обусловленный способностью вакуумных трубчатых коллекторов воспринимать

энергию с большего пространства, чем апертурная площадь. Но если мы в расчет возьмем не апертурную площадь вакуумной трубки, а и зазора между ними, то все становится на свои места и значение КПД становится меньше единицы. Поэтому, в случаях, если указываются значения КПД больше единицы, понимайте, что при расчетах рассматривалась не полная площадь коллектора, а апертурная площадь. В сравнении эффективности разных типов коллекторов необходимо учитывать их общую габаритную площадь, тогда оно будет правильным.

Вторым отличительным моментом является то, что есть тепловые трубки вакуумных коллекторов с прямоточным течением теплоносителя и есть тепловые трубки с фазовым переходом жидкость-газ и обратно («Heat pipe»). В первом случае, нагрев теплоносителя происходит, как и в случае плоских коллекторов – прямым нагревом. Во втором случае, возникает многократная теплопередача энергии от одних узлов к другим, вызывающий потерю около 10 % энергии. Общий разброс мгновенного КПД трубчатых коллекторов может находиться в диапазоне 0,65–0,8 и очень сильно зависит от конструкции и типу тепловой трубы, абсорберов и других параметров.

С учетом вышесказанного, необходимо отметить, что значение мгновенного КПД солнечных коллекторов трудно точно определить расчетным путем и должно определяться экспериментальным образом на заводе – изготовителе и обозначаться в паспортных данных.

Преимущества вакуумных солнечных коллекторов

Вакуум – прекрасный изолятор. Вся, преобразованная из солнечных лучей, тепловая энергия сконцентрирована в центральном канале вакуумной трубки. Теплотери в окружающую среду практически отсутствуют. Свидетельством этого является то, что,

если вы прикоснетесь в яркий солнечный день к поверхности вакуумной трубки, то почувствуете- она холодная. И наоборот, если вокруг холодно, то вакуум является барьером для охлаждения трубок центрального канала.

Вывод – вакуумные трубки и весь солнечный коллектор на их основе можно эксплуатировать круглогодично.

Вакуумные трубки способны преобразовывать световую энергию рассеянного, отраженного освещения (пасмурная погода).

Обеспечивают практически полное поглощение тепловой энергии всего спектра (видимой и инфракрасной части).

Высокая надежность систем. Срок службы более 15 лет.

Низкая парусность.

Возможность выполнения сервисных и ремонтных работ без демонтажа всего коллектора.

Температура внутри центрального теплового канала может достигать 400 °С.

Высокая продолжительность работы в течение суток.

Ряд конструкций способны работать под любым углом падения солнечных лучей.

Если рассматривать равные апертурные площади плоского и трубчатого вакуумного солнечных коллекторов, то, в некоторые конструкции вакуумных трубок с цилиндрическим абсорбером с высокоселективным покрытием, имеют производительность значительно выше плоских. Это объясняется тем, что такие типы абсорберов вакуумных трубок способны воспринимать полное излучение, даже с задней стороны вакуумной трубки.

Трубчатая форма меньше загрязняется пылью, органическим мусором. Обдувается ветром.

При вертикальном расположении на них меньше задерживается снег.

Недостатки вакуумных трубчатых коллекторов

Главным недостатком вакуумных солнечных коллекторов является то, что их апертурная площадь сильно отличается от общих габаритов коллектора. Трубки раздвинуты между собой на расстояние до 1,5 диаметра. То есть при диаметре трубок 57 мм расстояние между ними около 85 мм. Это делается для того, чтобы трубки не затеняли друг друга при угловом падении прямых солнечных лучей. Схема падения солнечных лучей показана на рис. 23. Из рисунка видно, что при падении лучей под прямым углом, имеется значительная доля энергии, проходящая мимо трубок коллектора. Эта величина определяется исключительно расстоянием между трубками. В то же время, расстояние между трубками позволяет увеличить угол, при котором не происходит затенение соседних трубок. При увеличении расстояния такой угол увеличивается.

Рис. 23. Разные углы падения прямых солнечных лучей на трубки солнечного коллектора

В любом случае, апертурная площадь трубчатых коллекторов меньше чем у плоских. Правда, этот недостаток компенсируется тем, что трубчатые коллекторы способны вырабатывать тепловую энергию в большем угловом диапазоне. По данным [3] суммарная суточная тепловая энергия, при одинаковых условиях,

вакуумным трубчатым коллектором с цилиндрическими абсорберами больше плоского солнечного коллектора на 14 %.

До последнего времени считалось, что трубчатые солнечные коллекторы дороже плоских. Но массовое производство трубчатых коллекторов снизило их себестоимость и, в настоящее время, себестоимость коллекторов одинаковая.

Недостатком трубчатых коллекторов также считается то, что на них налипают снег и иней, а плоские коллекторы обладают возможностью к самоочистке. Однако, это не совсем так. Плоские коллекторы обладают режимом таяния, если в них противотоком направить подогретый теплоноситель. Но, во-первых, для этого нужно потратить энергию, во-вторых, плоские солнечные коллекторы вообще не следует использовать зимой, следовательно и сравнивать их по этому критерию не надо. В третьих, на трубчатых коллекторах снег задерживается хуже, чем на плоских. Конечно, стоит вопрос об эффективности использования солнечных коллекторов в районах с продолжительной зимой и высоким снежным покровом, но это касается всех их типов, а трубчатые солнечные коллекторы, единственные из рассматриваемых, способные работать при рассеянном и отраженном свете.

Также, отдельно стоит вопрос о ремонтопригодности трубчатых солнечных коллекторов. Существует ли возможность замены одной вышедшей из строя вакуумной трубки не сливая воду со всего коллектора? В некоторых конструкциях такая возможность есть. А в других нет. Конструкций трубчатых коллекторов множество. Не возможно однозначно ответить на этот вопрос не зная конструкции. Но, даже в варианте необходимости слива теплоносителя из системы, можно сказать, что демонтаж можно проводить на объекте.

В заключение главы, приводим данные по долям, используемых в мире, различных типов солнечных тепловых коллекторов [4]. Представлены на рис. 24 в виде диаграммы.

Рис. 24. Доли различных солнечных тепловых коллекторов, используемых в мире[4]

Литература по разделу

1. ГОСТ Р 54856-2011: Теплоснабжение зданий. Методика расчета энергопотребности и эффективности системы теплогенерации с солнечными установками.
2. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М., Энергоатомиздат, 1991, 208 с.
3. 2017 Institute for Solar Technology Oberseestrasse 10 CH-8640 Rapperswil Tel. +41 55 222 48 21 info@spf.ch Impressum GTC.
4. Бутузов В.А. Обзор мирового рынка солнечных систем теплоснабжения // Журнал С.О.К., № 12/2013.

Глава 3. ОРИЕНТАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ В ПРОСТРАНСТВЕ, СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ

3.1. Ориентация и угол наклона плоских солнечных коллекторов

Источником энергии работы солнечных тепловых коллекторов является Солнце. Если рассматривать плоские стационарные СК любого типа, то они жестко закреплены либо на склонах крыш, либо на плоской крыше, либо на поверхности земли. Солнце светит на поверхность земли под углом, зависящим от времени суток и времени года. Диапазоны изменения этих углов очень значительные и зависят от широты и долготы места размещения объекта. Для Москвы, минимальная продолжительность светового дня 7 часов, а максимальная – 17 часов 30 минут. С учетом того, что за час Солнце перемещается по горизонту на 15 градусов, суммарное угловое перемещение летом может достигать 265 градусов, в то время, как зимой, 105 градусов. По склонению над горизонтом, Солнце также изменяет свое положение в большом диапазоне от 11 до 57 градусов. В других точках расположения объектов, углы изменения направления солнечного света, другие.

Во второй главе мы рассматривали значения максимального КПД солнечного коллектора, при этом, предполагалось, что лучи Солнца падают на поверхность коллектора перпендикулярно. В реальности, соблюсти это требование невозможно. Даже, если вы выставили направление коллектора строго на юг для точки размещения объекта в момент летнего солнцестояния, то, через несколько дней, максимальные значения будут недостижимы, поскольку угол падения лучей по горизонту изменится за этот период на несколько градусов.

Под оптимальной ориентацией стационарно размещенного солнечного коллектора понимают положение, максимально близкое к положению Солнца в момент астрономического времени 12 часов. Напоминаем, что в каждом месте существует разница директивного и астрономического времени и для Москвы, к примеру, эта разница составляет около 34 минут.

Если вы используете солнечные коллекторы только в летнее время, то рекомендуется устанавливать угол наклона коллекторов градусов на 5 меньше значения угла широты места расположения объекта. Москва расположена на 56 градусе северной широты. Следовательно, оптимальное расположение угла наклона коллектора будет около 50 градусов. Но если вы используете коллекторы круглый год, то угол наклона коллектора к горизонту рекомендуется выбрать на 15 градусов меньше широты. В нашем случае, это примерно 40 градусов. На ориентированном склоне крыши выполнить такие требования очень сложно, поэтому, можно сказать, что уровень максимально возможного мгновенного КПД для стационарного солнечного коллектора практически никогда не достигим.

Если реальная ориентация солнечного коллектора на объекте отличается менее 15 градусов по горизонту от нулевой ориентации на астрономический юг, то потери не столь велики, но если технически невозможно реализовать данные требования, то, эффективность гелиосистем падает и инвестиции в них никогда не окупятся.

Угловая эффективная зона работы плоских и вакуумных трубчатых коллекторов составляет около 45 градусов в каждую сторону от перпендикуляра к поверхности, то есть в сумме около 90 градусов.

Характер изменения эффективности работы коллектора от угла падения солнечных лучей зависит от конкретной конструкции

солнечного коллектора и определяется экспериментально. В идеальном варианте, в диапазоне изменения падения лучей $-45 - 0 + 45$ градусов, при абсолютном перпендикуляре падения солнечных лучей в максимальной точке, мощность солнечного коллектора изменяется на 25 %, но в реальности это изменение значительно больше и составляет около 50 %, причем у плоских коллекторов этот показатель еще ниже, поскольку абсорбер, в крайних положениях солнца затеняется боковыми стенками коллектора.

Некоторые производители указывают в характеристиках оборудования угловые коэффициенты.

IAM (Incident Angle Modifier) – угловой коэффициент. Поправочный коэффициент, который помогает учесть конструктивные особенности конкретного коллектора, чтобы откорректировать количество солнечного излучения поступающего при различных углах падения относительно основной плоскости солнечного коллектора (учитывается все отражение, преломление и затенение солнечных лучей).

У открытых солнечных коллекторов данный коэффициент равен 1. Максимальный мгновенный КПД 0,5–0,9.

У закрытых плоских – $IAM = 0,85-0,95$ в зависимости от толщины воздушного слоя и высоты боковой стенки коллектора над плоскостью абсорбера. Максимальный мгновенный КПД 0,74–0,88.

У вакуумных одностенных перьевых трубчатых коллекторов $IAM = 0,9-1,1$, максимальный мгновенный КПД 0,65–0,80.

У вакуумных коаксиальных – $IAM = 1,1-1,6$, максимальный КПД прямого солнечного излучения 0,45–0,75. но вакуумные коаксиальные трубки с цилиндрическим абсорбером могут воспринимать не только прямое, но и рассеянное солнечное излучение. действие которого можно учесть поправочным коэффициентом интенсивности, равным для солнечной погоды 1,15.

В виде графиков корректировка значения мощности солнечного излучения представлена на рис. 25.

Рис. 25. Графики зависимости мощности солнечного излучения от угла падения лучей для разных типов солнечных коллекторов

Из графика видно, что площадь фигуры под графиком мощности трубчатого вакуумного коллектора больше аналогичной фигуры плоского коллектора примерно на 15 %, Поскольку движение Солнца равномерное, можно сказать, что энергия, выработанная коллектором на вакуумных трубках больше плоского коллектора на 15 % при равных габаритах и ориентации на Солнце.

Солнце движется по небосводу по двум координатам. Вводятся два угловых коэффициента Поперечный (IAMT – transversal) и Продольный (IAML – longitudinal). Обычно у плоских гелиоколлекторов оба эти коэффициента одинаковые, поэтому указывается только одно значение. У трубчатых вакуумных гелиоколлекторов может существенно отличается Поперечный коэффициент, а Продольный, примерно такой же, как и плоских коллекторов.

Данные угловых коэффициентов некоторых типов тепловых солнечных коллекторов получены в *Институте солнечных технологий Solartechnik SPF* (Рапперсвилль, *Швейцария*) и представлены на рис. 26.

Рис. 26. Графики изменения угловых коэффициентов некоторых типов солнечных тепловых коллекторов (*Институт солнечных технологий Solartechnik SPF* (Рапперсвилль, *Швейцария*) www.spf.ch (начало)

Рис. 26. Графики изменения угловых коэффициентов некоторых типов солнечных тепловых коллекторов (*Институт солнечных технологий Solartechnik SPF* (Рапперсвиль, *Швейцария*) www.spf.ch (окончание)

Среднегодовая выработка тепловой энергии

Солнце в течении дня движется по сложной траектории, которая зависит от времени года, места расположения объекта. Конструкции солнечных коллекторов очень разнообразны, возможно разнообразное расположение коллектора на объекте. Все это очень сильно затрудняет расчет среднегодовой выработки тепловой энергии. Экспериментальные данные по производительности СК очень сильно зависят от погодных условий. Для оценки годовой выработки тепла солнечным коллектором применяются

методы математического моделирования. Статистические экспериментальные данные по среднегодовой выработки требуют очень длительного периода времени.

Одной из доступных и наглядных программ является немецкая разработка GeoT*SOL basic 2.0. однако не понятны исходные формулы для математического моделирования, примененные в этой программе и на сколько они соответствуют реальным конструкциям солнечных коллекторов.

В любом случае это сложнейшая задача математического моделирования. В данном учебном пособии можно говорить только о качественном анализе среднегодовой выработки тепловой энергии солнечными коллекторами разных типов.

3.2. Сравнительный анализ применения солнечных коллекторов различных типов

Поскольку конструкции, место расположение, ориентация, особенности монтажа коллекторов очень разнообразные, то для анализа эффективности рассмотрим качественные характеристики мгновенного КПД различных типов тепловых солнечных коллекторов. На рис. 27 представлены усредненные значения КПД, оптических КПД, коэффициентов теплопотерь для основных типов СК.

Упрощенный расчет КПД коллекторов можно произвести по формуле:

$$\text{КПД} = \text{КПД}_{\text{опт}} - \text{К}_{\text{тп}} \cdot \text{У}. \quad (3)$$

Средние значения оптического $\text{КПД}_{\text{опт}}$ для позиций на рис. 27, составляют 1 – 0,95; 2 – 0,85; 3 – 0,75; 4 – 0,8; 5 – 0,75.

Средние значения коэффициента теплопотерь $\text{К}_{\text{тп}}$, соответственно, 1 – 15; 2 – 7; 3 – 5; 4 – 3,5; 5 – 2 измеряется – Вт/(м²·°C).

У – соотношение разности температур теплоносителя на входе и выходе из коллектора T , деленное на интенсивность солнечного излучения, измеряется в м²·°C/Вт.

Рис. 27. Мгновенный КПД солнечных коллекторов в зависимости от интенсивности солнечной радиации и разности температур на входе и выходе коллектора [1]:

- 1 – абсорбер; 2 – коллектор с однослойным остеклением;
- 3 – коллектор с двухслойным остеклением;
- 4 – плоский коллектор с высокоселективным покрытием абсорбера;
- 5 – трубчатый вакуумный коллектор

Оптический КПД характеризует конструктивную способность СК воспринимать солнечную энергию и зависит только от способности прозрачного защитного слоя пропускать энергию, наличию прослойки воздуха между защитным прозрачным слоем и абсорбером и КПД абсорбера.

Интенсивность солнечного излучения сильно зависит от атмосферных факторов. Напоминаем: 1000 Вт/м^2 – ясная солнечная погода летом. $800\text{--}600 \text{ Вт/м}^2$ – небольшая облачность, летом, 300 Вт/м^2 – пасмурно летом, зимой эти показатели ниже примерно в 2 раза.

Также напоминаем, что на рис. 27 указаны значения МГНОВЕННОГО МАКСИМАЛЬНОГО КПД. Реальные средние значения примерно в два раза ниже.

Из рис. 27 видно:

Открытые солнечные коллекторы – эффективное использование возможно только в солнечную погоду при подогреве воды на $5\text{--}10^\circ\text{C}$, при температуре окружающего воздуха выше 20°C .

Плоские закрытые солнечные с остеклением в 1 слой – применение целесообразно для подготовки горячей воды для нужд приусадебных и дачных участков в летний период при температуре окружающего воздуха не ниже $12\text{--}15^\circ\text{C}$, способны прогреть воду на $15\text{--}25^\circ\text{C}$.

Плоские закрытые солнечные с остеклением в 2 слоя – применяются, как и в предыдущем случае, но способны прогреть воду до **35 градусов**.

Современные плоские солнечные коллекторы с высокоселективным покрытием абсорбера и хорошей термоизоляции корпуса – могут эффективно использоваться при температуре окружающего воздуха от $5\text{--}10^\circ\text{C}$ и способны создавать перепад температур в коллекторе до 40°C .

Трубчатые вакуумные солнечные коллекторы

Могут эффективно использоваться при температурах окружающего воздуха ниже нуля градусов Цельсия (всесезонные) при обеспечении перепада температур в коллекторе выше 80°C .

Относительно возможности использования солнечных коллекторов в системах бытового нагрева воды на дачных участках, систем ГВС, систем отопления и технологических системах, можно представить следующие диапазоны изменения параметра Y .

Зона А при $Y < 0,03 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$ – обогрев воды на дачных участках, летом,

Зона Б при $Y = 0,03\text{--}0,08 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$ – для систем ГВС в летний период.

Зона В при $Y > 0,08 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{С/Вт}$ – системы отопления и ГВС капитальных сооружений.

При значениях $Y > 0,12$, возможно использование систем солнечных коллекторов в многоквартирных домах и технологических промышленных процессах.

Литература по разделу.

1. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М., Энергоатомиздат, 1991, 208 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Суммарное количество всей потребляемой энергии человечеством составляет всего около 0,0125% доли процента от энергии возобновляемых источников, имеющихсся на планете Земля, главная из которых энергия Солнца.

Теплоэнергетика, наряду с другими отраслями, вносит большой вклад в накопление парниковых газов, поскольку именно при сжигании ископаемого топлива в котлах коммунального хозяйства и индивидуальных домов, происходит выброс диоксида углерода. Применение, при решении вопросов теплоснабжения, энергосберегающих высокоэффективных технологий и экологически чистых возобновляемых источников энергии, позволит сохранить планету.

По данным института АЕЕ INTEC, на конец 2012 г. в мире установлено 383 млн квадратных метров солнечных тепловых установок общей тепловой мощностью 268,1 ЕВт с годовой выработкой тепловой энергии 225 ТВт·ч. С каждым годом эти показатели только возрастают. К сожалению, в России общая площадь солнечных тепловых установок оценивается в 30 тыс. м².

Более 60% территории России, в том числе и многие северные районы, характеризуются среднегодовым поступлением солнечной радиации от 3,5 до 4,5 кВт·ч/м² в день, а регионы Приморья и юга Сибири от 4,5 до 5,0 кВт·ч/м² в день, что не сильно отличается от аналогичных показателей центральной Европы (5,0–5,5 кВт·ч/м² в день).

Солнечные тепловые коллекторы успешно применяются для подготовки горячей воды на дачном участке, в системах отопления и горячего водоснабжения индивидуальных и коллективных домов, промышленных системах теплоснабжения.

В настоящее время наибольшее распространение получили:

- солнечные тепловые коллекторы открытого типа;
- плоские закрытые солнечные трубчатые тепловые коллекторы;
- закрытые трубчатые и объемные солнечные коллекторы;
- вакуумные трубчатые солнечные коллекторы.

Доля последних составляет более 62 % от всего объема выпускаемых в мире солнечных коллекторов.

С точки зрения эффективности использования различных типов солнечных коллекторов и их применения в хозяйстве, можно рекомендовать.

Открытые солнечные коллекторы – эффективное использование возможно только в солнечную погоду при подогреве воды на 5–10 °С, при температуре окружающего воздуха выше 20 °С.

Плоские закрытые солнечные с остеклением в 1 слой – применение целесообразно для подготовки горячей воды для нужд приусадебных и дачных участков в летний период при температуре окружающего воздуха не ниже 12–15 °С, способны прогреть воду на 15–25 °С.

Плоские закрытые солнечные с остеклением в 2 слоя – применяют, как и в предыдущем случае, но способны прогреть воду до 35 градусов.

Современные плоские солнечные коллекторы с высокоселективным покрытием абсорбера и хорошей термоизоляции корпуса – могут эффективно использоваться при температуре окружающего воздуха от 5–10 °С и способны создавать перепад температур в коллекторе до 40 °С.

Трубчатые вакуумные солнечные коллекторы

Могут эффективно использоваться при температурах окружающего воздуха ниже нуля градусов Цельсия (всесезонные) при обеспечении перепада температур в коллекторе выше 80 °С.

Вопросы работы гелиосистем с использованием солнечных тепловых коллекторов будут рассмотрены в следующих частях учебного пособия «Комбинированные тепловые гелиосистемы».

ГЛОССАРИЙ

Апертурная площадь (aperture area) – площадь прозрачного ограждения солнечного коллектора, через которое солнечное излучение поступает в коллектор.

Возобновляемые источники энергии – не ископаемые источники энергии (ветер, солнечная энергия, геотермальная, энергия волн, приливы, гидроэнергия, биомасса, газ из органических отходов, газ установок по обработке сточных вод и биогазы).

Гелиосистема – оборудование для преобразования энергии солнечной радиации в другие, удобные для использования виды энергии – тепловую или электрическую.

Инсоляция – облучение поверхности или пространства параллельным пучком лучей, поступающих с направления, в котором виден в данный момент центр солнечного диска.

Комбинированные тепловые гелиосистемы – энергетические тепловые технические устройства, использующие для своей работы, как традиционные источники энергии – ископаемые углеводороды, так и энергию возобновляемого источника – Солнца.

Коэффициент полезного действия (КПД) – характеристика эффективности системы (устройства, машины) в отношении преобразования или передачи энергии. Определяется отношением полезно использованной энергии к затраченной энергии, полученной системой.

Коаксиальная вакуумная трубка солнечного коллектора – сосуд Дьюара, выполненный в виде тонкостенных стеклянных коаксиальных трубок, запаянных с торца. Из пространства между стенками труб выкачан воздух.

Манифолд – устройство в виде металлического блока, который выступает в качестве теплосборника. К нему подсоединены вакуумные трубки, которые передают тепловую энергию через конденсатор, располагающийся в самом верху трубки.

Мгновенный коэффициент полезного действия – коэффициент полезного действия солнечных коллекторов при фиксированном угле падения солнечных лучей.

Одностенные вакуумные трубки (перьевые) – данные трубки представляют собой одностенную длинную стеклянную колбу, заглушенную с одного торца.

Отраженное солнечное излучение (применительно к солнечным тепловым коллекторам) – энергетическая освещенность, создаваемая направленным солнечным излучением, отраженным от поверхности отражателя на поверхность солнечного теплового коллектора. Единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м^2 , часовые и суточные суммы в МДж/м^2 .

Оптический КПД солнечного коллектора определяет, какой процент излучения, попадает через прозрачное покрытие на коллектор и поглощается абсорбером. Данный показатель полностью характеризует применяемые материалы защитного прозрачного материала и покрытия абсорбера, не зависит от климатических факторов и конструктивных и тепловых параметров гелиосистемы.

Прямое солнечное излучение – энергетическая освещенность, поступающая на деятельную поверхность в виде пучка параллельных лучей, исходящих непосредственно от диска Солнца. Единицы измерения: мгновенное значение в $\text{кВт}/\text{м}^2$, часовые и суточные суммы в $\text{МДж}/\text{м}^2$.

Рассеянное солнечное излучение – энергетическая освещенность, поступающая на земную поверхность со всего небесного свода под действием атмосферных и оптических факторов, за исключением действия прямого солнечного излучения. Единицы измерения: мгновенное значение в $\text{кВт}/\text{м}^2$, часовые и суточные суммы в $\text{МДж}/\text{м}^2$.

Селективное покрытие – покрытие, обеспечивающее максимальное поглощение солнечной энергии при минимальной отражающей способности.

Солнечный треккер – устройство, позволяющее следить за движением солнца по небосводу, и перемещать солнечный коллектор в положение, в котором поглощение солнечных лучей происходит наиболее эффективно.

Солнечная радиация – энергетическая освещенность (облученность или поверхностная плотность потока излучения), создаваемая электромагнитным излучением, поступающим от Солнца, атмосферы и земной поверхности, единицы измерения: мгновенное значение в $\text{кВт}/\text{м}^2$, часовые и суточные суммы в $\text{МДж}/\text{м}^2$.

Суммарное солнечное излучение – прямое и рассеянное солнечное излучение, поступающее на горизонтальную поверхность.

Единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м², часовые и суточные суммы в МДж/м².

Тепловой солнечный коллектор – устройство для сбора тепловой энергии Солнца (гелиоустановка), переносимой видимым светом и ближним инфракрасным излучением.

Тепловая энергия солнца – излучение солнечной радиации в диапазоне частот 350–1100 нм.

Энергоэффективность – эффективное (рациональное) использование энергетических ресурсов – достижение экономически оправданной эффективности использования топливно-энергетических ресурсов при существующем уровне развития техники и технологии и соблюдении требований к охране окружающей среды.

IAM (Incident Angle Modifier) – угловой коэффициент. Поправочный коэффициент, который помогает учесть конструктивные особенности конкретного коллектора, чтобы откорректировать количество солнечного излучения поступающего при различных углах падения относительно основной плоскости солнечного коллектора (учитывается все отражение, преломление и затенение солнечных лучей).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуткин О.И. Перспективы в мире и состояние в России // Energy Fresh. 2011. № 3. С. 25-27.

2. United Nations on Climate Change. General Convention Kyoto, 1997.

3. Грицевич И. Протокол конференции по глобальному климату в Киото: новые правила игры на следующее десятилетие // Экономическая эффективность. Ежеквартальный бюллетень Центра по эффективному использованию энергии (ЦЭНЭФ). М., 1998. № 18 (январь-март).

4. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 1–6, вып. 1–34. – Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 1989–1998.

5. ГОСТ 16350-80 Климат СССР. Районирование и статистические параметры климатических факторов для технических целей.

6. Бутузов В.А. Солнечное теплоснабжение в мире и в России // С.О.К. 2013. № 8.

7. Бутузов В.А. Обзор мирового рынка солнечных систем теплоснабжения // С.О.К. 2013. № 12.

8. Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. – М.: ОИВТ РАН, 2010.- 84 с.

9. ГОСТ Р 548562011: Теплоснабжение зданий. Методика расчета энергопотребности и эффективности системы теплогенерации с солнечными установками.

10. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М., Энергоатомиздат, 1991, 208 с.

11. 2017 Institute for Solar Technology Oberseestrasse 10 CH-8640 Rapperswil Tel. +41 55 222 48 21 info@spf.ch
Impressum GTC

12. Бутузов В.А. Обзор мирового рынка солнечных систем теплоснабжения // Журнал С.О.К., № 12/2013.

Приложение

Таблица П 1

Среднемесячные значения солнечного излучения и долей рассеянной солнечной радиации
и для ряда городов Российской Федерации, Республики Беларусь, Казахстана [4]

	Наклон панели к гори- зонту	суммарно по месяцам, Дж / м2 (кВт·ч / м²)												сум- марно за год	
		январь	фев.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сентяб.	окт.	нояб.	декаб.		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
Российская Федерация															
Архангельск	0° (гор.)	12·10 ⁶	61·10 ⁶	207·10 ⁶	356·10 ⁶	494·10 ⁶	575·10 ⁶	565·10 ⁶	385·10 ⁶	186·10 ⁶	71·10 ⁶	20·10 ⁶	4·10 ⁶	294·10 ⁶ (816)	
	Астрахань 46,4° с.ш.	0° (гор.)	117·10 ⁶ (32,4)	190·10 ⁶ (52,9)	344·10 ⁶ (95,5)	524·10 ⁶ (145,5)	682·10 ⁶ (189,4)	756·10 ⁶ (209,9)	683·10 ⁶ (189,7)	629·10 ⁶ (174,7)	460·10 ⁶ (127,8)	294·10 ⁶ (81,7)	162·10 ⁶ (45,0)	96·10 ⁶ (26,6)	494·10 ⁶ (1371,1)
		35°	202·10 ⁶ (56,1)	280·10 ⁶ (77,9)	441·10 ⁶ (122,5)	582·10 ⁶ (161,6)	676·10 ⁶ (187,8)	712·10 ⁶ (197,7)	664·10 ⁶ (184,5)	684·10 ⁶ (189,9)	593·10 ⁶ (164,6)	449·10 ⁶ (124,7)	289·10 ⁶ (80,2)	169·10 ⁶ (46,9)	574·10 ⁶ (1593,6)
		90° (верт.)	224·10 ⁶ (62,1)	273·10 ⁶ (75,9)	358·10 ⁶ (99,5)	371·10 ⁶ (103,0)	350·10 ⁶ (97,1)	331·10 ⁶ (92,0)	330·10 ⁶ (91,8)	404·10 ⁶ (112,1)	444·10 ⁶ (123,2)	419·10 ⁶ (116,5)	311·10 ⁶ (86,4)	190·10 ⁶ (52,7)	400·10 ⁶ (1112,2)
вращение вокруг полярной оси		250·10 ⁶ (69,4)	346·10 ⁶ (96,0)	566·10 ⁶ (157,1)	786·10 ⁶ (218,3)	965·10 ⁶ (268,0)	1055·10 ⁶ (293,3)	968·10 ⁶ (269,1)	994·10 ⁶ (276,1)	824·10 ⁶ (229,0)	592·10 ⁶ (164,4)	368·10 ⁶ (102,3)	206·10 ⁶ (57,3)	792·10 ⁶ (2200,2)	
Владивосток 43,1° с.ш.	0° (гор.)	262·10 ⁶ (72,7)	336·10 ⁶ (93,2)	468·10 ⁶ (130,0)	486·10 ⁶ (135,1)	518·10 ⁶ (143,9)	465·10 ⁶ (129,2)	448·10 ⁶ (124,3)	449·10 ⁶ (124,8)	429·10 ⁶ (119,1)	340·10 ⁶ (94,3)	233·10 ⁶ (64,6)	208·10 ⁶ (57,8)	464·10 ⁶ (1280,5)	

Продолжение табл. П1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	50°	438·10 ⁶ (121,7)	519·10 ⁶ (144,1)	531·10 ⁶ (147,5)	469·10 ⁶ (130,3)	502·10 ⁶ (139,5)	608·10 ⁶ (169,0)	619·10 ⁶ (171,8)	623·10 ⁶ (173,0)	497·10 ⁶ (138,1)	436·10 ⁶ (121,1)	395·10 ⁶ (109,6)	393·10 ⁶ (109,1)	605·10 ⁶ (168,3)
	90° (верт.)	284·10 ⁶ (79,0)	379·10 ⁶ (105,2)	457·10 ⁶ (126,8)	460·10 ⁶ (127,7)	529·10 ⁶ (147,1)	637·10 ⁶ (177,0)	598·10 ⁶ (166,0)	501·10 ⁶ (139,2)	325·10 ⁶ (90,2)	270·10 ⁶ (74,9)	232·10 ⁶ (64,4)	241·10 ⁶ (66,9)	491·10 ⁶ (136,2)
	вращение вокруг полярной оси	547·10 ⁶ (151,9)	567·10 ⁶ (157,6)	592·10 ⁶ (164,3)	699·10 ⁶ (94,2)	662·10 ⁶ (184,0)	702·10 ⁶ (194,9)	760·10 ⁶ (211,1)	817·10 ⁶ (227,0)	682·10 ⁶ (189,3)	644·10 ⁶ (178,9)	542·10 ⁶ (150,6)	514·10 ⁶ (142,8)	773·10 ⁶ (216,7)
	0° (гор.)	109·10 ⁶	176·10 ⁶	364·10 ⁶	494·10 ⁶	682·10 ⁶	708·10 ⁶	708·10 ⁶	615·10 ⁶	431·10 ⁶	255·10 ⁶	134·10 ⁶	71·10 ⁶	475·10 ⁶ (1319)
Волгоград	0° (гор.)	84·10 ⁶	142·10 ⁶	289·10 ⁶	385·10 ⁶	565·10 ⁶	620·10 ⁶	590·10 ⁶	473·10 ⁶	326·10 ⁶	176·10 ⁶	80·10 ⁶	50·10 ⁶	378·10 ⁶ (1050)
Екатеринбург	0° (гор.)	65·10 ⁶	146·10 ⁶	318·10 ⁶	446·10 ⁶	570·10 ⁶	615·10 ⁶	588·10 ⁶	462·10 ⁶	282·10 ⁶	145·10 ⁶	78·10 ⁶	46·10 ⁶	376·10 ⁶ (1045)
Иркутск	0° (гор.)	105·10 ⁶	192·10 ⁶	385·10 ⁶	491·10 ⁶	599·10 ⁶	611·10 ⁶	586·10 ⁶	491·10 ⁶	360·10 ⁶	235·10 ⁶	117·10 ⁶	71·10 ⁶	424·10 ⁶ (1179)
Казань	0° (гор.)	54·10 ⁶	117·10 ⁶	251·10 ⁶	394·10 ⁶	561·10 ⁶	641·10 ⁶	590·10 ⁶	502·10 ⁶	285·10 ⁶	130·10 ⁶	54·10 ⁶	29·10 ⁶	361·10 ⁶ (1002)
Кострома	0° (гор.)	46·10 ⁶	121·10 ⁶	266·10 ⁶	404·10 ⁶	546·10 ⁶	600·10 ⁶	590·10 ⁶	455·10 ⁶	254·10 ⁶	109·10 ⁶	44·10 ⁶	27·10 ⁶	346·10 ⁶ (962)
Краснодар	0° (гор.)	117·10 ⁶	184·10 ⁶	314·10 ⁶	440·10 ⁶	595·10 ⁶	636·10 ⁶	653·10 ⁶	540·10 ⁶	402·10 ⁶	264·10 ⁶	130·10 ⁶	75·10 ⁶	435·10 ⁶ (1208)

Продолжение табл. П1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Красноярск	0° (гор.)	46·10 ⁶	147·10 ⁶	327·10 ⁶	444·10 ⁶	486·10 ⁶	620·10 ⁶	578·10 ⁶	377·10 ⁶	243·10 ⁶	163·10 ⁶	67·10 ⁶	34·10 ⁶	3,54·10 ⁹ (982)
		84·10 ⁶	172·10 ⁶	274·10 ⁶	372·10 ⁶	554·10 ⁶	605·10 ⁶	584·10 ⁶	475·10 ⁶	316·10 ⁶	165·10 ⁶	67·10 ⁶	52·10 ⁶	3,72·10 ⁹ (1033)
		132·10 ⁶	182·10 ⁶	316·10 ⁶	500·10 ⁶	670·10 ⁶	708·10 ⁶	700·10 ⁶	616·10 ⁶	438·10 ⁶	284·10 ⁶	148·10 ⁶	104·10 ⁶	4,80·10 ⁹ (1333)
Москва 55,7° с.ш., 39,7° в.д.	0° (гор.)	59·10 ⁶ (16,4)	125·10 ⁶ (34,6)	286·10 ⁶ (79,4)	400·10 ⁶ (111,2)	581·10 ⁶ (161,4)	600·10 ⁶ (166,7)	599·10 ⁶ (166,3)	468·10 ⁶ (130,1)	298·10 ⁶ (82,9)	149·10 ⁶ (41,4)	67·10 ⁶ (18,6)	42·10 ⁶ (11,7)	3,67·10 ⁹ (1020,7)
		74·10 ⁶ (20,6)	191·10 ⁶ (53,0)	390·10 ⁶ (108,4)	459·10 ⁶ (127,6)	599·10 ⁶ (166,3)	587·10 ⁶ (163,0)	604·10 ⁶ (167,7)	522·10 ⁶ (145,0)	377·10 ⁶ (104,6)	219·10 ⁶ (60,7)	125·10 ⁶ (34,8)	79·10 ⁶ (22,0)	4,23·10 ⁹ (1173,7)
		77·10 ⁶ (21,3)	208·10 ⁶ (57,9)	378·10 ⁶ (104,9)	337·10 ⁶ (93,5)	390·10 ⁶ (108,2)	363·10 ⁶ (100,8)	392·10 ⁶ (108,8)	373·10 ⁶ (103,6)	311·10 ⁶ (86,5)	209·10 ⁶ (58,1)	139·10 ⁶ (38,7)	93·10 ⁶ (25,8)	3,27·10 ⁹ (908,3)
Нижний Новгород	вращение вокруг полярной оси	78·10 ⁶ (21,7)	224·10 ⁶ (62,3)	478·10 ⁶ (132,9)	581·10 ⁶ (161,4)	821·10 ⁶ (228,0)	820·10 ⁶ (227,8)	809·10 ⁶ (224,8)	681·10 ⁶ (189,2)	455·10 ⁶ (126,5)	258·10 ⁶ (71,6)	152·10 ⁶ (42,2)	94·10 ⁶ (26,0)	5,45·10 ⁹ (1514,3)
		50·10 ⁶	121·10 ⁶	268·10 ⁶	398·10 ⁶	577·10 ⁶	634·10 ⁶	599·10 ⁶	480·10 ⁶	276·10 ⁶	121·10 ⁶	52·10 ⁶	32·10 ⁶	3,61·10 ⁹ (1002)
		82·10 ⁶	166·10 ⁶	354·10 ⁶	450·10 ⁶	574·10 ⁶	638·10 ⁶	620·10 ⁶	486·10 ⁶	326·10 ⁶	159·10 ⁶	86·10 ⁶	56·10 ⁶	4,00·10 ⁹ (1110)
Норильск	0° (гор.)	2·10 ⁶	29·10 ⁶	230·10 ⁶	389·10 ⁶	595·10 ⁶	595·10 ⁶	595·10 ⁶	314·10 ⁶	155·10 ⁶	63·10 ⁶	8·10 ⁶	0	2,98·10 ⁹ (826)

Продолжение табл. П 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Омск	0° (гор.)	84·10 ⁶	168·10 ⁶	340·10 ⁶	456·10 ⁶	586·10 ⁶	640·10 ⁶	626·10 ⁶	486·10 ⁶	318·10 ⁶	164·10 ⁶	82·10 ⁶	56·10 ⁶	401·10 ⁹ (1113)
Петропав- ловск-Кам- чатский 53,3° с.ш.	0° (гор.)	109·10 ⁶ (30,2)	179·10 ⁶ (49,6)	340·10 ⁶ (94,3)	458·10 ⁶ (127,3)	550·10 ⁶ (152,9)	561·10 ⁶ (155,8)	521·10 ⁶ (144,9)	472·10 ⁶ (131,1)	328·10 ⁶ (91,0)	232·10 ⁶ (64,4)	121·10 ⁶ (33,6)	84·10 ⁶ (23,3)	3,95·10 ⁹ (1098,4)
	50°	254·10 ⁶ (70,6)	345·10 ⁶ (95,9)	512·10 ⁶ (142,3)	533·10 ⁶ (148,1)	531·10 ⁶ (147,4)	513·10 ⁶ (142,5)	495·10 ⁶ (137,6)	507·10 ⁶ (140,9)	433·10 ⁶ (120,2)	425·10 ⁶ (118,0)	294·10 ⁶ (81,6)	251·10 ⁶ (69,8)	5,09·10 ⁹ (1414,9)
	90° (верт.)	279·10 ⁶ (77,7)	359·10 ⁶ (99,7)	480·10 ⁶ (133,3)	418·10 ⁶ (116,1)	347·10 ⁶ (96,5)	325·10 ⁶ (90,3)	329·10 ⁶ (91,3)	358·10 ⁶ (99,5)	350·10 ⁶ (97,1)	401·10 ⁶ (111,5)	313·10 ⁶ (86,8)	283·10 ⁶ (78,5)	4,24·10 ⁹ (1173,3)
Пятигорск	вращение вокруг полярной оси	289·10 ⁶ (80,2)	412·10 ⁶ (114,5)	653·10 ⁶ (181,5)	723·10 ⁶ (200,8)	730·10 ⁶ (202,7)	729·10 ⁶ (202,5)	682·10 ⁶ (189,3)	695·10 ⁶ (193,0)	562·10 ⁶ (156,0)	529·10 ⁶ (147,0)	345·10 ⁶ (95,9)	289·10 ⁶ (80,2)	6,64·10 ⁹ (1843,6)
	0° (гор.)	134·10 ⁶	205·10 ⁶	272·10 ⁶	406·10 ⁶	523·10 ⁶	553·10 ⁶	574·10 ⁶	486·10 ⁶	364·10 ⁶	243·10 ⁶	130·10 ⁶	105·10 ⁶	3,36·10 ⁹ (1110)
Ростов-на- Дону 47° с.ш.	0° (гор.)	126·10 ⁶	190·10 ⁶	333·10 ⁶	464·10 ⁶	647·10 ⁶	672·10 ⁶	678·10 ⁶	597·10 ⁶	429·10 ⁶	276·10 ⁶	126·10 ⁶	80·10 ⁶	4,60·10 ⁹ (1278)
Самара	0° (гор.)	82·10 ⁶	162·10 ⁶	308·10 ⁶	452·10 ⁶	634·10 ⁶	660·10 ⁶	639·10 ⁶	532·10 ⁶	340·10 ⁶	169·10 ⁶	78·10 ⁶	56·10 ⁶	4,11·10 ⁹ (1142)
Санкт- Петербург 60° с.ш.	0° (гор.)	21·10 ⁶	71·10 ⁶	214·10 ⁶	331·10 ⁶	515·10 ⁶	578·10 ⁶	545·10 ⁶	394·10 ⁶	230·10 ⁶	92·10 ⁶	25·10 ⁶	8·10 ⁶	3,02·10 ⁹ (830)

Продолжение табл. П1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Сочи 43,6°с.ш.	0° (гор.)	133·10 ⁶ (37,0)	199·10 ⁶ (55,2)	302·10 ⁶ (84,0)	420·10 ⁶ (116,6)	602·10 ⁶ (167,1)	716·10 ⁶ (199,0)	745·10 ⁶ (206,8)	666·10 ⁶ (185,0)	468·10 ⁶ (130,1)	343·10 ⁶ (95,4)	195·10 ⁶ (54,2)	125·10 ⁶ (34,7)	491·10 ⁹ (1365,1)
	35°	223·10 ⁶ (62,0)	289·10 ⁶ (80,2)	373·10 ⁶ (103,5)	450·10 ⁶ (125,0)	587·10 ⁶ (163,0)	666·10 ⁶ (184,9)	713·10 ⁶ (198,1)	709·10 ⁶ (197,0)	582·10 ⁶ (161,6)	510·10 ⁶ (141,7)	334·10 ⁶ (92,8)	222·10 ⁶ (61,7)	566·10 ⁹ (1571,4)
	90° (верт.)	237·10 ⁶ (65,8)	275·10 ⁶ (76,5)	328·10 ⁶ (91,1)	288·10 ⁶ (80,0)	313·10 ⁶ (86,9)	310·10 ⁶ (86,2)	345·10 ⁶ (95,7)	409·10 ⁶ (113,6)	428·10 ⁶ (119,0)	468·10 ⁶ (130,0)	351·10 ⁶ (97,6)	243·10 ⁶ (67,6)	396·10 ⁹ (1099,9)
	вращение вокруг полярной оси	274·10 ⁶ (76,0)	357·10 ⁶ (99,1)	468·10 ⁶ (129,9)	576·10 ⁶ (160,1)	800·10 ⁶ (222,1)	970·10 ⁶ (269,3)	1040·10 ⁶ (289,0)	1022·10 ⁶ (284,0)	799·10 ⁶ (222,0)	669·10 ⁶ (185,8)	422·10 ⁶ (117,2)	272·10 ⁶ (75,6)	767·10 ⁹ (2129,9)
Хабаровск	0° (гор.)	176·10 ⁶	270·10 ⁶	440·10 ⁶	498·10 ⁶	600·10 ⁶	643·10 ⁶	600·10 ⁶	509·10 ⁶	400·10 ⁶	282·10 ⁶	184·10 ⁶	141·10 ⁶	4,74·10 ⁹ (1318)
Чита	0° (гор.)	113·10 ⁶	214·10 ⁶	396·10 ⁶	503·10 ⁶	613·10 ⁶	643·10 ⁶	555·10 ⁶	478·10 ⁶	366·10 ⁶	258·10 ⁶	136·10 ⁶	88·10 ⁶	4,36·10 ⁹ (1212)
Южно-Ку- рильск	0° (гор.)	175·10 ⁶	272·10 ⁶	383·10 ⁶	456·10 ⁶	490·10 ⁶	458·10 ⁶	427·10 ⁶	390·10 ⁶	346·10 ⁶	282·10 ⁶	163·10 ⁶	140·10 ⁶	3,98·10 ⁹ (1106)
Якутск	0° (гор.)	32·10 ⁶	107·10 ⁶	314·10 ⁶	492·10 ⁶	591·10 ⁶	651·10 ⁶	618·10 ⁶	450·10 ⁶	270·10 ⁶	134·10 ⁶	50·10 ⁶	17·10 ⁶	3,73·10 ⁹ (1035)
Белоруссия														
Минск	0° (гор.)	67·10 ⁶	138·10 ⁶	310·10 ⁶	406·10 ⁶	578·10 ⁶	636·10 ⁶	596·10 ⁶	460·10 ⁶	314·10 ⁶	163·10 ⁶	67·10 ⁶	42·10 ⁶	3,78·10 ⁹ (1049)

Окончание табл. П1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Казахстан														
Алма-Ата	0° (гор.)	176·10 ⁶	239·10 ⁶	354·10 ⁶	484·10 ⁶	632·10 ⁶	678·10 ⁶	729·10 ⁶	647·10 ⁶	497·10 ⁶	321·10 ⁶	187·10 ⁶	136·10 ⁶	5,08·10 ⁹ (1411)
Астана	0° (гор.)	134·10 ⁶	234·10 ⁶	408·10 ⁶	496·10 ⁶	643·10 ⁶	714·10 ⁶	670·10 ⁶	559·10 ⁶	398·10 ⁶	211·10 ⁶	126·10 ⁶	94·10 ⁶	4,69·10 ⁹ (1302)
Джезказган	0° (гор.)	176·10 ⁶	266·10 ⁶	419·10 ⁶	540·10 ⁶	689·10 ⁶	746·10 ⁶	735·10 ⁶	662·10 ⁶	501·10 ⁶	287·10 ⁶	172·10 ⁶	132·10 ⁶	5,33·10 ⁹ (1479)
Кустанай	0° (гор.)	113·10 ⁶	201·10 ⁶	385·10 ⁶	482·10 ⁶	653·10 ⁶	691·10 ⁶	624·10 ⁶	523·10 ⁶	343·10 ⁶	209·10 ⁶	109·10 ⁶	75·10 ⁶	4,408·10 ⁹ (1224)

Доля рассеянного излучения в общей инсоляции

Город	янь.	фев.	март	апр.	май	июнь	июль	авг.	сен.	окт.	ноя.	дек.	в среднем за год
Алма-Ата	57 %	56 %	52 %	42 %	40 %	34 %	28 %	31 %	31 %	37 %	50 %	53 %	39 %
Москва	93 %	73 %	64 %	56 %	50 %	49 %	54 %	54 %	61 %	67 %	69 %	84 %	57 %

Учебное издание

Торопов Алексей Леонидович

КОМБИНИРОВАННЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ГЕЛИОСИСТЕМЫ

Часть 1

**Тепловые солнечные коллекторы для индивидуальных
и децентрализованных систем отопления
и горячего водоснабжения**

Учебное пособие

Технический редактор Кулакова Г.А.

Подписано в печать 22.02.2019

Бумага офсетная.

Гарнитура PeterburgC

Формат 60×84 1/16

Печать трафаретная. Печ. л. 5,5.

Тираж 500 экз. Заказ № 006-19.

Отпечатано в типографии ИД «Академия Естествознания»,
440026, г. Пенза, ул. Лермонтова, 3