

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

В.В. Кувшинов, Н.В. Морозова

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Учебное пособие



Москва 2018

УДК 621.311.25(075.8)

ББК 31.63я73

К 88

*Учебное пособие рекомендовано к изданию ученым
советом Института ядерной энергии и промышленности
Севастопольского государственного университета,
протокол № 1 от 25 января 2018 г.*

Кувшинов В.В., Морозова Н.В.

К 88 Солнечная энергетика: Учебное пособие. –
М.: Издательство «Спутник +», 2018. – 193 с.

ISBN 978-5-9973-4715-4

УДК 621.311.25(075.8)

ББК 31.63я73

Отпечатано с готового оригинал-макета.

ISBN 978-5-9973-4715-4

© Кувшинов В.В.,
Морозова Н.В., 2018

ВВЕДЕНИЕ

Предложенное пособие описывает солнечные энергетические установки, предназначенные для выработки тепловой и электрической энергии. Пособие предназначено для бакалавров, обучающихся по направлению 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника, профилям подготовки Энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии (НВИЭ).

Учебное пособие может использоваться при изучении следующих дисциплин: «Режимы использования установок с НИЭ», «Применение солнечной энергии», «Спецкурс по солнечным, ветровым и биоэнергетическим установкам», «Проектирование и эксплуатация, солнечные и ветровых электростанций», «Теоретические основы использования возобновляемых источников энергии». Пособие может использоваться для подготовки магистров направления подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника, различных профилей.

Представленное учебное пособие состоит из трёх основных разделов и предлагает практически описание основных типов установок, источником энергии для которых является солнечная энергия. В конце каждого из разделов представлен список изучаемой литературы и вопросы практической и теоретической подготовки.

В первом разделе рассмотрены основы теории преобразования солнечной энергии в тепловую электрическую энергию, структурно-функциональное построение гелиосистем, режимы работы солнечных установок. Основное внимание уделяется принципу действия, конструкциям и характеристикам солнечных установок, методам их расчетов, определению параметров и технико-экономических показателей, освещены вопросы монтажа и эксплуатации оборудования для солнечной электроэнергетики. Этот раздел состоит из трёх основных тем, каждая тема представляет отдельную главу солнечной и рассчитана на изучение студентами ВУЗов технических специальностей. В конце раздела приведены вопросы, рассчитанные на практическое и теоретическое обучение.

Во втором разделе пособия представлена тепловая гелиоэнергетика и рассматриваются основные вопросы, необходимые при проектировании гелиосистем различной мощности. Основное внимание уделяется принципу действия, конструкциям и характеристикам солнечных установок, методам их расчетов, определению параметров и технико-экономических показателей, освещены вопросы монтажа и эксплуатации оборудования для солнечной электроэнергетики. Этот раздел состоит из пяти тем, теоретических вопросов и списка использованной литературы.

Третьим разделом представлена солнечная фотоэнергетика, этот раздел состоит из четырёх основных тем: теоретические основы фотоэффекта, фотовольтаика, комбинированные установки для преобразования солнечной энергии и солнечные концентраторы.

Издание может быть полезно для аспирантов энергетических специальностей университетов и институтов, а также специалистов в областях солнечной энергетики.

РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Тема 1. Основные характеристики Солнца

Цель: Изучение энергетических характеристик Солнца

Перечень рассматриваемых вопросов:

1.1. Солнце – как источник энергии

1.2. Строение и состав Солнца

1.3. Характеристика Солнца и солнечного излучения

1.4. Спектральное распределение внеземного излучения Солнца

*1.4.1. Энергетическая характеристика солнечного излучения.
Солнечная постоянная*

*1.4.2. Солнечное излучение за пределами атмосферы Земли.
Спектральное распределение внеземного излучения*

1.4.3. Временные изменения внеземного излучения

1.1. Солнце – как источник энергии

Строение и характеристики Солнца определяют природу энергии излучения, испускаемого им в космическое пространство.

Солнце представляет собой сферическое тело (диаметром $1,39 \times 10^6$ км) из раскалённого газообразного вещества, отстоящее от Земли на расстоянии $\sim 1,5 \cdot 10^8$ км. По наблюдениям с Земли, Солнце делает один оборот вокруг своей оси примерно за 4 недели. Вращается оно не как твёрдое тело: экваториальная область совершает каждый оборот за 27 суток, а полярные районы – за 30 суток.

Поверхность Солнца имеет эффективную температуру ~ 5762 К эта температура соответствует полной энергии, которая поступает от Солнца за пределами атмосферы.

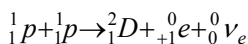
Температура центральных внутренних областей, по разным оценкам, составляет $8 \cdot 10^6 \div 40 \cdot 10^6$ К, а их плотность примерно в 80 – 100 раз превышает плотность воды. Солнце представляет собой непрерывно действующий термоядерный реактор, корпусом (котлом) которого являются составляющие его газы, удерживаемые гравитационными силами. Энергия излучения Солнца, по-видимому определяется несколькими термоядерными реакциями, из которых наиболее важным считается процесс превращения водорода (т.е. четырёх протонов) в гелий (т.е. одно ядро гелия) масса ядра гелия меньше массы четырёх протонов, поэтому во время реакции происходит потеря массы и превращения её энергию (на одну частицу выделяется 6,7 МэВ).

Реакции синтеза лёгких ядер, связанные с преодолением потенциальной энергии их отталкивания, эффективно могут протекать при сверхвысоких температурах порядка $10^8 - 10^9$ К, превышающих температуру центральных

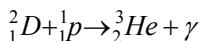
областей Солнца ($T \approx 1,3 \cdot 10^7 K$). Такие реакции называются термоядерными реакциями синтеза и происходят в веществе, находящемся в плазменном состоянии. Эти реакции и являются (по современным представлениям) источниками энергии Солнца и звёзд, компенсирующими их излучение. Солнце каждую секунду излучает энергию $3,8 \cdot 10^{26} \text{ Дж}$, что соответствует выделению энергии на единицу массы в 1 с всего лишь $1,88 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} / (\text{с} \cdot \text{кг})$.

Оно составляет лишь 1% от удельной энергии, выделяемой в живом организме в процессе обмена веществ.

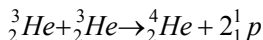
Термоядерные реакции на Солнце могут протекать в форме термоядерных циклов. Один из вариантов протон – протонного цикла начинается с соединения двух протонов в дейтерий с испусканием позитрона и электронного нейтрино:



Дальнейшее протекание цикла осуществляется по схеме:



Вероятным продолжением цикла является реакция с выделением энергии:



где ${}^4_2\text{He}$ - символ α - частицы.

В углеродно-азотном цикле ядра углерода являются «катализаторами» реакции соединения ядер водорода в ядро гелия.

Результатом цикла является привлечение четырёх протонов в ядро гелия с появлением двух позитронов и γ - излучения. На одно ядро гелия выделяется энергия 26,8 МэВ, что составляет в пересчёте на грамм-атом гелия $700 \text{ тыс. кВт} \cdot \text{ч}$ энергии и этой энергии достаточно для компенсации излучения Солнца. Отдельные реакции цикла отдалены друг от друга временем, непомерно большим по земным масштабам. Однако этот цикл замкнут и происходит непрерывно. Поэтому все стадии цикла происходят на Солнце одновременно, начавшись в разные моменты времени. Энергия термоядерных реакций должна передаваться изнутри к поверхности и затем излучаться в пространство. При этом осуществляется последовательность процессов излучения и конвекции, при которой происходят испускания, поглощение и переизлучение. Излучение солнечного ядра приходится на часть спектра электромагнитного излучения, соответствующую рентгеновскому и γ - излучению, причём длины волн излучения возрастают с падением температуры при увеличении радиального расстояния.

1.2 Строение и состав Солнца

Вычислено, что 90% энергии выделяется в области $0 - 0,23R$ (R - радиус Солнца $\approx 1,4 \cdot 10^6$ км), в которой сосредоточено 40% массы Солнца. На расстоянии $0,7R$ от центра температура падает до ~ 130.000 К, а плотность до 70 кг/м³. Здесь становятся важными конвективные процессы, поэтому зона $(0,7 - 1,0)R$ называется конвективной зоной. В пределах этой зоны температура падает до ~ 5.000 К, а плотность - до 70^{-5} кг/м³.

Предполагается, что поверхность Солнца образована гранулами, или нерегулярными конвективными ячейками, с размерами $1000 - 3000$ км и временем существования, исчисляемым несколькими минутами. Верхний слой конвективной зоны называется фотосферой. Граница фотосферы чётко определена, несмотря на низкую плотность (10^{-4} плотности воздуха на уровне моря). Она существенно непрозрачна, поскольку составляющие её газы сильно ионизованы и способны поглощать и испускать излучение в непрерывном спектре. Фотосфера является источником большей части солнечного излучения.

За пределами фотосферы атмосфера Солнца более или менее прозрачна и её можно наблюдать во время полного солнечного затмения или с помощью приспособлений, заслоняющих солнечный диск. Над фотосферой находится слой более холодных газов толщиной в несколько сот километров, называемый обращающим слоем. Выше расположен слой толщиной ~ 10.000 км, называемый хромосферой. Это – газообразный слой с температурой несколько более высокой, чем в фотосфере, и с более низкой плотностью. Ещё дальше от центра находится корона с очень низкой плотностью и очень высокой температурой (10^6 К).

Эта упрощённая схема Солнца, его физического строения, а также его градиентов температуры и плотности лежит в основе оценки, согласно которой Солнце в действительности не является абсолютно чёрным излучателем при постоянной температуре. Скорее, испускаемое солнечное излучение возникает, в результате совместного действия нескольких слоёв, которые испускают и поглощают, излучения различных длин волн. Также наблюдаются небольшие изменения во времени в распределении спектральной интенсивности Солнца в ультракоротковолновой и ультрадлинноволновой частях спектра.

Для многих целей (например, для расчётов тепловых процессов) можно рассматривать Солнце как абсолютно чёрный излучатель с температурой ~ 5762 К; для других процессов, которые зависят от длины волны излучения и для которых важно спектральное распределение (например, для фотохимических или фотоэлектрических процессов) может потребоваться более детальное рассмотрение Солнечного спектра.

1.3. Характеристика Солнца и солнечного излучения

С позиции энергетической светимости Солнце можно рассматривать как абсолютно чёрное тело с температурой поверхности $T = 5800K$, радиус Солнца $R_c = 6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$, расстояние до Земли $R_z = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}$, солнечная постоянная (вне Земли) $I_s = 1353 \text{ Вт/м}^2$, масса Солнца $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$

Основные законы абсолютно чёрного тела

Закон Стефана-Больцмана определяет величину энергетической светимости (интенсивности) нагретого абсолютно чёрного тела:

$$I = \sigma T^4 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

где: $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \right]$ - постоянная Стефана-Больцмана;

T - абсолютная температура нагрева $[K]$.

Первый закон Вина (закон смещения).

Длина волны, соответствующая максимальной температуре абсолютно чёрного тела, обратно пропорциональна величине этой температуры:

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} [\text{м}]$$

где $\lambda_{\max}$ - длина волны теплового излучения, соответствующая максимальной температуре; $b = 2,9 \cdot 10^{-3} [\text{м} \cdot \text{К}]$ - постоянная Вина, экспериментальная величина.

Второй закон Вина.

Максимальное значение спектральной плотности интенсивности излучения $I_{\lambda, \max}$ абсолютно чёрного тела пропорционально пятой степени абсолютной температуры тела.

$$I_{\lambda, \max} = c T^5 \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]$$

где $c = 1,29 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}^5} \right]$ - вторая постоянная Вина, экспериментальная величина.

$I_{\lambda, \max}$ - максимальная величина спектральной интенсивности излучения а.ч.т.

При решении задач для «серых» тел необходимо использовать понятие степени черноты тела:

$$\varepsilon = \frac{I_{\lambda, T}}{I_{\lambda, T}^*}$$

где $I_{\lambda, T}$ - интенсивность излучения «серого» тела, длина волны λ , температура T ;

$I_{\lambda, T}^*$ - интенсивность излучения а.ч.т.

Очевидно: $I_{\lambda, T} = \varepsilon \cdot I_{\lambda, T}^*$

В релятивистских процессах масса тела и энергия связаны соотношением Эйнштейна:

$$E = m \cdot c^2 \text{ [Дж]}$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м\с - скорость света в вакууме.

Закон Кирхгофа – устанавливает, что для «серых» тел степень черноты численно равна поглощательной способности тела $\varepsilon = a$.

1.4. Спектральное распределение внеземного излучения Солнца

1.4.1. Энергетическая характеристика солнечного излучения. Солнечная постоянная

Рассмотрим взаимное положение Земли и Солнца. Эксцентриситет земной орбиты таков, что расстояние между Солнцем и Землёй изменяется на $\pm 1,7\%$. Введём понятие астрономическая единица – соответствует среднему расстоянию между Землёй и Солнцем ($\approx 1,5 \cdot 10^8$ км). На расстоянии астрономической единицы Солнце видно наблюдателю с Земли под углом 32^0 (минуты).

Характеристики Солнца и его пространственное положение относительно Земли таковы, что интенсивность солнечного излучения за пределами атмосферы Земли практически постоянна. Величину этой постоянной величины плотности внеземного излучения можно определить, используя законы излучения абсолютно чёрного тела как модели Солнца ($R_C = 6,95 \cdot 10^5$ км - по хромосфере, $T_C = 5672$ K), средняя плотность солнечного излучения на поверхности Солнца (закон Стефана – Больцмана):

$$I_S = \delta T_C^4 = 6,25 \cdot 10^7 \text{ Вт / м}^2$$

Радиус орбиты Земли $R_0 = 1,5 \cdot 10^8 \text{ км}$, тогда средняя плотность потока энергии излучения на орбите Земли:

$$I_0 = I_s \frac{R_c^2}{R_0^2} \approx 1340 \text{ Вт} / \text{м}^2$$

Энергетическая отлученность (интенсивность) - I_0 , соответствующая условиям солнечного облучения плоскости, расположенной по нормали к направлению на Солнце (отнесённая к 1 м^2) и удалённой от него на расстояние, равное одной астрономической единице R_0 (среднее расстояние от Земли до Солнца), называется солнечной постоянной (I_s или I_{SC}).

Следовательно, солнечной постоянной называется энергия излучения Солнца, падающего в единицу времени на единицу площади поверхности, перпендикулярно потоку излучения в космическом пространстве на среднем расстоянии Земли от Солнца.

Измерение солнечной постоянной возможно двумя путями:

1) Измерение солнечного излучения на поверхности Земли после прохождения им атмосферы и, следовательно, после частичного поглощения и рассеяния компонентами атмосферы. Экстраполяция результатов наземных измерений, которые производились в высокогорной местности, должна была основываться на оценках пропускательной способности атмосферы в различных частях солнечного спектра.

Результаты этих исследований, проведённых Абботом и Джонсоном (Смитсоновский институт, США), привели к цифре $1322 \text{ Вт} / \text{м}^2$ – при первых измерениях, а затем к уточнённой – $1395 \text{ Вт} / \text{м}^2$ (Джонсон).

2) Непосредственные измерения с помощью сверхвысотной авиации, аэростатов и космических аппаратов. Таким способом удалось непосредственно измерить интенсивность солнечного излучения за пределами большей части или всей атмосферы Земли. Эти измерения после анализа и осреднения привели к новому стандартному значению солнечной постоянной:

$$I_{SC} = 1353 \text{ Вт} / \text{м}^2 \left(1940 \text{ ккал} / (\text{см}^2 \cdot \text{мин}) \right)$$

$$\text{или } I_{SC} = 428 \text{ БТЕ} / (\text{фут}^2 \cdot \text{час})$$

$$I_{SC} = 4 \cdot 871 \text{ кДж} / (\text{м}^2 \cdot \text{час})$$

Как уже ранее указывалось Солнце каждую секунду излучает энергию $3,8 \cdot 10^{26} \text{ Дж}$ [на единицу массы в $1 \text{ с} - 1,88 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} / (\text{с} \cdot \text{кг})$]

Распределение плотности потока излучения, испускаемого Солнцем, по его поверхности достаточно равномерное, но объёмный характер излучения приводит к некоторому спаду яркости от центра солнечного диска

визуальная яркость в 1,22 раза больше средней. Ближе к краю яркость диска уменьшается, изменяется спектр излучения (относительное содержание красных лучей по мере удаления от центра диска возрастает).

1.4.2. Солнечное излучение за пределами атмосферы Земли. Спектральное распределение внеземного излучения

Зная абсолютное значение солнечной постоянной, можно найти энергию, которая поступает на поверхность приемных панелей солнечных элементов, батарей и преобразователей солнечной энергии, работающих во внеатмосферных (космических) условиях, что требуется для расчётов эффективности (КПД) всех типов преобразователей.

Чтобы определить полезную энергию, полученную от солнечных преобразователей энергии, необходимо знать спектральное распределение радиации, особенно это важно для фотоэлектрических солнечных элементов. Например, максимальная спектральная чувствительность современных солнечных элементов из кремния находится в интервале длин волн от 0,3 до 1,1 мкм.

Спектральное распределение энергии излучения Солнца неоднократно измерялось как с поверхности Земли, так и непосредственно за пределами атмосферы. С начала 70-х годов в качестве стандарта выбрано распределение излучения Солнца по длинам волн, полученное М.П. Такаекарой (США). Достаточно достоверно и широко применяется спектральное распределение, предложенное российскими учёными Е.А. Макаровой и А.В. Харитоновой. Разница между этими спектрами незначительная ($\pm 5 \text{ Вт} / \text{м}^2$).

В таблице 1.1 приведены значения средней энергии излучения, соответствующие узкой полосе с центром при длине волны λ , и энергии интегрального излучения в интервале длин волн от 0 до λ , которые были вычислены с использованием стандартной кривой.

Солнечная постоянная – обобщённая интегральная характеристика – не учитывает спектральный состав внеземного излучения, который в значительной степени определяет точное значение солнечной постоянной. По мере уточнения данных о распределении внеземного излучения по отдельным участкам спектра корректировалось и значение солнечной постоянной. На основании высотных и космических измерений, выполненных за последнее время, построена новая стандартная кривая поверхностной плотности монохроматического потока излучения. На основе стандартной кривой вычислены значения средней энергии излучения, соответствующие узкой полосе с центром при длине волны λ и энергии интегрального излучения в интервале длин волн от 0 до λ .

Таблица 1.1

Поверхностная плотность монохроматического потока внеземного солнечного излучения (солнечная постоянная $1353 \text{ Вт} / \text{м}^2$)

λ	E_λ	D_λ	λ	E_λ	D_λ	λ	E_λ	D_λ
0,115	0,007	1×10^{-4}	0,43	1639	12,47	0,90	891	63,37
0,14	0,03	5×10^{-4}	0,44	1810	13,73	1,00	748	69,49
0,16	0,23	6×10^{-4}	0,45	2006	15,14	1,2	485	78,4
0,18	1,25	$1,6 \times 10^{-3}$	0,46	2066	16,65	1,4	337	84,33
0,20	10,7	$8,1 \times 10^{-3}$	0,47	2033	18,17	1,6	245	88,61
0,22	57,5	0,05	0,48	2074	19,68	1,8	159	91,59
0,23	66,7	0,1	0,49	1950	21,15	2,0	103	93,49
0,24	63,0	0,14	0,50	1942	22,60	2,2	79	94,83
0,25	70,9	0,19	0,51	1882	24,01	2,4	62	95,86
0,26	130	0,27	0,52	1833	25,38	2,6	48	96,87
0,27	232	0,41	0,53	1842	26,74	2,8	39	97,31
0,28	222	0,56	0,54	1783	28,08	3,0	31	97,83
0,29	482	0,81	0,55	1725	29,38	3,2	22,6	98,22
0,30	514	1,21	0,56	1695	30,65	3,4	16,6	98,5
0,31	689	1,66	0,57	1712	31,91	3,6	13,5	98,72
0,32	830	2,22	0,58	1715	33,18	3,8	11,1	98,91
0,33	1059	2,93	0,59	1700	34,44	4	9,5	99,06
0,34	1074	3,72	0,60	1666	35,68	4,5	5,9	99,34
0,35	1093	4,52	0,62	1602	38,10	5	3,8	99,51
0,36	1068	5,32	0,64	1544	40,42	6	1,8	99,72
0,37	1181	6,15	0,66	1486	42,66	7	1,0	99,82
0,38	1120	7	0,68	1427	44,81	8	0,59	99,86
0,39	1098	7,82	0,70	1369	45,88	10	0,24	0,94
0,40	1429	8,73	0,72	1314	48,86	15	0,048	99,98
0,41	1751	9,92	0,75	1235	51,69	20	0,015	99,99
0,42	1747	11,22	0,80	1109	56,02	50	$3,9 \times 10^{-4}$	100

В таблице E_λ – среднее значение поверхностной плотности монохроматического потока солнечного излучения в узкой полосе с центром, соответствующим длине волны $\lambda, \text{ВТ} / (\text{см}^2 \cdot \text{мкм})$; D_λ – доля солнечной постоянной, соответствующая длинам волн, меньшим $\lambda(\text{мкм})$; λ – длина волны (мкм).

Справка: область волн с $\lambda < 0,38 \text{ мкм}$ – ультрафиолетовое излучение; $0,38 < \lambda < 0,78 \text{ мкм}$ – видимый свет; $\lambda > 0,78 \text{ мкм}$ – инфракрасное излучение.

Длины волн видимого света заключены в пределах $\lambda_0 = 0,40 \div 0,76 \text{ мкм}$ ($4.000 - 7600 \text{ \AA}$). Эти значения относятся к распространению волн в вакууме. В веществе длины волн будут иными. В случае колебаний с частотой ν длина волны в вакууме равна $\lambda_0 = \frac{c}{\nu}$. Отношение скорости волны в вакууме к фазовой скорости ν в некоторой среде называется абсолютным показателем этой среды и обозначается буквой n , таким образом $n = \frac{c}{\nu}$, $\nu = \frac{c}{n}$, а длина волны $\lambda = \frac{\nu}{\nu} = \frac{c}{\nu} = \frac{\lambda_0}{n}$, т.е. длина волны в среде с показателями преломления n связана с длиной волны в вакууме соотношением:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Рассмотрим пример определения доли энергии внеземного солнечного излучения и величину этой энергии в ультрафиолетовой ($\lambda < 0,38 \text{ мкм}$), видимой ($0,38 \text{ мкм} < \lambda < 0,78 \text{ мкм}$) и инфракрасной ($\lambda > 0,78 \text{ мкм}$) областях спектра.

По таблице 1.2 доли D_λ , соответствующие длинам волн 0,38 и 0,78 мкм равны 0,07 и 0,5429 (последняя получена интерполяцией). Таким образом, доля D_λ в ультрафиолетовой области составляет 0,07, в видимой области $(0,5429 - 0,07) = 0,4729$, и в инфракрасной $(1,0 - 0,5429) = 0,4571$.

Умножая эти значения на величину солнечной постоянной 1353 Вт/м^2 и табулируя результаты, получаем:

Таблица 1.2.

Спектральное распределение солнечного излучения за пределами атмосферы

Интервал длин волн, мкм	0 - 0,38	0,38-0,78	0,78 - ∞
Доля энергии излучения в указанном интервале длин волн	0,07	0,4729	0,4571
Поверхностная плотность потока излучения в указанном интервале длин волн, Вт/м^2	95	640	618

1.4.3. Временные изменения внеземного излучения

На основе анализа данных по солнечному излучению установлено, что изменения интегрального излучения, испускаемого Солнцем, составляет не более $\pm 1,5\%$.

Для тепловых процессов, в которых используется энергия излучения в больших участках солнечного спектра, когда основная погрешность определяется пропускательной способностью атмосферы, излучение Солнца может считаться постоянным. В то же время изменения расстояния между Землёй и Солнцем приводят к изменениям плотности потока внеземного излучения в пределах $\pm 3\%$.

На рис. 3 представлена зависимость внеземного излучения от времени года (это – функция расстояния от Земли до Солнца).

В общем случае нецелесообразно начинать с определения внеземного излучения, а затем рассчитывать интенсивность и спектральное распределение энергии, ожидаемые на поверхности Земли. Для таких расчётов нужны соответствующие метеорологические данные, которые имеются очень редко и крайне неопределённые.

Поэтому, как правило приходится полагаться на измерения солнечного излучения непосредственно в месте расположения солнечных установок.

Весьма существенно на интенсивность солнечного излучения влияет ориентация приемной поверхности, которая зависит от географических координат участка Земной поверхности.

Для понимания процессов ослабления излучения в атмосфере и влияния ориентации приемной поверхности – рассмотрим физические процессы, определяющие влияние метеорологических и ориентационных факторов на интенсивность излучения у Земной поверхности.

Поскольку более достоверными всё же являются экспериментальные данные измерений солнечного излучения, будем рассматривать современные методы преобразования этих данных к виду, удобному для расчёта и анализа характеристик солнечных процессов.

Тема 2. Прямое и диффузное излучение Солнца. Угловые коэффициенты

*Цель: Изучение характеристик прямого и диффузного излучения Солнца
Перечень рассматриваемых вопросов:*

- 2.1. Изменение и ослабление прямого солнечного излучения
- 2.2. Основные факторы ослабления прямого солнечного излучения
- 2.3. Атмосферное поглощение солнечного излучения
- 2.4. Направление распространения прямого солнечного излучения
- 2.5. Диффузное излучение. Суммарная солнечная радиация
- 2.6. Примеры расчетов угловых коэффициентов

2.1. Изменение и ослабление прямого солнечного излучения

Основные определения

Приведем некоторые определения, которые используются при изучении солнечного излучения.

Прямое излучение (радиация) – поступающее от Солнца излучение без изменения направления.

Диффузное (или рассеянное) излучение – поступающее от Солнца излучение после изменения его направления вследствие отражения и рассеяния атмосферой.

Массой атмосферой m называется длина пути излучения в атмосфере. Длина пути по вертикали, отсчитываемая от уровня моря, принимается равной единице. Таким образом, на уровне моря, когда Солнце находится в зените (т.е. прямо над головой) $m = 1$ и $m = 2$ при зенитном угле $\theta_z = 60^\circ$ (θ_z - угол между направлением в Зенит и направлением на Солнце).

В общем случае справедливо соотношение:

$$m = \sec \theta_z \text{ или } m = \sec \theta_z = Co \sec \theta \dots, \text{ или}$$

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} = \frac{1}{\sin \theta} \quad (2.1)$$

Очевидно, при $m = 0$ будем иметь дело с неослабленной солнечной внеземной радиацией.

Основные потоки излучения на поверхности, находящейся на Земле или близко к ней играют важную роль в солнечных тепловых процессах и рассматриваются в двух спектральных диапазонах:

1) Солнечная или коротковолновая радиация. Это излучение, исходящее непосредственно от Солнца при температуре источника 5762 К в интервале длин волн 0,3 – 3 мкм.

2) Длинноволновая радиация. Излучение, исходящее от источника с температурой, близкой к нормальной температуре окружающей среды, и охватывающее все длины волн более 3 мкм.

2.2. Основные факторы ослабления прямого солнечного излучения

Солнечное излучение, падающее по нормали на поверхность Земли, подвергается изменениям вследствие:

- изменений в расстоянии между Землёй и Солнцем;
- атмосферного рассеяния излучения молекулами воздуха, водяного пара и пыли;
- атмосферного поглощения излучения кислородом, озоном, водой, углекислым газом.

Спектральное распределение солнечного излучения за пределами атмосферы.

В зависимости от длины волны рассеяние и поглощение составляющих солнечного спектра происходит различными путями и с различной интенсивностью.

Ультракоротковолновое излучение до 0,3мкм ультрафиолетовое, рентгеновское и другие поглощаются высоко в ионосфере озоном, кислородом и другими составляющими атмосферы. Большая часть ультрафиолетового излучения поглощается озоном. При длинах волн более 2,5 мкм более слабое внеземное излучение интенсивно поглощается углекислым газом и молекулами воды. Таким образом, только небольшая часть солнечной энергии достигает Земли.

С точки зрения применения солнечной энергии на Земле следует учитывать только излучение в интервале длин волн 0,29 – 2,5 мкм. Естественно, это излучение также проходит через атмосферу, подвергаясь изменениям вследствие рассеяния и поглощения атмосферой, но в меньшей степени, чем остальной спектр.

Рассеяние прямого солнечного излучения молекулами воздуха, водяным паром и частицами пыли приводит

- к образованию диффузного (рассеянного) излучения;
- к ослаблению прямого солнечного излучения.

Рассеянием солнечного излучения (ЭМИ довольно широкого диапазона) называется явление преобразования излучения веществом, сопровождающееся изменением направления распространения излучения.

Характер рассеяния зависит от соотношения между длиной волны λ излучения и размерами частиц, составляющих атмосферу.

Молекулы воздуха очень малы по сравнению с длинами волн излучения, преобладающими в спектре солнечной энергии. Система электронов, совершающих вынужденные колебания в атомах электрически изотропной частицы малого размера $\tau_0 \approx (0,1 \div 0,2) \lambda$ эквивалентна одному

колеблющемуся электрическому диполю. Диполе колеблется с частотой падающего излучения, а интенсивность излучаемого им излучения пропорциональна ω^4 . Для рассеянного излучения справедлив закон Рэлея (1899г.)

Интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны:

$$I \approx \lambda^{-4} \quad (2.2)$$

Это подтверждено экспериментально. Спектральная Пропускательная способность, связанная с атмосферным рассеянием может быть представлена в виде:

$$\tau_{a\lambda} \approx 10^{-0,00389\lambda^{-4}} \quad (2.3)$$

где λ в мкм, $p = 0,10132$ МПа, $m = 1$.

По мере увеличения размеров частиц неоднородностей среды, указанные выше закономерности рассеяния света постепенно искажаются, закон Рэлея нарушается.

Поэтому рассеянные частицами пыли, которые гораздо крупнее молекул воздуха, а концентрация и размеры их меняются во времени и в пространстве, оценить значительно труднее. Ориентировочная формула для пропускательной способности для этих частиц имеет вид:

$$\tau_{a\lambda} \approx 10^{-0,0353\lambda^{-0,75}} \quad (2.4)$$

где $m = 1$, средняя концентрация частиц пыли на уровне Земли принята равной 800 л/см^3 .

Рассеяние водяным паром (молекулы воды) при $m = 1$ может быть описано соотношением:

$$\tau_{\omega\lambda} \approx 10^{-0,0075\lambda^{-2}} \quad (2.5)$$

Результирующее влияние рассеяние на прямое солнечное излучение можно приближённо представить в виде:

$$\tau_{\lambda(s)} = [(\tau_{a\lambda})^{p/0,10132} \cdot (\tau_{d\lambda})^{d/800} \cdot (\tau_{\omega\lambda})^{\omega/20}]^m \quad (2.6)$$

где $\tau_{\lambda(s)}$ – спектральная пропускательная способность атмосферы относительно прямого излучения, соответствующая длине волны λ и учитывающая только рассеянные; p – полное давление МПа, d – концентрация частиц пыли на поверхности Земли л/см^3 ; ω – толщина слоя осадённой воды, мм; m – масса атмосферы. Заметим, что все эти параметры входят в уравнение (2.6) в виде показателей степени, однако их определение не всегда возможно (d , ω).

Согласно теории рассеяния Рэлея, излучение, соответствующее коротким длинам волн, рассеивается сильнее всего, следовательно, диффузное излучение приходится на область коротких длин волн.

Молекулярным рассеянием в атмосфере коротковолновой части видимого солнечного света объясняется голубой цвет неба (λ синего цвета – мала).

2.3. Атмосферное поглощение солнечного излучения

Если считать (что вполне справедливо) солнечное излучение – спектром электромагнитных излучений (волн) различных параметров (по λ , ω , A), то явления поглощения солнечного излучения имеет вполне определённую физическую формулировку.

Явление уменьшения энергии солнечного излучения (световой волны – в более узком смысле) при её распространении в оптически неоднородной среде (в веществе – в общем случае) происходящее вследствие преобразования энергии электромагнитного поля волны во внутреннюю энергию вещества или в энергию вторичного (фотолюминесцентного) излучения, имеющего другой спектральный состав и иные направления распространения, называется процессом поглощения.

Поглощение ЭМИ может вызывать нагревание вещества, возбуждение и ионизацию атомов или молекул, фотохимические реакции и другие процессы.

Ещё в XVIII в П. Бугер (1729 г.) экспериментально, а И. Ламберт (1760 г.) теоретически установили закон поглощения света, называемый законом Бугера – Ламберта:

Интенсивность плоской волны монохроматического света уменьшается по мере прохождения через поглощающую среду по экспоненциальному Закону:

$$I = I_0 e^{-a'x} \quad (2.7)$$

Здесь: I_0 и I - интенсивность света на входе и выходе из слоя среды толщиной x ;

a – натуральный показатель поглощения среды, который зависит от химической природы и состояния поглощающей среды и от длины волны λ .

Атмосферное поглощение излучения в спектре солнечной энергии происходит в основном за счёт озона – в ультрафиолетовой области спектра и за счёт полос водяного пара – в инфракрасной области. Практически коротковолновое излучение с длиной волны $\lambda < 0,29$ мкм почти полностью поглощается.

Для типичного содержания озона в атмосфере в табл. 2.1 представлены значения спектральной пропускательной способности атмосферы, связанной с присутствием в ней озона ($\tau_{o\lambda}$).

Водяной пар сильно поглощает в полосах поглощения инфракрасной области спектра. В работе [1] представлено изменение пропускательной способности атмосферы, вследствие поглощения водяным паром и углекислым газом в зависимости от длины волны λ .

Таблица 2.1

Пропускательная способность атмосферы относительно ультрафиолетового излучения для слоя озона толщиной 2,5 мм при стандартных условиях.

λ мкм	$\tau_{o\lambda}$
0,29	0
0,30	0,1
0,31	0,5
0,33	0,9
0,35	1,00

При значениях $\lambda > 2,3$ мкм пропускательная способность атмосферы очень мала вследствие поглощения водяным паром и углекислым газом, а энергия в спектре внеземного солнечного излучения составляет менее 5% полной энергии солнечного спектра, так что энергия излучения, дошедшего до поверхности Земли, очень мала (при $\lambda > 2,3$ мкм).

Как и в случае рассеяния, пропускательные способности, связанные с поглощением, могут быть объединены и результирующая спектральная пропускательная способность относительно прямого излучения может быть записана в виде:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{\lambda(s)} \cdot \tau_{o\lambda} \cdot \tau_{\omega\lambda} \quad (2.8)$$

где $\tau_{\lambda(s)}$ – спектральная пропускательная способность атмосферы относительно прямого излучения, учитывающая только рассеяние; $\tau_{o\lambda}$ и $\tau_{\omega\lambda}$ – поглощение озоном, водой, углекислым газом.

2.4. Направление распространения прямого солнечного излучения

Прямое излучение (радиация) – излучение, поступающее от Солнца без изменения направления. Взаимное положение плоскости, определённым образом ориентированной относительно Земли в какой-либо момент времени, и прямого солнечного излучения, т.е. положение Солнца относительно этой плоскости можно определить с помощью ряда углов:

φ - широта местности (положительная для северного полушария);

δ - склонение, т.е. угловое положение Солнца в солнечный полдень относительно плоскости экватора (положительное для северного полушария);

S - угол между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной поверхностью в заданной географической точке (т.е. наклон).

γ - азимутальный угол плоскости, т.е. отклонение нормали к плоскости от местного меридиана (за начало отсчёта принимается южное направление, отклонение к востоку считается положительными, к западу – отрицательным;

ω – часовой угол, равный нулю в солнечный полдень, каждый час соответствует 15° долготы, причём значение часового угла до полудня считается положительными, а после полудня – отрицательными, (например, $\omega = +15$ в 11.00 и $\omega = -37,5$ в 14.30).

Учитывает взаимное положение плоскости и Солнца в зависимости от времени суток.

θ - угол падения прямого солнечного излучения, измеряемый между направлением излучения и нормалью к поверхности.

Склонение Солнца δ можно определить по справочнику, или по приближённым формулам:

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[360 \frac{284 + n}{365} \right] \quad (2.9)$$

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[2\pi \frac{n - 81}{265} \right] \quad (2.10)$$

где 23,45 – максимальное склонение Солнца (δ_{max}), n - порядковый номер дня года.

Соотношение между θ и другими углами определяется по правилам сферической тригонометрии и в общем случае имеет вид:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos S - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos S \cdot \cos \omega + \\ & + \cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \sin S \cdot \cos \gamma \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin S \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \end{aligned} \quad (2.11)$$

Для упрощения расчётов можно ввести дополнительные углы:

θ_z – зенитный угол, т.е. угол между направлением на Солнце и вертикалью;

$\alpha = 90^\circ - \theta_z$ – высота солнцестояния, т.е. угол между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью.

Для фиксированных плоских поверхностей, обращённых к экватору (на юг), $\gamma = 0$, для горизонтальных поверхностей угол $S = 0^\circ$, тогда зенитный угол:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \quad (2.12)$$

Для угла падения лучей на поверхности, обращённые к северу или югу, могут быть получены удобные выражения, если учесть, что для поверхности с углом наклона S к северу или югу (при $\gamma = 0$) справедливы те же соотношения, что и для горизонтальной поверхности, расположенной на воображаемой широте $(\varphi - S)$.

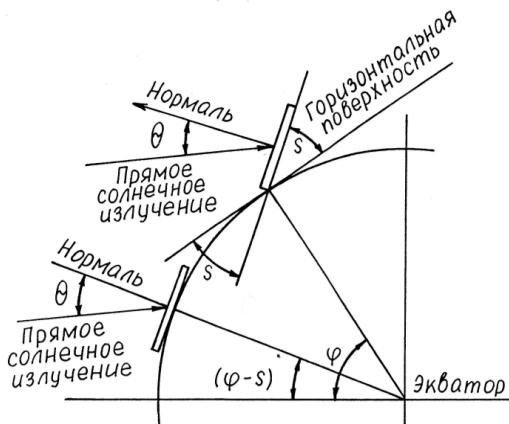


Рис. 2.1. К определению углов $S, \Theta, \varphi, (\varphi - S)$.

2.5. Диффузное излучение. Суммарная солнечная радиация

Вопрос о направлении диффузного излучения более сложен, т.к. это излучение (по определению) приходит от различных участков небосвода зависит от состояния атмосферы. Наиболее точные данные по соотношению прямого и диффузного излучений содержат метеорологические справочники для различных географических районов мира. При отсутствии этих данных представляется возможным использовать приближённые методы [1].

В практике проектирования УСГВ применяются средние месячные значения дневных приходов солнечной радиации на горизонтальную ($S = 0$) поверхность, которые можно найти в справочной литературе. Как правило коллектора устанавливаются стационарно с фиксированным оптимальным углом наклона плоскости коллектора $S = \varphi \pm 15^\circ$, где φ - широта места установки коллектора.

Приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность I_T равен $I_T = R \cdot I_0$, где I_0 - среднемесячный дневной приход суммарной радиации на горизонтальную поверхность; $\bar{R}$ - отношение дневных приходов суммарной радиации на наклонную и горизонтальную поверхность, или угловой коэффициент для суммарной солнечной радиации. Чтобы определить R , нужно знать составляющие солнечной радиации: прямую I_S , диффузную I_d и отражённую от поверхности Земли. Коэффициент R можно представить в виде:

$$R = \left(1 - \frac{I_d}{I}\right) R_S + \frac{I_d}{I} \cdot \frac{1 + \cos S}{2} + \rho \frac{1 - \cos S}{2} \quad (2.13)$$

где I_d - средне месячный дневной приход диффузной радиации на горизонтальную поверхность;

R_S - угловой коэффициент для прямой солнечной радиации:

$$R_S = \frac{I_T}{I_0} = \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_Z} \quad (2.14)$$

где θ_T - угол падения солнечного излучения на наклонную плоскость;

θ_Z - зенитный угол (падения излучения на горизонтальную плоскость);

S - угол наклона коллектора к горизонту;

ρ - отражательная способность Земли (0,2 – летом; 0,7 – зимой, при наличии снегового покрова).

Вариант раздельного расчёта:

$$I_T = I_S R_S + I_d R_d$$

где I_S, I_d - интенсивности излучения прямого и диффузного;

R_S, R_d - угловые коэффициенты отдельно для прямого и диффузного излучений:

$$R_S = \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_Z} \text{ или по справочным данным;}$$

$$R_d = \cos^2 \frac{S}{2} \text{ где } S - \text{угол наклона площадки.}$$

При внешней кажущейся сложности вычисления по этой формуле не слишком сложны т.к. все исходные данные (углы) как правило, известны.

Далее рассмотрим примеры расчетов угловых коэффициентов для горизонтальных и наклонных площадок.

2.6. Примеры расчетов угловых коэффициентов

Пример 1.

Определить угол падения прямого солнечного излучения на поверхность гелиоприёмника, расположенную в городе «М» 15 февраля в 14.30, если поверхность наклонена под углом 45^0 к горизонту и ориентирована под углом 15^0 к западу от направления на юг.

При этих условиях склонение, вычисленное по выше приведенным формулам равно $\delta = -140^0$; часовой угол $\omega = -37,5^0$, азимутальный угол поверхности $\gamma = -15^0$. С учётом того, что угол наклона поверхности составляет 45^0 к горизонту и что «М» расположен на 43^0 с.ш. соотношение () приобретает вид:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin(-14) \cdot \sin 43 \cdot \cos 45 - \sin(-14) \cdot \cos 43 \cdot \sin 45 \cdot \cos(-15) + \\ & + \cos(-14) \cdot \cos 43 \cdot \cos 45 \cdot \cos(-37,5) + \cos(-14) \cdot \sin 43 \cdot \sin 45 \cdot \\ & \cdot \cos(-15) \cdot \cos(-37,5) + \cos(-14) \cdot \sin 45 \cdot \sin(-15) \cdot \sin(-37,5) = 0,8689 \end{aligned}$$

и угол $\theta = 30^0$

Иногда используются дополнительные углы:

θ_z - зенитный угол, т.е. угол между направлением на Солнце и вертикалью.

$\alpha = 90^0 - \theta_z$ - высота солнцестояния, т.е. угол между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью.

Во многих случаях соотношение (2.11) существенно упрощается. Например, для фиксированных жёстких коллекторов обращённых к экватору (на юг) $\gamma = 0$ (азимутальный угол), последний член равен нулю. Для вертикальных поверхностей $S = 90^0$, тогда первый и третий члены становятся равными нулю. Для горизонтальных поверхностей, когда $S = 0^0$, в соотношении остаются только первый и третий члены, а угол падения лучей на поверхность (т.е. зенитный угол Солнца θ_z) становится равным

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos \delta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega \quad (2.15)$$

Очевидно, зенитный угол Солнца однозначно определяет направление прямого излучения.

Пример 2.

Определить зенитный угол Солнца в городе «М» 15 февраля в 14.30. Остальные условия – в соответствии с примером 1.

В этом случае соотношение (2.11) имеет вид:

$$\begin{aligned} \cos \theta_z = & \sin(-14) \cdot \sin 43 + \cos(-14) \cdot \cos 43 \cdot \cos(-37,5) \\ \cos \theta_z = & 0,398; \quad \theta_z = 66^0 \end{aligned}$$

Для угла падения лучей на поверхности, обращённые к северу или югу, могут быть получены удобные выражения, если учесть, что для поверхности с углом наклона S к северу или югу (т.е. $\gamma = 0$) справедливы те же соотношения, что и для горизонтальной поверхности, расположенной на воображаемой широте $(\varphi - S)$ и взаимное положение углов.

Преобразуя соотношение получаем:

$$\cos \theta_T = \cos(\varphi - S) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\varphi - S) \cdot \sin \delta \dots \quad (2.16)$$

Следует отметить, что угол наклона δ измеряется между горизонтальной поверхностью и плоскостью рассматриваемой поверхности и считается положительным, когда поверхность обращена к экватору.

Значения азимутального угла Солнца γ и высоты солнцестояния табулированы в зависимости от широты местности, склонения и часового угла. Кроме таблиц существуют номограммы для определения этих углов.

Пример 3.

Для горизонтального положения гелиоколлектора определить зенитный угол Солнца в г. Севастополе 2 февраля в 15.00 часов.

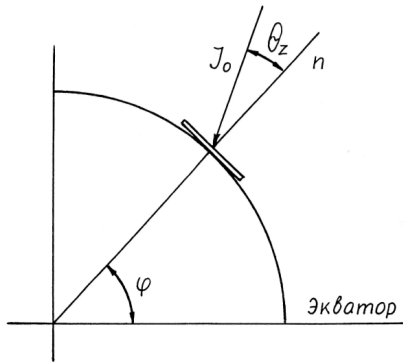


Рис. 3.2. К определению зенитного угла θ_Z

Для зенитного угла θ_Z формула определения направления прямого солнечного излучения имеет вид:

$$\cos \theta_Z = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi.$$

Выполним расчёт угла δ по формуле Купера

$$\delta = 23,45 \cdot \sin \left[360 \frac{284 + n}{365} \right],$$

где n - порядковый номер дня в году (33), тогда

$$\delta = 23,45 \cdot \sin 312,6 = -23,45 \cdot 0,73 = -17,2^\circ, \text{ а } \cos \delta = 0,95.$$

Для г. Севастополя $\varphi = 45^\circ$, $\cos \varphi = 0,707$; часовой угол ω в 15.00:
 $\omega = -45^\circ$.

Подставляя значение углов, получим:

$$\cos \theta_Z = 0,95 \cdot 0,707 \cdot 0,707 + (-0,29) \cdot 0,707 = 0,269.$$

Зенитный угол: $\theta_Z = 74^\circ$.

Пример 4.

Для тех же условий определить угол падения солнечных лучей на плоскость гелиоколлектора, расположенного под углом $S = 30^\circ$ к горизонту.

Рассматриваем вариант замены угла широты φ на условную широту $(\varphi - S)$, тогда угол $\theta_T = \theta_Z$ для широты $(\varphi - S)$ (см рис. 1):

$$\cos \theta_T = \cos(\varphi - S) \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin(\varphi - S).$$

В этой формуле все значения углов известны из предыдущей задачи, $\varphi - S = 45^\circ$; $\cos(\varphi - S) = 0,96$; $\sin(\varphi - S) = 0,25$, тогда $\cos \theta_T = 0,57$, а угол падения прямого излучения $\theta_T = 52^\circ$.

Угловой коэффициент прямого солнечного излучения для принятых условий:

$$R_S = \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_Z} = \frac{0,57}{0,269} = 2,16.$$

Тема 3. Солнечное излучение у поверхности Земли

*Цель: Изучение характеристик прямого и диффузного излучения Солнца
Перечень рассматриваемых вопросов:*

- 3.1. Диффузное излучение на поверхности Земли
- 3.2. Плотность потока солнечной радиации на горизонтальную и наклонную поверхность
- 3.3. Методы измерения плотности потока солнечной радиации
 - 3.3.1. Измерения плотности потока солнечной радиации
 - 3.3.2. Приборы для измерения плотности потока солнечной радиации

3.1. Диффузное излучение на поверхности Земли

Физическая природа диффузного излучения.

Выше было установлено, что с точки зрения применения солнечной энергии следует учитывать только излучение в интервале длин волн $0,29 \div 2,5$ мкм. Это солнечное излучение проходит через атмосферу, подвергаясь изменениям вследствие рассеяния и поглощения атмосферой.

Рассеяние солнечного излучения молекулами воздуха, водяным паром и частицами пыли приводит, как известно, к ослаблению прямого солнечного излучения и к излучению направления вторичного солнечного излучения. Часть рассеянного излучения достигает поверхности Земли. Таким образом, всегда, даже в периоды очень чистого неба, имеет место диффузное излучение. Напомним, что диффузным (или рассеянным) излучением называется поступающее от Солнца излучение после изменения его направления вследствие отражения и рассеяния атмосферой.

В периоды сплошной облачности солнечное излучение почти полностью рассеивается в облаках на частицах пыли и воды, тогда всё излучение, достигающее Земли, будет диффузным. Таким образом, источником диффузного излучения является весь небесный свод.

Для оценки интенсивности излучения (диффузного), спектрального распределения или распределения диффузного излучения по различным направлениям у поверхности Земли необходимо располагать достаточно надёжными данными о состоянии атмосферы и выполнить довольно сложные расчёты.

Например, вопрос о направлении диффузного излучения более сложен, чем для прямого излучения, так как это излучение (по определению) приходит от различных участков небосвода, а не от Солнца. Распределение источников диффузного излучения по небосводу весьма неравномерно и зависит от состояния атмосферы. Метеорологическая информация неопределенна и труднодоступна, поэтому при проектировании солнечных установок, либо используют данные измерений солнечной радиации (прямой и диффузной) полученные в предполагаемом месте эксплуатации установки или в подобной местности, либо оценивают величину солнечной радиации на основе соответствующих метеорологических данных.

С точки зрения практических инженерных вопросов определения доли диффузного излучения немаловажно, т.к. в солнечных установках используется как прямая так и рассеянная составляющие солнечной радиации.

Некоторые подходы к оценке солнечной диффузной составляющей

Плоскопанельные солнечные коллекторы поглощают как прямую, так и рассеянную составляющие солнечной радиации.

Статистические экспериментальные данные по измерению излучения в различных регионах как правило относятся к случаю прихода радиации на горизонтальную поверхность (измеренную или рассчитанную). Практически приходится иметь дело с поверхностями, расположенными под углом S к горизонтали. Необходимы методы пересчёта исходных данных по плотности потока излучения $\left(I \cdot \frac{Bm}{m^2}\right)$ для горизонтальных плоскостей на плотность потока излучения на наклонную плоскость.

С достаточной степенью точности это можно сделать для прямой и рассеянной составляющих радиации участка небосвода, включающего Солнце.

3.2. Плотность потока солнечной радиации на горизонтальную и наклонную поверхность

Ориентационная зависимость эффективности приёмных поверхностей.

Большая часть данных по измерению солнечной радиации получена для условий её прихода на горизонтальную поверхность, однако часто требуется оценить влияние ориентации приёмной поверхности. Ранее мы рассмотрели влияние ориентации поверхности в течение коротких промежутков времени. Напомним основные положения учёта влияния наклонных приёмных поверхностей. Сущность метода заключается в пересчёте данных по часовому приходу радиации на горизонтальную поверхность (измеренную или рассчитанную по известным методикам) на данные по приходу радиации на наклонную поверхность. С достаточной степенью точности это можно сделать для прямой и рассеянной составляющих радиации участка небосвода, включающего Солнце.

Влияние ориентации приёмной поверхности на величину солнечной радиации для длительного времени.

Методы, описанные выше, позволяют определить влияние ориентации поверхности в течении относительно коротких промежутков времени. Для более продолжительных периодов времени в местностях, где не происходит заметных сезонных изменений атмосферных условий, влияние ориентации оценивается на основе расчёта прихода прямой радиации.

В [1] приведены результаты расчёта относительной годовой облучённости поверхностей, обращённых к экватору с различными углами

наклона. По анализу этих данных получается, что максимальная годовая сумма прямой радиации достигается при наклоне поверхности $0,9\varphi$. К подобным выводам пришли и другие авторы, т.е. для обеспечения максимального поглощения энергии за год приёмная поверхность должна быть ориентирована на экватор с наклоном, приблизительно равным широте ($S = \varphi$), причём для зимнего периода наклон должен составлять $\sim (\varphi + 10^0)$, а для летнего периода $\sim (\varphi - 10^0)$. Отклонение в несколько градусов от оптимальной величины S незначительно сказывается на величине суммарной радиации за длительный период времени.

Морзе и Кварнеки рассмотрели вопрос о влиянии азимутального угла наклона поверхности на суммарный годовой приход прямой радиации, т.е. о влиянии ориентации приемной поверхности на запад или восток от южного направления (или от северного – в южном полушарии). Они рассчитали относительный годовой приход радиации на поверхности, наклонённые под углами S , равными $0,9\varphi$, в функции широты φ и азимутального угла наклона поверхности γ . Эти данные приведены в []. Как видно из графика, при фиксированном угле S влияние γ увеличивается с широтой, однако это влияние для $\gamma = 22,5^0$ по сравнению с $\gamma = 0$ для широт вплоть до 45^0 выражается в изменении относительной годовой облучённости не более чем на 2%. Приведённые выше графики относительных годовых сумм радиации не учитывают влияние азимутального угла γ на суточное распределение радиации. Каждые 15^0 азимутального угла вызывают сдвиг суточного распределения радиации примерно на 1 ч. в сторону утренних часов, если угол γ положителен, и в сторону послеполуденного времени, если γ - отрицателен.

Рассчитанные значения годовых сумм солнечной радиации учитывают только прямую радиацию, поэтому при дополнительном учёте рассеянной радиации влияние ориентации поверхности может существенно измениться. В настоящее время имеется разнообразная информация, позволяющая сделать более полные обобщения, чем те, которые основываются на рассмотрении только прямой солнечной радиации.

Перспективным с точки зрения эффективности является радиация движения принимающих поверхностей по заданному закону (графику) – отслеживание максимального (с точки зрения потока радиации) направление (на Солнце).

Эта задача была решена группой американских учёных для одного из регионов США. Для некоторых вариантов подвижной и неподвижной ориентации поверхностей предоставлены результаты в таблице 3.1.

Расчётное влияние ориентации приемной поверхности на годовой приход прямой солнечной радиации на широте 35^0 .

Таблица 3.1.

Расчётное влияние ориентации приемной поверхности

Ориентация поверхности (способы слежения)	Прямая радиация $10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2}$
Закреплённая горизонтально	5,34
Закреплённая с наклоном $S = 35^0$ (к югу)	6,19
Непрерывное слежение относительно горизонтальной северо–южной оси.	7,43
Непрерывное слежение относительно оси, параллельной земной.	8,14
Непрерывное слежение относительно двух осей для обеспечения нормального падения солнечного излучения	8,38

Определение гарантированного поступления солнечной энергии.

Количественная оценка солнечной энергии – одна из важнейших задач практической гелиотехники. Ещё в 1884 году российский климатолог А.И. Воейков поставил задачу: создать приходо–расходную книгу солнечной энергии, поступающей на земную поверхность и в атмосферу.

Во многих странах мира создана сеть актинометрических станций, организованы систематические наблюдения и на этой основе и данных других физических исследований изучается радиационный климат страны или региона. Актинометрические станции передают сведения о всех составляющих радиационного баланса в главный геофизический центр, где производится обработка и усреднение показателей солнечной радиации за период наблюдений. Основными актинометрическими величинами, используемыми при гелиоэнергетических расчётах, являются прямая и суммарная солнечная радиация для горизонтальной поверхности. Измеряются они пиргелиометрами и пиранометрами.

Для оценочных расчётов гарантированного поступления солнечной энергии на территорию Крыма можно использовать карты, позволяющие путём интерполяции получать для любой точки страны месячные и годовые интенсивности суммарной радиации на горизонтальную поверхность. Для перехода на наклонные поверхности необходимо знать значение угловых коэффициентов R_g , на которые нужно умножать интенсивность суммарной радиации, приходящей на горизонтальную поверхность. Значение R_g можно определить по таблицам в зависимости от K_T - коэффициента облачности; φ - географической широты и S – угла наклона солнечного коллектора.

Обработка обширного экспериментального, картографического и табличного материалов вероятно – статистическими методами показала, что распределение солнечной радиации по территории юга России носит зональный характер. На этом основании разработаны и созданы карты, на которых указаны районы с заранее заданными широтно–долготными границами.

Для ранжирования районов по потенциалам солнечной радиации был выбран комплекс показателей, которые отражают средний многолетний режим, изменчивость, временную структуру радиации, а также особенности суточного хода. В комплекс были включены пять показателей.

Первый показатель. Из трёх видов коротковолновой радиации – прямая, рассеянная и суммарная – для районирования выбрана суммарная радиация, т.е. она является основной составляющей радиационного баланса.

Второй показатель. При оценке гелиоресурсов важно учитывать процентное соотношение прямой и рассеянной радиации в общей сумме суммарной радиации. Прямая радиация может преобразовываться в тепловую или электрическую (при фото – или термопреобразовании) энергию.

При равных суммах суммарной радиации в двух районах преимущество в отношении гелиоресурсов отдаётся тому району, в котором большая доля приходится на прямую радиацию. В качестве второго показателя взято отношение годовой суммы прямой радиации на горизонтальную поверхность к годовой сумме суммарной радиации для каждого района.

Третий показатель учитывает внутримесячную изменчивость суточных сумм суммарной радиации (повторяемости).

Четвёртый показатель учитывает особенность суточного хода изменения энергетического уровня радиации (выбрано число часов суммарной радиации со средней часовой мощностью более $0,6 \text{ кВт/м}^2$ в годовой совокупности многолетних суточных ходов).

Пятый показатель определяет относительную характеристику межгодовой изменчивости (коэффициент вариации годовых сумм суммарной радиации) и отражает степень устойчивости радиационного режима.

3.3. Методы измерения плотности потока солнечной радиации

Актинометрические приборы и измерения плотности потока солнечной радиации.

Расчёты уровня солнечной радиации в наземных условиях с учётом ослабления внеатмосферной радиации требует наличия детальной метеорологической информации и большого объёма достаточно сложных вычислений.

Вместо этого при проектировании солнечных установок либо используют данные измерений солнечной радиации, полученные в предполагаемом месте эксплуатации установки или в подобной местности,

либо оценивают величину солнечной радиации на основе соответствующих метеорологических данных.

Практическое использование данных изменений солнечной радиации возможно различными способами, каждый из которых обладает определённой степенью приближения.

1. Данные по солнечной радиации за часы и сутки (плотность потока излучения) усредняются за определённый промежуток времени, например, за месяц. Это осреднение даёт возможность оценить среднюю эффективность процесса. Некорректность такого подхода связана с тем, что эффективность многих процессов в солнечных установках не линейно зависит от солнечной радиации и поэтому использование средних значений в этих случаях может привести к значительным ошибкам.

2. Экспериментально полученные часовые или суточные результаты измерений солнечной радиации в данной местности используются для оценки ожидаемой эффективности процесса. Этот путь является основным подходом при моделировании процессов, мы его подробно рассмотрим в нашем курсе.

3. Третий подход заключается в обработке данных измерений солнечной радиации с помощью статистических методов для представления их в более удобном виде и в использовании результирующих временных распределений для предсказания эффективности процессов преобразования энергии.

3.3.1. Измерения плотности потока солнечной радиации

Напомним некоторые физические определения, необходимые для интерпретации экспериментальных данных:

Потоком излучения энергии dE_ω сквозь малую площадку dS называется отношение энергии dW , передаваемой через эту площадку за малый промежуток времени, к его длительности dt

$$dE_\omega = \frac{dW}{dt} \cdot \left[\frac{\text{Дж}}{c} \right] \quad (3.1)$$

Интенсивность потока излучения

Любая нагретая поверхность или источник излучения излучает энергию во всех направлениях, однако часто необходимо описать направленные характеристики поля излучения в пространстве. Для этой цели используется интенсивность излучения, которая определяется как энергия излучения, проходящего в единицу времени через единицу площади воображаемой плоскости в единице телесного угла, ось которого перпендикулярна этой воображаемой плоскости.

Если ΔE – энергия излучения, проходящего в единицу времени через площадку ΔS в пределах угла $\Delta\omega$, то интенсивность излучения τ выражается формулой:

$$I = \lim \frac{\Delta E}{\Delta S \cdot \Delta \omega} \cdot \left[\frac{Дж}{м^2 ср} \right] \quad (3.2)$$

Интенсивность I характеризуется не только величиной, но и направлением, может считаться векторной величиной. Заметим, что для принятой воображаемой плоскости в пространстве можно рассматривать два противоположно направленных вектора интенсивности I^+ и I^- .

Плотность потока излучения

С понятием интенсивности излучения связано понятие плотности потока излучения, которая определяется как энергия излучения, проходящего в единицу времени через единицу площади воображаемой плоскости во всех направлениях по одну сторону от этой плоскости. Заметим, что одно из отличий интенсивности от плотности потока состоит в том, что в первом случае рассматриваемая элементарная площадка перпендикулярна направлению распространения излучения, а во втором лежит в плоскости, образующей основание полусферы, через которую проходит излучение.

Модуль вектора плотности потока энергии равен отношению потока энергии ΔE_ω на площадку $dA_\perp = dA \cdot \cos \theta$ - к проекции этой площадки dA на плоскость, перпендикулярную направлению переноса энергии излучения:

$$\Delta q = \frac{\Delta E_\omega}{\Delta A_\perp} = \frac{\Delta E_\omega}{\Delta A \cdot \cos \theta} \left[\frac{Вт}{м^2} \right] \quad (3.3)$$

Рассмотрим, более общий случай. Пусть элементарная площадка ΔA лежит на воображаемой плоскости, являющейся основанием полусферы радиусом r (рис.3.1, 3.2). Энергия излучения, испускаемого площадкой ΔA и проходящего в единицу времени через площадку $\Delta A'$, лежащую на поверхности полусферы, приблизительно равна:

$$\Delta Q = I \cdot \Delta A \cdot \cos \theta \cdot \frac{\Delta A'}{r^2}$$

где $\frac{\Delta A'}{r^2}$ - телесный угол между ΔA и $\Delta A'$, $\Delta A \cdot \cos \theta$ - площадка в направлении вектора интенсивности.

Плотность потока энергии в единичном телесном угле в направлении θ , φ определяется в виде:

$$\Delta q = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta A} = I \Delta A \cdot \cos \theta \cdot \frac{\Delta A'}{r^2} \cdot \frac{1}{\Delta A} = I \cos \theta \frac{\Delta A'}{r^2} \quad (3.4)$$

Суммирую все Δq по полусфере, определим поток излучения

$$Q = \int_{(S)} \Delta q \cdot dS \quad (3.5)$$

Площадь элементарной площадки на поверхности полусферы $(\Delta A')$ можно выразить через углы θ и φ , так что:

$$q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi \quad (3.6)$$

Обозначим $\mu = \cos \theta$, тогда

$$q = \int_0^{2\pi} \int_0^1 I \cdot \mu d\mu \cdot d\varphi \quad (3.7)$$

Следует отметить два важных обстоятельства, связанных с плотностью потока излучения. Во-первых, плотность потока излучения в общем случае является функцией ориентации выбранной воображаемой плотности.

Во-вторых, плотность потока излучения имеет два значения, соответствующие одному из двух возможных направлений нормали к воображаемой плоскости. Когда необходимо указать, какое именно из двух возможных значений плотности потока излучения рассматривается, можно использовать индексы (+) или (-) предварительно условившись, какое направление считать положительным и какое – отрицательным.

3.3.2. Приборы для измерения плотности потока солнечной радиации

В практической метеорологии и гелиотехнике используется достаточно разнообразное техническое оснащение (приборы) для измерений потоков солнечной радиации. В частности, можно выделить основные типы приборов, применяемых в гелиотехнике:

1. Пиргелиометры – приборы, которые используют фиксированный датчик для измерения потока солнечной радиации, исходящей от небольшого участка небосвода, включающего Солнце, при нормальном падении (т.е. прямой радиации).

2. Пиранометры – приборы для измерения интегральной полусферической солнечной (прямой и рассеянной) радиации, облучающей, как правило, горизонтальную поверхность, Защищённый от прямой радиации затеняющим экраном прибор будет измерять поток рассеянной (диффузной) радиации.

Кроме указанных, можно встретить такие названия приборов, как «соляриметр» и «актинометр». Эти приборы можно отнести по типу к пиранометрам.

Основные принципы актинометрических измерений.

В большинстве случаев радиационные измерения состоят в определении с помощью пиранометра плотности потока суммарной, солнечной радиации (прямой и рассеянной), которая выражается в единицу энергии, поступающей в единицу времени на единицу горизонтально расположенной поверхности.

Проводятся также измерения плотности потока прямой радиации с помощью пиргелиометра, который реагирует на солнечное излучение, исходящее от очень небольшого участка небосвода, включающего Солнце.

В общем случае, приборы для измерения потоков лучистой энергии в атмосфере и гидросфере называются актинометры.

Наиболее широко в гелиотехнике применяются приборы, основанные на термоэлектрических приёмниках излучений.

К термоэлектрическим приёмникам излучений относятся тепловые приёмники, у которых энергия фотонов, преобразованная в тепловую, регистрируется термоэлементом – термопарой или батареей термопар.

Малая скорость тепловых процессов обеспечивает интегрирование квантов энергии, доставляемых фотонами приемной площадке. Степень их поглощения определяется свойствами площадки, в первую очередь её коэффициентом поглощения, который в широком интервале длин волн несущественно зависит от частоты излучения. Термоэлектрические приемники являются неселективными, и это основное их преимущество перед иными типами приемников. Термоэлектрические приёмники широко применяются в инфракрасной спектроскопии, при определении энергии и мощности лазерных излучателей, в пирометрии, при определении рентгеновского и гамма-излучений, в приборах для измерения излучений Солнца и Земли, в космической и СВЧ – технике, в метрологии.

В дальнейшем нас будет интересовать применение термоэлементов в актинометрических приборах.

Одним из важнейших элементов измерителей солнечной радиации являются приемные площадки, являющиеся по существу, поглощающей поверхностью термоэлектрических приёмников. Для улучшения спектральной чувствительности принимаются меры по увеличению коэффициента, поглощения поверхностей приемных площадок – используют различные чернящие покрытия и применяют коллекторы энергии сложной конфигурации.

Наиболее широко применяют окисные плёнки нихрома, никеля и алюминия, чернение камфорной сажей, покрытия чернящими красками, лаками на основе сажи (лак Парсона) и покрытия металлической чернью. Эти покрытия изготавливаются испарением золота, платины, сурьмы или висмута в инертной атмосфере (аргон или азот) при давлении 1 – 10 мм. рт.ст.

Рассмотрим принцип работы и устройство основных типов актинометрических приборов, применяющих в метеорологии для измерения радиации.

Пиргелиометры используют для измерения прямой солнечной радиации. К числу абсолютных (компенсационных) относятся приборы, выполненные по схеме Ангстрема, прибор содержит две плоские приемные площадки из манганина, одна поверхность площадок черненная, к центру другой присоединены спаи дифференциальной медь константовой термопары. Приемные площадки идентичные, при их освещении солнечными лучами ЭДС дифференциальной термопары равна нулю. Измерение

мощности потока излучения $\left(\frac{\text{Дж}}{с}, \text{Вт}\right)$ производится при облучении одной из площадок, через другую пропускают электрический ток, тепловое действие которого эквивалентно облучению. При равенстве температур на площадках (по записям на регистрирующих приборах) электрическая мощность равна мощности излучения. Измерительные площадки помещены в трубчатый корпус с диафрагмами для защиты от посторонней радиации и ветра. Приборы снабжены шкалой пересчёта полученных данных в плотность потока $(\text{Вт}/\text{м}^2)$.

В пиргелиометре конструкции Бойко используется одна диафрагма, основание с приемными площадками вращается в корпусе; количество терэлементов удвоено.

Для измерения солнечной радиации используются также актинометры с термобатареями из ленточных или проволочных термопар. Термоэлектрические приемники содержат проволочные или ленточные ветви термопар, выполненные из хромель-копеля или хромель-алюмеля. Центральная часть батареи черненная. Чувствительность приемников порядка $0,2 - 0,5 \frac{В}{Вм}$. Используют также приемники, у которых ветви термопар являются приемными поверхностями. Термобатареи изготавливаются сваркой лент хромеля и копеля, манганина и константана или гальваническим путём (медные покрытия на константановой ленте). В центре батареи устанавливается приемная площадка – серебряный черненный диск, наружные спаи термостатированы корпусом прибора. Интенсивность радиации определяются по развиваемой термобатареей ЭДС, приборы предварительно градуируются. К таким приборам относятся актинометры Савинова конструкции Янишевского, Линке-Файснера с ленточными термопарами, Молля –Горчинского, Эппля и др.

Пиранометры определяют плотность потока суммарной солнечной радиации (прямой и рассеянной), которая выражается в единицах энергии, поступающей в единицу времени на единицу горизонтально расположенной поверхности.

Принцип действия большинства пиранометров основан на определении разности температур черных поверхностей (которые поглощают большую часть солнечного излучения) и белых поверхностей (которые отражают большую часть солнечного излучения) с помощью термоэлементов.

Защищенные от ветра и компенсирующие колебания температуры окружающей среды термоэлементы дают сигнал (в милливольтх), который легко обнаружить, записать и проинтегрировать во времени. Вместо диафрагмированного отверстия в пиргелиометрах горизонтальная приемная площадка (термоэлектрические приемники) помещается в полусферическую стеклянную оболочку. Пиранометр Эппли или Киппа состоит из концентрических серебряных колец толщиной 0,25 мм., покрытых черным и белым покрытием соответственно, с 10 или 50 термопарами для определения

разности температур между черным и белым кольцами. В более поздних моделях используются клинья, уложенные в кольцо с чередованием белых и черных покрытий. Диски или клинья помещаются в полусферическую стеклянную оболочку. Пиранометры комбинируются в горизонтальном положении.

Пиранометр (соляриметр) Молля – Горчинского содержит термоэлементы, на горячие спаи которых падает солнечное излучение, а холодные спаи экранированы от попадания на них излучения.

Другой тип пиранометра (пиранометр Робича) основан на различном расширении биметаллических элементов, облучаемым Солнцем. К достоинствам этого прибора следует отнести возможность прямой механической связи с записывающим устройством без затрат дополнительной мощности.

Имеются также пиранометры, основанные на фотоэлектрических детекторах (солнечных элементах) – типа соляриметра Йемета.

Распространенным преобразователями солнечного излучения является кремниевые солнечные элементы (батареи), на основе сульфида кадмия и селена.

Фототок кремниевых солнечных элементов (приблизительно равный току короткого замыкания при нормальных уровнях излучения) линейно зависит от падающего солнечного излучения. Недостаток этих элементов заключается в том, что их спектральная чувствительность нелинейна, что необходимо учитывать при калибровке прибора. Кроме того, калибровка зависит от угла падения излучения.

Аппаратура для регистрации продолжительности солнечного сияния. Прибор состоит из двух фотоэлементов, один из которых экранирован от прямой солнечной радиации. Если радиация полностью рассеянная, оба элемента регистрируют приблизительно одинаковые уровни радиации. Если же на прибор падает прямое излучение, то облучаемый элемент регистрирует более высокую интенсивность излучения, чем экранированный элемент. Продолжительность сохранения предельной (критической) разницы в интенсивностях излучения, которую регистрируют солнечные элементы определяет продолжительность «солнечного сияния».

Радиационные балансомеры. Ими производится измерение разности потоков радиации, поступающей на поверхность Земли и от её поверхности. Прибор содержит две приемные площадки, расположенные параллельно друг над другом и направленные в противоположные стороны. Наружные (рабочие) стороны площадок зачернены, между внутренними поверхностями установлена термобатарея. ЭДС термобатареи пропорциональна разности потоков излучения, поступающие на приемные площадки. Приборы или специально градуируют, или проводят абсолютные измерения с помощью нагревателей, вмонтированных в приемные площадки для компенсации разности потоков (прибор Михельсона).

В балансомерах типа М-10 используется термобатарея из константановой ленты с нанесённым слоем серебра.

Используются также радиационные балансомеры, содержащие две пары последовательно и дифференциально включённых термобатарей. Батареи попарно присоединены горячими спаями к двум парам и противоположно направленным приемным площадкам. Каждая пара площадок обладает избирательным коэффициентом поглощения – одна из них имеет покрытие, воспринимающее коротковолновую область радиации, другая – покрытие, воспринимающее область длинноволновую. Холодные спаи прикреплены к теплоотводящим усикам. Система помещена в корпус с полусферическими окнами-фильтрами. Таким путём компенсируется коротковолновое излучение и измеряется разность потоков длинноволнового излучения.

Пиргеометры – приборы для измерений излучения от поверхности Земли. Подразделяются на абсолютные (типа Ангстрема или с компенсацией теплового потока) и относительные, представляющие собой батареи термопар, спаи которых прикреплены к черным и отражающим приемным площадкам. При использовании ленточных термобатарей чернится половина ветви каждой термопары.

Данные по солнечной радиации. Оценка средней плотности потока солнечной радиации.

С помощью перечисленных выше приборов на метеорологических станциях регистрируется прямая и рассеянная радиация на горизонтальной поверхности. Приборы с термоэлектрическими или биметаллическими приемниками регистрирует изменение солнечной радиации во времени, но не производят интегрирования данных записи. Сигнал на выходе прибор - электрический, измеряемые данные записываются с помощью потенциометров в виде кривых, которые затем графически или аналитически интегрируются.

Основным источником информации о солнечной радиации и других метеорологических данных являются соответствующие службы и станции, научно-исследовательские институты со своими филиалами на местах и т.п.

Полученные данные фиксируются графически или таблично – за сутки и за час, т.е. части приборов или станций регистрируют суточные суммы солнечной радиации, а часть - регистрирует часовые значения.

Кроме этих данных – на станциях получают данные о продолжительности солнечного сияния (с помощью приборов Кэмпбелла-Стокса).

Данные по солнечной радиации можно представлять различными способами, но в любом случае они должны содержать следующую информацию:

1. Являются ли они непосредственно измерёнными величинами или суммарными значениями за какой-либо период времени (обычно за час или сутки).

2. Время или период времени, в течение которого проводились измерения.

3. Тип солнечной радиации (прямая, рассеянная или суммарная), тип измерительной аппаратуры.

4. Ориентация приемной поверхности (обычно горизонтальная, иногда с определённым наклоном или в направлении нормали).

5. Для усредненных данных – период времени, для которого проводилось усреднение (например, среднемесячное значение суточной суммарной солнечной радиации).

В таблице 3.1. для некоторых мест приведены суммы солнечной радиации за сутки на горизонтальной поверхности, усредненные по месяцам. Это наиболее общая форма представления данных.

Таблица 3.2.

Среднемесячное дневное количество суммарной ($\bar{I}$) и рассеянной ($\bar{I}_d$) солнечной энергии на 1 м^2 горизонтальной поверхности $[МДж/м^2 \text{сутки}]$ и среднемесячная температура $\overline{t_{o.c.}}$.

Данные	Широта	Месяцы				
		Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
$\bar{I}$	45° с.ш.	20,25	23,07	23,62	20,11	14,73
$\bar{I}_d$		9,18	10	9,04	7,83	5,98
$\overline{t_{o.c.}}$		15,6	19,2	21,4	20,56	15,70
$\bar{I}$	40° с.ш.	27,81	29,47	27,81	24,16	19,04
$\bar{I}_d$		5,26	5,84	5,8	5,4	3,61
$\overline{t_{o.c.}}$		16,3	21,5	24,7	24,2	19,3

В таблице приведено среднемесячное дневное количество суммарной ($\bar{I}$) и рассеянной ($\bar{I}_d$) солнечной энергии на 1 м^2 горизонтальной поверхности $[МДж/м^2 \text{сутки}]$ и среднемесячная температура $\overline{t_{o.c.}}$, даны даны часовые суммы солнечной радиации, усредненные по месяцам.

Средние значения данных по солнечной радиации могут быть определены по картам, на которых приводятся линии средних значений. Такие карты очень наглядны при отыскании мест, где целесообразно использовать солнечную энергию.

Вопросы для проверки теоретической и практической подготовки по разделу 1

1. Состав, строение Солнца, как источника энергии.
2. Основные характеристики Солнца.
3. Спектр внеземного излучения.
4. Солнечная постоянная.
5. Прямое солнечное излучение.
6. Рассеянное (диффузное) солнечное излучение.
7. Отражённое излучение.
8. Масса атмосферы.
9. Направление распространения прямого солнечного излучения, основные угловые параметры.
10. Ослабление излучения в атмосфере.
11. Основные процессы ослабления излучения в атмосфере Земли,
12. Спектр наземного излучения.
13. Основные углы, определяющие направление распространения прямого солнечного излучения ($\varphi, \omega, \delta, \gamma$).
14. Зенитный угол.
15. Углы установки прямой плоскости (S, θ).
16. Угол солнечного склонения δ , методика расчёта.
17. Часовой угол ω , методика расчёта.
18. Угол падения солнечных лучей θ , угол наклона коллектора S .
19. Дополнительные углы определения положения Солнца (θ_Z, α).
20. Общий угловой коэффициент R (для прямого, диффузного и отражённого излучения).
21. Угловой коэффициент прямого солнечного излучения (R_S).
22. Физический смысл углового коэффициента R_S , методика расчёта.

Литература, используемая в разделе 1

1. Дж. Даффи, У.А. Бекман. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. Пер. с англ. М.: Мир. 1977 г. . п. 1, 2, 3, 4.
2. Алексеев Г.И. Непосредственное превращение различных видов энергии в электрическую и механическую. М.-Л. Гасэнергоиздат. 1968г.
3. В.М. Усаковский. Возобновляемые источники энергии. М.: Россельхозиздат. 1986.
4. У.А. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. Расчёт систем солнечного теплоснабжения. Пер. с англ. М. Энергоиздат. 1982.
5. Дж. Бринкворт. Солнечная энергия для человечества. Пер. с англ. М. Мир. 1977.
6. Г.И. Денисенко. Возобновляемые источники энергии. Киев. Высшая школа. 1983.
7. Б.М. Берковский, В.А. Кузьминов. Возобновляемые источники энергии на службе человека. М. Наука. 1987.
8. Мак-Вейг Д. Применение солнечной энергии Пер. С англ. М. Энергоиздат. 1981.
9. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование солнечного излучения. М. Наука. 1989.
10. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов. М. Мир. 1985.

РАЗДЕЛ 2 УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОТОКА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ

Тема 1. Оптические характеристики плоского солнечного коллектора

Цель: Изучение оптических характеристик плоского солнечного коллектора (ПСК)

Перечень рассматриваемых вопросов:

- 1.1. Основные элементы плоского солнечного коллектора*
- 1.2. Пропускательная способность прозрачного покрытия*
- 1.3. Поглощение излучения в частично прозрачной среде. Приведённая или поглощательная способность.*
- 1.4. Пример расчёта пропускательной способности*

1.1. Основные элементы плоского солнечного коллектора

Основным элементом систем солнечного теплоснабжения является солнечный коллектор, который представляет собой конструкцию способную поглощать большую часть солнечной радиации и передавать её жидкому или воздушному теплоносителю. Теплота, уносимая теплоносителями, представляет собой полезную энергию которая либо аккумулируется, либо используется для компенсации тепловой нагрузки. На рис. 1.1 показаны поперечные сечения воздухо – и водонагревателя плоского солнечного коллектора - ПСК.

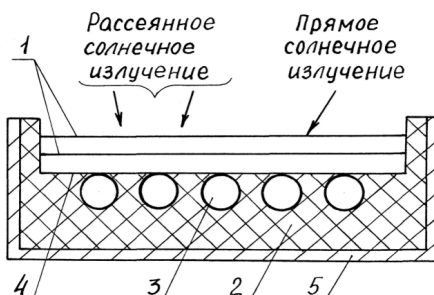


Рис. 1.1. Основные элементы плоского солнечного коллектора: 1 – защитные прозрачные покрытия 2 – теплоизоляция; 3 – трубы или каналы, по которым циркулирует теплоноситель; 4 – поглощающая пластина; 5 – корпус.

Основные элементы коллектора:

1. поглощающая пластина, обычно из металла, с не отражающим чёрным покрытием, обеспечивающим максимальное поглощение солнечного излучения;

2. трубы или каналы, по которым циркулирует жидкость или воздух и которые находятся в тепловом контакте с поглощающей пластиной (абсорбером); тепловая изоляция днища и боковых кромок пластины;

3. прозрачные покрытия (стекла), обеспечивающие теплоизоляцию пластины сверху;

4. корпус, обеспечивающий долговечность и устойчивость к воздействию погодных факторов.

Эффективность процессов преобразования солнечной радиации в полезную тепловую мощность солнечного коллектора определяется оптическими (радиационными) и теплофизическими свойствами материалов (непрозрачных и прозрачных), из которых состоит коллектор, а также конструкций плоского солнечного коллектора в целом.

1.2. Пропускательная способность прозрачного покрытия

Интенсивность солнечного излучения на уровне стеклянного покрытия гелиоколлектора определяется формулой:

$$I_T = I_0 \cdot R = I_S \cdot R_S + I_d \cdot R_d \quad (1.1)$$

Поглощенная абсорбером солнечная энергия определяется оптическими характеристиками материалов ПСК и его конструктивными параметрами:

$$q_\theta = I_T \cdot R(\tau\alpha) = I_S \cdot R_S(\tau\alpha)_S + I_d \cdot R_d(\tau\alpha)_d \quad (1.2)$$

$(\tau\alpha)$ - приведённая поглощательная способность ПСК, учитывается:

$\tau = \tau_\rho \cdot \tau_\alpha$ - поглощательная способность стеклянного покрытия с учётом отражения (τ_ρ) и поглощения (τ_α); α - поглощательную способность абсорбера ПСК (поглощающей пластины).

Отражательная способность одной границы раздела при нормальном падении излучения ($\theta_1 = \theta_2 = 0$) (рис. 1.1):

$$\rho = \frac{I_\rho}{I_0} = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (1.3)$$

Если одной из сред является воздух, имеющий показатель преломления, равный единице, соотношение для ρ принимает вид:

$$\rho = \frac{I_{\rho}}{I_0} = \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad (1.4)$$

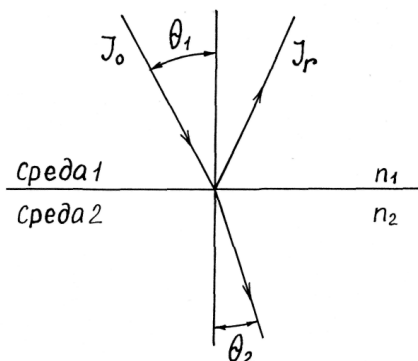


Рис. 1.1. Углы падения и преломления на поверхности раздела сред с показателями преломления n_1, n_2

Отражательная способность поверхности при произвольном значении угла падения θ_1 и угла преломления $\theta_2 = \arcsin\left[\frac{\sin \theta_1}{n}\right]$ (из закона Снелиуса) определяется формулой Френеля:

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\operatorname{tg}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\operatorname{tg}^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (1.5)$$

В гелиотехнике пропускание излучения осуществляется через стекло или плёнку материала покрытия, таким образом каждое покрытие имеет две границы раздела, вызывающие потери на отражение. Если с обеих сторон покрытия граничат с воздухом, то ослабление излучения будет одинаковым на обеих границах раздела (рис. 1.2).

Из анализа процессов переоблучения внутри покрытия получим выражение для пропускательной способности одного покрытия без учёта поглощения:

$$\tau_{\rho,1} = (1-\rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{1-\rho}{1+\rho} \quad (1.6)$$

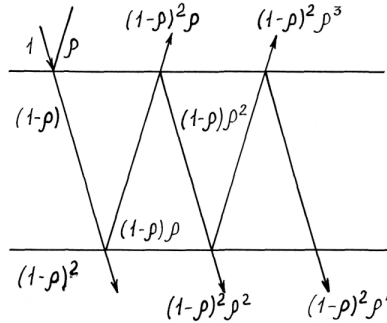


Рис. 1.2. Пропускание через одно покрытие

Для системы, состоящей из n покрытий, изготовленных из одинакового материала, получим:

$$\tau_{\rho,1} = \frac{1-\rho}{1+(2n-1)\rho} \quad (1.7)$$

1.3. Поглощение излучения в частично прозрачной среде. Приведённая или поглощательная способность

Поглощение излучения в частично прозрачной среде описывается законом Бугера, который основан на допущении, что поглощённое излучение пропорционально локальной интенсивности излучения в этой среде и расстоянию X , пройденному излучением:

$$dI = I \cdot K \cdot dx, \quad (1.8)$$

где K - коэффициент ослабления, который в области солнечного спектра предполагается постоянным.

После интегрирования (3.24) от 0 до L (толщина покрытия), получим:

$$\tau_a = \frac{I_L}{I_0} = e^{-KL} \quad (1.9)$$

Значение коэффициента K изменяется от $0,04\text{см}^{-1}$ – для высокопрозрачного стекла (с бесцветной кромкой) до $0,32\text{см}^{-1}$ – для плохого (с зеленоватым оттенком кромки) стекла. Заметим, что τ_a – пропускательная способность, учитывающая только поглощение, а L – фактическая длина пути излучения через среду. Если угол падения излучения θ_1 , а угол преломления θ_2 (в материале покрытия), то фактический путь излучения $L' = L/\cos\theta_2$. Для систем, состоящих из одного, двух, трёх слоёв покрытия $L' = nL$, где n – число покрытий.

Пропускательная способность покрытий, учитывающая как отражение, так и поглощение:

$$\tau = \tau_p \cdot \tau_a \quad (1.10)$$

Приведённая поглощательная способность гелиоколлектора учитывает сложные оптические процессы переоблучения внутри коллектора с учётом поглощательных свойств абсорбера, которые определяются его поглощательной способностью a .

Тепловая энергия, поглощённая в результате многократных отражений рассеянного излучения, в итоге равна (рис. 1.3):

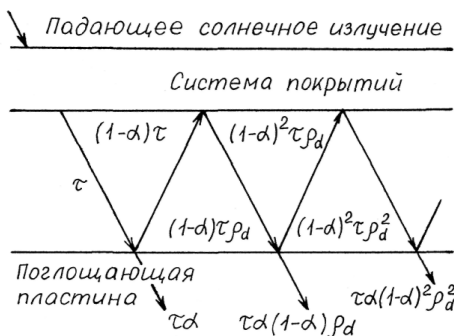


Рис. 1.3. Поглощение солнечного излучения поглощающей пластиной

$$(\tau a) = \tau a \sum_{n=0}^{\infty} [(1-a)\rho_d]^n = \frac{\tau a}{1 - (1-a)\rho_d}, \quad (1.11)$$

где (τa) – приведённая способность гелиоколлектора; $\tau = \tau_p \cdot \tau_a$ – поглощательная способность прозрачного покрытия; a – поглощательная способность абсорбера; ρ_d – диффузная отражательная способность

абсорбера (стекла) при угле падения излучения 60° . Для системы покрытий из 1, 2, 3, и 4 листов стекла ρ_d приблизительно равно соответственно 0,16; 0,24; 0,29; и 0,32.

1.4. Пример расчёта пропускательной способности

Определить приведённую пропускательную способность для двухслойного стеклянного покрытия, каждое стекло имеет толщину $L = 0,23 \text{ см}$, абсорбер имеет поглощательную способность $a = 0,94$, коэффициент поглощения в стекле $K = 0,161 \text{ см}^{-1}$, коэффициент диффузного отражения $\rho_d = 0,24$, коэффициент преломления в стекле $n = 1,526$.

Расчёт необходимо произвести для $\theta_1 = 0^\circ$ и $\theta_2 = 60^\circ$.

Решение. Расчётная формула для (τa) :

$$(\tau a) = \frac{\tau a}{1 - (1 - a)\rho_d} = \frac{I_{\text{пол.}}}{I_0}.$$

Определяем составляющие этой формулы при $\theta_1 = 0^\circ$:

$$\tau(0) = \tau_\rho(0) \cdot \tau_a(0),$$

$$\tau_\rho(0) = \frac{1 - \rho}{1 + (2n - 1)\rho},$$

где ρ - отражательная способность одной поверхности:

$$\rho(0) = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 = 0,043,$$

тогда

$$\tau_\rho(0) = \frac{1 - 0,043}{1 + 300,043} = 0,85,$$

$$\tau_0 = \tau_\rho(0) \cdot \tau_a(0) = 0,79, \text{ тогда}$$

$$(\tau a)_0 = 0,79 \cdot 0,94 \cdot \frac{1}{1 - (1 - 0,94) \cdot 0,24} = 0,752.$$

Соответствующие расчёты для $\theta_1 = 60^\circ$ дают следующие результаты:

$$\rho(60) = 0,093; \quad \tau_\rho(60) = 0,717; \quad \tau_a(60) = 0,91; \quad \tau(60) = 0,69;$$

$$(\tau a)_{60} = 0,657.$$

Приведённая пропускательная способность (τa) определяет оптическую характеристику гелиоколлектора, его оптический коэффициент полезного действия, позволяющий оценить долю падающего на коллектор солнечного излучения, поглощённую в абсорбере $I = I_0(\tau a) \cdot R$.

Тема 2. Оптические характеристики приемников солнечной энергии

Цель: Изучение оптических характеристик приемников солнечного излучения

Перечень рассматриваемых вопросов:

2.1 Радиационные характеристики непрозрачных конструкционных материалов

2.1 Радиационные характеристики непрозрачных конструкционных материалов

2.2 Селективность. Селективные поверхности

2.3. Способы реализации селективных поверхностей

2.4. Пропускание излучения частично прозрачными средами.

2.4.1. Отражение на границах раздела сред

2.4.2. Пропускательная способность без учёта поглощения

2.4.3. Поглощение излучения в частично прозрачной среде

2.4.4. Приведённая поглощательная способность

2.1 Радиационные характеристики непрозрачных конструкционных материалов

Рассмотрим радиационные свойства поверхностей, непрозрачных для солнечного излучения. В общем случае энергия солнечного излучения (плотность потока излучения или интенсивность излучения I) будет частично поглощаться поверхностью и частично отражаться. Поглощательная способность поверхности по отношению к излучению достаточно широкого спектра длин волн λ и с различных направлений определяется дифференциальной характеристикой, которая называется спектральной направленной поглощательной способностью поверхности $a_\lambda(\mu, \varphi)$, которая определяется как поглощённая доля излучения с длиной волны λ падающего в направлении μ, φ (μ - косинус полярного угла, φ - азимутальный угол):

$$a_\lambda(\mu, \varphi) = \frac{I_{\lambda,a}(\mu, \varphi)}{I_{\lambda,i}(\mu, \varphi)} \quad (2.1)$$

Здесь индексы a и i относятся соответственно к интенсивности поглощённого и падающего на поверхность излучения.

Если проинтегрировать выражение 2.1 в диапазоне длин волн солнечного излучения по всем возможным направлениям (по верхней полусфере небосвода), получим выражение для полусферической поглощательной способности поверхности:

$$a = \frac{I_a}{I_i} \quad (2.2)$$

где I_a - интенсивность поглощенного солнечного излучения; I_i - интенсивность падающего на поверхность солнечного излучения (всех длин волн и со всех направлений).

Полусферическая степень черноты поверхности определяется как отношение интенсивности излучения, испускаемого поверхностью по всем возможным направлениям I , к полусферической интенсивности излучения, которое испускало бы чёрное тело при той же температуре:

$$\varepsilon = \frac{I(T)}{I_0(T)} \quad (2.3)$$

Степень черноты ε согласно закону Кирхгофа в условиях термического равновесия равна поглотительной способности той же поверхности непрозрачного тела:

$$\varepsilon = a$$

Степень черноты поверхностей является свойством поверхности, зависит от обработки, температуры, шероховатости, определяется опытным путём и приводится в специальных физических и теплотехнических справочниках

Отражение от поверхности тонкого луча (малый телесный угол) может быть зеркальным, диффузным или иметь общий характер (рис. 2.1).

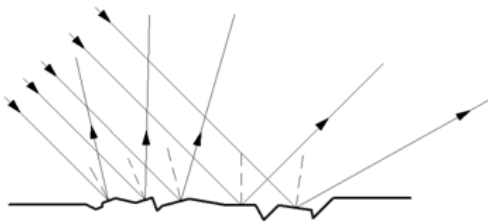


Рис. 2.1. Отражение луча от поверхности

Зеркальное отражение подобно отражению от зеркала, когда угол падения равен углу отражения. При диффузном отражении направленное падающее излучение оказывается равномерно распределённым по всем направлениям. В действительных условиях отражение от поверхности не является ни диффузным, ни зеркальным, а представляет собой сложное явление (рис. 2.1).

Если на элемент поверхности падает излучение со всех направлений и всё отражённое излучение измеряется, то можно определить спектральную полусферическую отражательную способность:

$$\rho_{\lambda} = \frac{q_{\lambda,r}}{q_{\lambda,i}} \quad (2.4)$$

где: $q_{\lambda,r}$ - плотность потока энергии отражённого монохроматического излучения;

$q_{\lambda,i}$ - плотность потока энергии падающего монохроматического излучения.

Полусферическая отражательная способность определяется путём интегрирования выражения (2.5) по всем длинам волн:

$$\rho = \frac{q_r}{q_i} = \frac{\int_0^{\infty} q_{\lambda,r} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} q_{\lambda,i} \cdot d\lambda} \quad (2.5)$$

В таблице 2.1 приведены экспериментально измеренные радиационные свойства поверхности для некоторых часто используемых материалов. Эти данные являются интегральными полусферическими степенями черноты и степенями черноты в направлении нормали при различных температурах, а также поглощательной способностью по отношению к солнечному излучению, падающему по нормали, при комнатных температурах.

Чтобы использовать эту величину в инженерных расчётах принимаются следующие допущения: направление отражения не зависит ни от направления падения излучения, ни от длины волны. В этом случае отражательная способность ρ определяется физическими свойствами материала и качеством обработки поверхностей.

В общем случае для непрозрачной поверхности

$$a + \rho = 1 \quad (2.6)$$

или $\varepsilon + \rho = 1$,

откуда

$$\varepsilon = a = 1 - \rho \quad (2.7)$$

Таким образом, как степень черноты, так и поглощательная способность поверхностей, могут быть рассчитаны по известному значению её отражательной способности. Следовательно, излучательные свойства можно определить, если известна величина ρ , или $\rho_{\lambda}(\mu, \varphi)$.

Зависимость $\alpha, \rho, \varepsilon$ от спектральных и пространственных параметров делает процедуры расчёта этих величин для различных поверхностей довольно трудоёмкими и недостаточно точными. Данные по оптическим свойствам непрозрачных материалов определяются опытным путём на установках, позволяющих фиксировать как длину волны излучения, так и направление.

В таблице 2.1 приведены экспериментально измеренные радиационные свойства поверхности для некоторых часто используемых материалов. Эти данные являются интегральными полусферическими степенями черноты и степенями черноты в направлении нормали при различных температурах, а также поглощательной способностью по отношению к солнечному излучению, падающему по нормали, при комнатных температурах.

Таблица 2.1

Радиационные свойства поверхности некоторых материалов

Материал	Степень черноты			Поглощательная способность
	Температура, K			
Алюминий чистый	$\frac{0,102}{573}$	$\frac{0,130}{773}$	$\frac{0,113}{873}$	0,09 – 0,1
Алюминий с покрытием SiO_2	$\frac{0,366}{263}$	$\frac{0,384}{293}$	$\frac{0,378}{324}$	0,11
Железо	$\frac{0,071}{200}$	$\frac{0,110}{468}$	$\frac{0,175}{668}$	0,44
Краска белая (акриловая)	$\frac{0,9}{298}$			0,26
Краска чёрная парсоновская	$\frac{0,981}{240}$	$\frac{0,981}{462}$	0,98	
Ламповая сажа в эпоксидной смоле	$\frac{0,89}{298}$			0,96
Медь полированная	$\frac{0,041}{338}$	$\frac{0,036}{463}$	$\frac{0,039}{803}$	0,35
Никель	$\frac{0,1}{310}$	$\frac{0,1}{468}$	$\frac{0,12}{668}$	0,36 – 0,43
Хром	$\frac{0,290}{722}$	$\frac{0,355}{905}$	$\frac{0,435}{1072}$	0,415

2.2 Селективность. Селективные поверхности

Возможность эффективного использования солнечной энергии в солнечных коллекторах реализуется при выполнении главного условия: поверхность солнечного коллектора (абсорбер) должна нагреваться до температуры, большей чем температура окружающей среды и это состояние должно поддерживаться длительное время. Круг идей, методов и технических решений, направленных на создание неравновесных условий для использования солнечной энергии, чрезвычайно широк и разнообразен. Одно из направлений исследований и технических разработок связано с реализацией идеи селективности приемной поверхности солнечных коллекторов по радиационным спектральным свойствам (поглощательная способность a_λ степень черноты ε_λ) абсорбера, и по угловому распределению спектральной плотности падающего на абсорбер излучения с интенсивностью $I(\lambda, \mu, \varphi)$.

Анализ энергетического баланса солнечных коллекторов, который будет рассмотрен несколько позже, показывает, что для обеспечения эффективности ПСК абсорбер должен обладать на первый взгляд парадоксальными оптическими свойствами: высокой поглощающей способностью a_S в диапазоне длин волн солнечного излучения ($T_S \cong 5600K, \lambda = 0,3 \div 3,0 \text{ мкм}$), следовательно малым значением отражательной способности ρ_λ . В то же время для снижения уровня тепловых потерь солнечного коллектора желательно, чтобы та же самая поверхность в области рабочих температур коллектора ($T_C \approx 400K$) и в диапазоне $\lambda_C > 3,0 \text{ мкм}$ имело бы минимальный коэффициент черноты ($\varepsilon_C = a_C$) и, следовательно, наибольшую отражательную способность ρ_C . Спектральная отражательная способность на рис. 2.3 разъясняет смысл понятия селективной поверхности. Эта идеализированная поверхность называется «полусерой», поскольку её можно рассматривать как серую в области солнечного спектра (т.е. в диапазоне длин волн, меньших $3,0 \text{ мкм}$) и также как серую, но с другими оптическими свойствами в инфракрасной области спектра (т.е. в диапазоне длин волн, больших $3,0 \text{ мкм}$). Спектральная отражательная способность ρ_λ такой идеализированной поверхности в области длин волн, меньших критической, или пороговой длины волны λ_C , имеет очень низкое значение, а в области длин волн, больших λ_C - высокое значение.

Следовательно, поглощательная способность по отношению к солнечному излучению будет близка к $(1 - \rho_\lambda)$ и достаточно высока при $\lambda < 3 \text{ мкм}$. Значение степени черноты поверхности будет зависеть от температуры поверхности, т.е. от того, какое количество излучения

испускает поверхность в области длин волн, больших λ_C , и какое количество – в области длин волн, меньших λ_C . Плоские солнечные коллекторы обычно работают при достаточно низких температурах, практически всё испускаемое ими излучение приходится на область длин волн, больших 3 мкм (инфракрасное излучение).

Универсальная функция Кирхгофа $f(\lambda, T)$, она же испускательная способность абсолютно чёрного тела $r(\lambda, T)$, согласно закону смещения Вина имеет достаточно ярко выраженные максимумы при длинах волн $\lambda_S = \frac{C}{T_S}, \lambda_C = \frac{C}{T_C}$ (где $C = 2,9 \cdot 10^3 \text{ мкм} \cdot \text{K}$, T_S – средняя температура излучения Солнца, T_C – средняя температура абсорбера). Задача состоит в том, чтобы повысить температуру T_C , которая всегда будет малой величиной в сравнении с T_S ($T_C \approx 400\text{ K}$; $T_S \approx 5600\text{ K}$).

Спектральные максимумы функции $r(\lambda, T_S)$ и $r(\lambda, T_C)$ достаточно далеки друг от друга, энергетически значимые области для этих двух распределений относятся к разным участкам спектра: λ_C намного больше λ_S . С точки зрения максимального поглощения солнечного излучения предпочтительны высокие значения спектральной поглощательной способности $a(\lambda_S)$, в то же время для снижения уровня потерь $\varepsilon(\lambda_S)$ желательно уменьшать. Ввиду сосредоточенности спектральных распределений в окрестности своих максимумов для эффективного поглощения солнечного излучения нет необходимости иметь высокие значения $a(\lambda)$ по всему спектру, достаточно, чтобы $a(\lambda)$ были высоки в окрестности λ_S . Аналогично, для снижения потерь не требуется одинаково низких значений $\varepsilon(\lambda)$ во всём диапазоне длин волн, достаточно, чтобы $\varepsilon(\lambda)$ были малы в окрестности λ_C .

Удалённость максимумов $I(\lambda_S)$ и $I(\lambda_C)$ позволяет с помощью одной и той же спектрально селективной поверхности выполнить оба условия.

Реализация селективной характеристики поверхности $\rho_\lambda = f(\lambda)$ или $a_\lambda = f(\lambda)$, приближённой к идеализированной, открывает возможность повысить температуру абсорбера и эффективность солнечного коллектора за счёт повышения поглощающей способности или $a(\lambda_S)$ в области длин волн λ_S и существенного снижения собственной излучательной способности при низкой степени черноты ε_C в области длин волн собственного излучения λ_C .

В этом же диапазоне длин волн отражательная способность ρ_C будет достаточно велика $(1 - \varepsilon_C)$.

2.3. Способы реализации селективных поверхностей

В системах горячего водоснабжения средняя температура поглощающей панели абсорбера составляет около 60° . Этот температурный уровень достаточно эффективно обеспечивается применением на тепловоспринимающей панели обычной чёрной краски. Для целей отопления и кондиционирования воздуха в помещениях требуется более высокая температура панели – от 60 до 100°C . Для коллектора с чёрной поверхностью при этом резко увеличиваются тепловые потери и уменьшается эффективность, в основном, за счёт большого собственного излучения абсорбера ($\varepsilon = 0,9 \div 0,92$). Применение селективных покрытий с низкой степенью черноты ε снижает эту составляющую теплового баланса при сохранении более высоких температур панели абсорбера (по сравнению с неселективными поверхностями).

В настоящее время разработаны разнообразные типы селективных покрытий и методы их реализации. При выборе селективного покрытия необходимо учитывать следующие обстоятельства:

- солнечные коллекторы должны работать на протяжении нескольких лет, поглощающие селективные пластины абсорбера должны сохранять свои свойства на протяжении всего срока эксплуатации в реальных условиях (повышенная температура, влажность, световое облучение);

- селективные покрытия должны иметь технологическую возможность применения на достаточно больших площадях $(1-2)\text{м}^2$ при оптимальной стоимости как самого покрытия, так и технологии его нанесения на поглощающую панель. Наличие селективного покрытия не должно приводить к большому повышению стоимости.

Характеристикой селективного покрытия является отношение a_S к ε_C (поглощающей способности в диапазоне волн λ_S к степени черноты при рабочих температурах поглощающей пластины). Наибольшее значение $a_S / \varepsilon_C \geq 20$ удаётся получить с помощью многослойных интерференционных покрытий, которые наносятся на полированную подложку, имеющую низкую степень черноты.

Интерференционные фильтры формируются путём поочередного осаждения слоёв металла и диэлектрика с оптической толщиной в четверть длины волны и ближнего инфракрасного излучения. Трёхслойные покрытия типа $\text{SiO}_2 - \text{Al} - \text{SiO}_2$ на подложке из алюминия позволяют получить отражательную способность $\rho_S < 0,1$ для солнечного спектра и более $0,9$ для длинноволнового излучения.

Проблема заключается в нанесении таких покрытий на большие площади и в их стойкости реальных условиях на протяжении всего периода эксплуатации.

Одним из самых распространённых технологических методов получения селективных покрытий является электрохимическое осаждение пористых металлов (окислов) на полированную поверхность. Этим методом создаются, например, покрытия типа «чёрный никель» и «чёрный хром» на основе окислов этих металлов. Подложной для покрытий являются полированные поверхности (медь, латунь, алюминий, легированные стали). Такие поверхности могут иметь a_s до 0,98 и ε_c до 0,05 при сохранении свойств до 10 – 15 лет эксплуатации. Характеристики некоторых селективных покрытий приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Свойства некоторых селективных поверхностей, и используемых в гелиотехнике

Поверхность	a , поглощательная способность	ε , степень черноты для собственного излучения коллектора.
«Чёрный никель» на полированном никеле (окислы Ni, Zn)	0,91 – 0,94	0,05 – 0,10
«Чёрный никель» на оцинкованном железе.	0,9	0,1 – 0,12
Окись меди CuO на Ni (полированном)	0,81	0,12 ÷ 0,17
Окись меди CuO на алюминии.	0,93	0,1 ÷ 0,11
«Чёрная медь» на меди.	0,89	0,05 ÷ 0,1
Интерференциальные слои	0,91	0,08
Селективные красители.	0,8	0,3 ÷ 0,4
Титановое покрытие на листовой стали	0,9	0,05 ÷ 0,12

Спектральная селективность может быть реализована также за счёт изменения структуры поверхности металла, обычно обладающей высокой отражательной способностью. Если химическим или механическим способом

создать углубления (царапины), размеры которых соизмеримы с пороговой длиной волны, то для коротковолнового излучения эти неровности представляют собой набор «полостных» поглотителей, а для длинноволнового излучения является гладкой поверхностью. Степень селективности для таких поверхностей не очень высока.

«Направленная» или угловая селективность может быть получена путём формирования площади поверхности: абсорбер состоит из глубоких V -образных канавок достаточно больших размеров относительно всех рассматриваемых длин волн. Излучение, по направлениям, близким к направлению нормали к поверхности, будет несколько раз отражаться внутри канавок, причём при каждом отражении часть излучения будет поглощаться. Такое многократное поглощение приводит к увеличению поглотительной способности относительно солнечного излучения, но в то же время при оптимальном выборе угла раскрытия канавок ($30 - 55^\circ$) можно получить степень черноты для длинноволновой части спектра в пределах $0,1 \div 0,15$.

Основанием для применения «направленной» селективности является зависимость поглотительной способности зачёрнённых поверхностей (таких, которые используются в солнечных коллекторах) в области солнечного спектра от угла падения излучения на эту поверхность. Пример такой зависимости приведён на рисунке 2.5.

2.4. Пропускание излучения частично прозрачными средами.

Для непрозрачных поверхностей сумма поглотительной способности α и отрицательной способности ρ равна единице. Если поверхность прозрачна (стеклянные или иные защитные покрытия коллектора), то сумма поглотительной α , отражательной ρ и пропускательной способности τ также должна быть равна единице $\alpha + \rho + \tau = 1$. Пропускательная способность τ представляет собой долю интенсивности излучения проходящего через $I_{\text{проп.}}$ от величины интенсивности излучения, падающего на прозрачное покрытие конечной толщины $I_{\text{над.}}$.

$$\tau = \frac{I_{\text{проп.}}}{I_{\text{над.}}} \quad (2.8)$$

Пропускательная способность, также как отражательная и поглотительная, зависит от длины волны λ , угла падения излучения (μ, φ), показателя преломления n и коэффициента ослабления излучения в материале K .

2.4.1. Отражение на границах раздела сред

Рассмотрим процессы пропускания прямого излучения частично прозрачной средой без учёта поглощения в среде. При переходе излучения I_0 из среды 1 с показателем n_1 в среду 2 с показателем преломления n_2 (рис. 2.6) отражение неполяризованного излучения I_r и отражательную способность можно определить по формуле Френеля:

$$\rho = \frac{I_r}{I_0} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (2.9)$$

где: θ_1, θ_2 - угол падения и преломления.

Слагаемые в квадратных скобках этого выражения представляют отражательные способности, соответствующие двум компонентам поляризации. Углы θ_1, θ_2 связаны с показателями преломления законом Снелиуса:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} \quad (2.10)$$

Таким образом, если известны угол падения и показатели преломления, то с помощью формул (2.9, 2.10) можно рассчитать отражательную способность одной границы раздела. При нормальном падении излучения оба угла θ_1, θ_2 и равны нулю (из 2.9, 2.10), в этом случае:

$$\rho = \frac{I_r}{I_0} = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (2.11)$$

Если одной из сред является воздух, у которого $n_1 = 1$, тогда соотношение (2.11) принимает вид:

$$\rho = \frac{I_r}{I_0} = \left(\frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (2.12)$$

2.4.2. Пропускательная способность без учёта поглощения

В плоском солнечном коллекторе пропускание излучения осуществляется через слой или плёнку материала покрытия конечной толщины, т.е. каждое покрытие имеет две границы раздела, вызывающие

потери на отражение. Если с обеих сторон покрытия граничат с воздухом, то ослабление излучения будет одинаковым на обеих границах раздела для каждой компоненты поляризации.

В соответствии со схемой многократного переизлучения внутри покрытия, представленной на рис. 1.3, доля падающего излучения, достигающая второй границы раздела, без учёта поглощения в пластине равна: $(1 - \rho)$. Отражательная способность для нижней границы равна: ρ , доля $\rho(1 - \rho)$ отражается к первой границе, а доля $(1 - \rho)(1 - \rho) = (1 - \rho)^2$ проходит через нижнюю, вторую границу и так далее. Суммарные доли излучения, прошедшего через пластину, описываются выражением для пропускательной способности одного покрытия без учёта поглощения в материале пластины:

$$\tau_{r,1} = (1 - \rho)^2 \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{(1 - \rho)^2}{(1 - \rho)^2} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \quad (2.13)$$

Для системы, состоящей из n покрытий, изготовленных из одинакового материала, с помощью аналогичных рассуждений получим:

$$\tau_{r,n} = \frac{1 - \rho}{1 + (2n - 1)\rho} \quad (2.14)$$

Это соотношение справедливо для каждой из двух компонент поляризации (см. (2.9)). Пропускательная способность относительно первоначально поляризованного света определяется как среднее арифметическое пропускательных способностей для этих двух компонент.

Для углов падения менее 40° пропускательную способность системы покрытий можно определить путём подставки в (2.14) среднеарифметической отражательной способности, вычисленной по уравнению (2.9).

2.4.3. Поглощение излучения в частично прозрачной среде

Поглощение излучения в частично прозрачной среде описывается законом Бугера, который основан на допущении, что поглощённое излучение пропорционально локальной интенсивности излучения в этой среде и расстоянию x , пройденному излучением:

$$dI = IK \cdot dx \quad (2.15)$$

где K - коэффициент ослабления света в стекле, который в области солнечного спектра предполагается постоянным.

Интегрируя 2.15 от 0 до L , получим:

$$\tau_a = \frac{I_L}{I_0} = e^{-KL} \quad (2.16)$$

Если L определять в см., то значение коэффициента K изменяется от $0,04\text{см}^{-1}$ для высокопрозрачного стекла (с бесцветной кромкой) до $0,32\text{см}^{-1}$ для плохого (с зеленоватым оттенком кромки) стекла. Заметим, что τ_a - пропускательная способность, учитывающая только поглощение в одном стекле толщиной L , а величина L - фактическая длина пути излучения через среду. Если коллектор имеет 2 или 3 стекла, необходимо соответственно увеличить общий путь излучения в покрытии, принимая его равным $2L, 3L$ и т.д.

Чтобы получить пропускательную способность покрытия, учитывающую как отражение, так и поглощение, необходимо перемножить пропускательные способности τ_r, τ_a :

$$\tau = \tau_r \cdot \tau_a \quad (2.17)$$

2.4.4. Приведённая поглощательная способность

Приведённая поглощательная способность характеризует оптические свойства системы «покрытие – абсорбер», здесь τ - пропускательная способность покрытия для рассматриваемого угла падения, a - направленная поглощательная способность абсорбера.

Часть излучения, прошедшего через систему покрытий и достигшего абсорбера, отражается обратно к системе покрытий. Однако это излучение не теряется полностью, поскольку часть его отражается назад к пластине. Более подробно: доля τ_a излучения, падающего на поглощающую пластину, поглощается, а доля $(1-a)\tau$ отражается обратно к системе покрытий. Отражение от поглощающей пластины, вероятно, ближе к диффузному, чем к зеркальному, поэтому доля $(1-a)\tau$, которая достигает покрытия, представляет собой диффузное излучение, при этом доля $(1-a)\tau \cdot \rho_g$ отражается обратно к поглощающей пластине. Величина ρ_g характеризует отражение от покрытия падающего диффузного излучения. Энергия излучения, (вернее, доля от полного солнечного излучения), поглощённая в результате многократных отражений рассеянного излучения, в итоге равна (сумме поглощённых долей энергии излучения при каждом преобразовании):

$$(\tau a) = \tau a \sum_{n=0}^{\infty} [(1-a)\rho_g]^n = \frac{\tau a}{1 - (1-a)\rho_d} \quad (2.18)$$

В этой формуле:

ρ_g - диффузная отражательная способность для условий зеркального отражения от системы покрытий при угле падения излучения 60° ; для расчётов принимаем ρ_g равным 0,16; 0,24; 0,29; 0,32 для одного, двух, трёх и четырёх листов стекла соответственно;

a - поглощательная способность поверхности поглощательной пластины коллектора (независимо от ориентации);

τ - пропускательная способность покрытия с учётом поглощения и отражения.

Пропускательная способность системы прозрачных покрытий τ и поглощательная способность пластины a зависят от угла падения солнечной радиации на поверхность коллектора. При опытных измерениях произведение $(\tau a)_n$ представляет собой величину, соответствующую падению излучения по нормали к поверхности. В зависимости от ориентации коллектора и времени года среднемесячные значения пропускательной и поглощательной способности могут быть значительно меньше, чем при нормальном падении излучения.

Упрощённый метод определения среднемесячных значений приведённой поглощательной способности $(\tau \bar{a})$, который может быть использован во многих случаях коллектора к горизонту находится в пределах $(\varphi - 15^\circ)$ или $(\varphi + 15^\circ)$, а его ориентация отличается от южной не более, чем на 15° , отношение $(\tau \bar{a})/(\tau \bar{a})_m$ для всех месяцев отопительного сезона принимается равным 0,96 для коллектора с одинарным остеклением и 0,94 для коллектора с двойным остеклением.

Это обстоятельство существенно упрощает расчёты $(\tau \bar{a})$, т.к. составляющие формулы для приведённой поглощательной способности можно определять по формуле для нормальной ориентации плоского солнечного коллектора по отношению к падающему солнечному излучению.

Большинство прозрачных сред пропускает селективно, т.е. пропускательная способность зависит от длины волны падающего излучения. В качестве прозрачной изоляции приемников солнечного излучения чаще всего применяется стекло. При малом содержании окислов Fe_2O_3 (< 2%) стекло плохо поглощает в спектре солнечной энергии. При содержании окислов железа > 2% стекло будет поглощать в инфракрасной области солнечного спектра. Любое стекло является практически непрозрачным для длинноволнового излучения ($\lambda > 3,0 \text{ мкм}$).

Тема 3. Конструкция и типы солнечных коллекторов

Цель: Изучение оптических характеристик приемников солнечного излучения

Перечень рассматриваемых вопросов:

3.1 Устройство солнечных коллекторов

3.2. Классификация и основные элементы плоских солнечных коллекторов (ПСК)

3.3. Конструкционные материалы в гелиотехнике

3.4. Основные требования, предъявляемые к конструкциям плоских солнечных коллекторов

3.1 Устройство солнечных коллекторов

Солнечный коллектор является основным элементом установки, в которой энергия излучения Солнца преобразуется в другую форму полезной энергии. В отличие от обычных теплообменников, в которых происходит интенсивная передача тепла от одной жидкости к другой, а излучение несущественно, в солнечном коллекторе перенос энергии к жидкости осуществляется от удалённого источника лучистой энергии. Без концентрации солнечных лучей плотность потока падающего излучения составляет в лучшем случае $\approx 1000 \text{ Вт} / \text{м}^2$ и является величиной переменной (раздел 1). Длины волн заключены в интервале 0,3 – 3,0 мкм. Они значительно меньше величин длин волн собственного излучения, большинства поглощающих поверхностей. Таким образом, исследование солнечных коллекторов связано с уникальными проблемами теплообмена при низких и переменных плотностях потока энергии и относительно большой роли излучения.

Солнечные коллекторы могут применяться как с концентрацией, так и без концентрации солнечного излучения. В плоских коллекторах (рис. 3.1) поверхность, воспринимающая солнечное излучение, является одновременно поверхностью, поглощающей излучение (без концентрации солнечного излучения).

Фокусирующие коллекторы (рис. 3.2) имеют различные оптические устройства (вогнутые отражатели и т.д.), которые концентрируют падающее на их поверхность излучение и направляют его на теплообменник с меньшей площадью поверхности, увеличивая тем самым плотность потока энергии на поверхности теплообменника.

В этой теме рассмотрим детально плоские коллекторы, наиболее широко применяемые в современной гелиотехнике.

Плоские коллекторы могут применяться для нагрева теплоносителя до умеренных температур, не превышающих температуру окружающей среды,

более чем на 100°C . К преимуществам ПСК следует отнести возможность использования как прямой, так и рассеянной солнечной радиации, они не требуют слежения за Солнцем и не нуждаются в повседневном обслуживании. В конструктивном отношении плоские коллекторы намного проще, чем любая фокусирующая система.



Рис. 3.1. Плоский солнечный коллектор

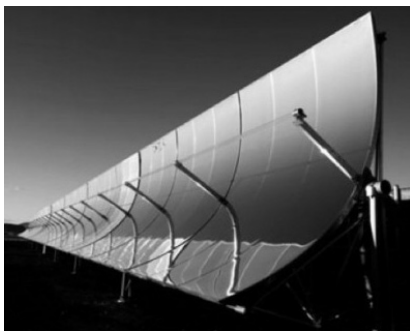


Рис. 3.2. Фокусирующий солнечный коллектор

Область применения плоских солнечных коллекторов обширна:

- системы коммунального и технологического горячего водоснабжения;
- системы низкопотенциального отопления и кондиционирования зданий;
- область технологической сушки в пищевой и строительной отраслях.

3.2. Классификация и основные элементы плоских солнечных коллекторов

Солнечные коллекторы работают по принципу обычного «горячего ящика». Коротковолновое излучение Солнца, проникающее через светопрозрачное покрытие в коллектор, поглощается абсорбирующей поверхностью. Конструкция коллектора обеспечивает такой режим работы, когда количество солнечной радиации, поступающей в коллектор, превышает его тепловые потери, поэтому температура абсорбирующей поверхности коллектора со временем растёт до температуры термодинамического равновесия которое является функцией полезной мощности установки, конструктивных параметров коллектора, свойств материалов, температуры окружающей среды, уровня солнечной радиации и всегда должна быть выше температуры окружающей среды.

Основными элементами плоского солнечного коллектора (рис. 3.3) являются:

- «чёрная» поверхность (абсорбер), которая поглощает солнечную радиацию и передаёт её энергию теплоносителю;
- прозрачные относительно солнечного излучения покрытия, расположенные над поглощающей поверхностью, которые уменьшают конвективные и радиационные потери в атмосферу;
- теплоизоляция обратной и боковых поверхностей коллектора для снижения потерь за счёт теплопроводности, на сколько это позволяет геометрия данной системы.

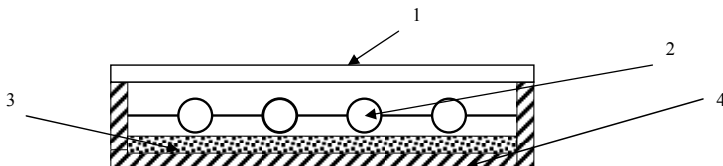


Рис. 3.3 Поперечный разрез плоского солнечного коллектора:

- 1 – прозрачное покрытие; 2 – поглощающая поверхность (абсорбер);
3 – тепловая изоляция; 4 – корпус.

Коллектор размещается в корпусе – ящике из металла, пластмассы, дерева, бетона или других материалов. В настоящее время разработана огромное количество различных конструкций коллекторов (около 1000 патентов на 2005 год).

Наиболее широко используемые конструкции плоских коллекторов могут быть условно сведены к следующим типам: «труба в листе», «лист-труба»; «лист». Рассмотрим особенности этих вариантов.

На рис. 3.4 показано поперечное сечение коллекторов типа «труба в листе» (а, в) и способы крепления труб к металлическому листу (абсорберу). Предпочтительные материалы труб и абсорбера – медь, латунь, алюминий, нержавеющая сталь. Трубная система представляет собой каркас из параллельных вертикальных труб, который крепится к абсорберу или змеевик (последовательное соединение труб). Применение змеевиков ограничено системами с принудительной циркуляцией. Эффективность работы коллекторов типа «труба в листе» в значительной степени зависит от качества контакта между трубами и листом, в котором они уложены. Теплопроводность соединений может находиться в пределах от $0,3 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ для надёжно припаянной трубы до $5,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ – для плохо закреплённой или ненадёжно припаянной трубы.

Большое распространение получают прессованные пластины с профилями различной геометрии – коллекторы типа «лист – труба» (рис. 3.4 б, г).

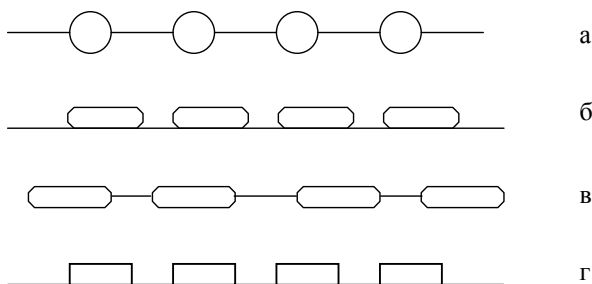


Рис. 3.4. Поперечные разрезы наиболее часто используемых типов абсорберов (поглощающих пластин)

В качестве поглощающих пластин применяются серийно выпускаемые штампованные стальные панели для отопления. Коллекторы типа «лист труба» более технологичны в серийном производстве, допускают широкий выбор материалов, включая обычные нелегированные стали и пластмассовые композиции. С теплоприемной стороны панели должны быть окрашены чёрной краской или специальным селективным покрытием.

Важную роль в процессе повышения эффективности солнечных коллекторов играет организация движения теплоносителя. При разработке конструкций солнечных коллекторов необходимо учитывать следующие основные факторы: равномерность потока теплоносителя по вертикальным трубам коллектора, малый перепад давления, простота изготовления и низкая стоимость.

В солнечном коллекторе типа «лист» к) теплоноситель движется между двумя плоскими поверхностями, одна из которых абсорбирует солнечную энергию. В коллекторе такого типа создаются наиболее благоприятные

условия для съёма тепла с гелиоприёмной поверхности. Расстояние между пластинами составляет 10 – 15 мм.

Достаточно большое распространение нашли «ёмкостные» плоские солнечные коллекторы, которые выполняют одновременно функции приёмника солнечной энергии и бака-аккумулятора горячей воды. Отличие такого коллектора от коллектора типа «лист» заключается в том, что расстояние между пластинами составляет 70 – 120 мм, в зависимости от районов, где используется коллектор. Средняя интегральная эффективность ёмкостных коллекторов может быть в пределах 40 – 70%.

Более высокий температурный уровень и эффективность использования солнечной энергии достигаются вакуумированных коллекторах (рис.3.5), где абсорбирующие поверхности помещаются внутри вакуумированных герметичных полостей цилиндрической или другой геометрической формы. В этом случае устраняется возможность потерь теплоты путём свободной конвекции и теплопроводности. Отражатели и селективные покрытия уменьшают радиационные (оптические) потери.



Рис. 3.5. Вакуумный солнечный коллектор

Конструктивно абсорбирующая поверхность может состоять из цилиндров, плоских пластин или U – образных труб, размещённых в вакуумных, достаточно прочных прозрачных корпусах. Применение таких коллекторов оправдано при необходимости высоких температур теплоносителя (более 100°C). В настоящее время вакуумные коллекторы получили широкое распространения, несмотря на сложности изготовления и эксплуатации в условиях поддержания вакуума (порядка 10^{-2} Па).

В плоских солнечных коллекторах могут применяться элементы концентрации солнечной энергии, что существенно повышает их эффективность. Например модифицированный солнечный коллектор, состоящий из ряда параллельных неподвижных трапецеидальных желобков. Боковые стенки желобков имеют высокую отражательную способность, а их основания являются поглощающей поверхностью. Концентрация солнечной

энергии достигается за счёт того, что излучение, падающее на боковые поверхности, отражается от них и частично попадает на поглощающую поверхность меньших размеров. Поскольку фокусирование не требуется, то используется как прямая, так и диффузная радиация.

В заключении рассмотрим устройство солнечного коллектора, серийно выпускаемого в России в 90 годах Братским заводом отопительного оборудования схема его устройства аналогична рис.3.3. В металлическом корпусе размещён поглотитель излучения типа «лист – труба» сварной конструкции с каналами для прохода теплоносителя (вода). Поглощающая панель имеет четыре патрубка, служащие для подвода холодной воды и отвода нагретой. В целях уменьшения тепловых потерь между днищем корпуса и панелью проложен слой теплоизоляции из минеральной ваты. Сверху корпус накрыт листом обычного оконного или специального гелиотехнического стекла, которое по периферии коллектора проложено уплотнителем (мастика или резина) от попадания атмосферной влаги внутрь коллектора. Типичный вид такого коллектора изображен на рис. 3.6.

Габаритные размеры коллектора:

- высота – 1200 мм,
- ширина – 630 мм,
- толщина – 100 мм.

Масса сухого коллектора 50 кг, ёмкость каналов около 3 литров. Площади застеклённой поверхности $0,83 \text{ м}^2$, рабочее давление 0,6 мПа. Для работы коллектор устанавливается лицевой (застеклённой) стороной в солнечную сторону с наклоном $30-60^\circ$ по отношению к горизонтальной поверхности. К одному из нижних патрубков подводится холодная вода, из верхнего, диагонально расположенного патрубка, отводится горячая вода. Остальные два патрубка при такой схеме соединения следует заглушить. Коллектор развивает полезную мощность $550 \text{ Вт} / \text{м}^2$ при плотности потока падающей радиации $800 \text{ Вт} / \text{м}^2$ и температуре окружающего воздуха $+20^\circ \text{C}$.

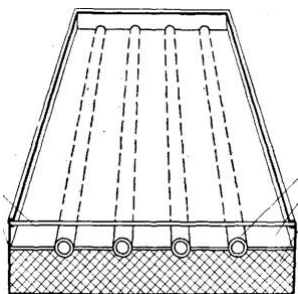


Рис. 3.6. Схема солнечного коллектора Братского завода

При таких условиях один коллектор за летний день может дать 70 – 80 литров горячей воды с температурой 50 – 55°С, что соответствует производительности плоских солнечных коллекторов до 100 литров в сутки одного квадратного метра поверхности поглощающей поверхности (абсорбера). Для вывода из полости коллектора паров воды, которые являются причиной запотевания внутренней поверхности стекла, рекомендуется проделать окно размером 3–4 см в верхней части коллектора и небольшое отверстие диаметром 1 см – в нижней части коллектора (в его днище). Такая модернизация коллектора оправдывается тем, что удаётся замедлить и приостановить коррозию при случайном попадании воды в полость коллектора при незначительной потере эффективности за счёт частичной разгерметизации внутренней полости коллектора.

3.3. Конструкционные материалы в гелиотехнике

По сравнению с обычными системами теплоснабжения солнечные установки требуют более тщательного проектирования, конструирования элементов, монтажа и эксплуатации. Для обеспечения надёжной и эффективной работы солнечных установок в течение всего расчётного периода необходимо осуществить правильный выбор гелиотехнического оборудования и материалов для его изготовления и произвести качественно работу по установке и монтажу оборудования.

Рассмотрим основные технические требования к элементам плоского солнечного коллектора и материалы, отвечающие этим требованиям.

Корпус солнечного коллектора

Корпус коллектора вмещающий абсорбер, изоляцию, трубы с теплоносителем, должен надёжно защищать их от воздействия внешней среды, предохранять от попадания влаги, пыли, вредных веществ.

Выбор материала для корпуса солнечного коллектора определяется требованиями конструктивной прочности и долговечности при всех видах атмосферного воздействия в течение срока эксплуатации, а также технической эстетики. Корпус коллектора может быть изготовлен из оцинкованного железа, алюминия, из алюминиевых сплавов с защитно декоративным анодным покрытием, коррозионно стойких и низко легированных сталей с антикоррозионными покрытиями, радиационно – и морозостойких пластмасс при условии невысокой стоимости, стеклотканей, композитных материалов, дерево специальной обработки и т.д.

Все материалы, используемые для изготовления элементов коллектора должны выдерживать максимальные и минимальные рабочие температуры

Материалы для лучепоглощающей поверхности коллектора (абсорбера).

Поглощающая панель коллектора должна обладать высокой теплопроводностью, быть стойкой к воздействию внешней коррозионных факторов иметь защитное покрытие, стойкое к воздействию солнечного излучения повышенной влажности, переменных температурных нагрузок, возникающих при эксплуатации. Трубная система абсорбера должна быть совместима с рабочими жидкостями (теплоносителями) при рабочих температурах.

Медь и сплавы на основе медь (латуни) – один из лучших материалов с точки зрения теплофизических свойств и сроков эксплуатации (до 10 лет). Можно использовать при прямых контактах с очищенной водой и безводными органическими жидкостями. Не рекомендуется их применение при высоких скоростях воды ($> 1,25 \text{ м/с}$) и при $pH > 5$.

Углеродистые стали (обычные, латунированные, с аллюмициновыми покрытиями) – удовлетворительно противостоят коррозии срок эксплуатации зависит от качества воды и составляет 1 – 5 лет. Не рекомендуется применять их в прямом контакте с необработанной водопроводной водой.

Нержавеющие коррозионно стойкие стали (12Х18Н10Т, 08Х18Т4, с добавками хрома, молибдена) – перспективные материалы, обладают хорошими теплофизическими, технологическими и весовыми характеристиками. Выбор марки стали основан на её совместимости с конкретной жидкой средой. Подвержены питтинговой коррозией под воздействием ионов хлора.

Перспективные композиционные конструкции абсорбера – панели из алюминия и медные трубы. Для низко температурных установок коммунального значения возможно применение пластмассовых коллекторов различных конструкций комбинированных гелиопрофилей из алюминиевых сплавов, которые могут применяться как элементы крыш, стен и т.п.

Материалы прозрачной изоляции солнечных коллекторов.

Прозрачная изоляция предназначена для снижения тепловых потерь плоских солнечных коллекторов и предотвращения попадания осадков внутрь его. Обычно используется один или два слоя прозрачной изоляции, реже три слоя. Могут применяться ПСК без прозрачной изоляции. Материалы прозрачного покрытия должны обладать высокой пропускательной способностью для солнечной радиации (длина волны от 0,3 до 2,5 мкм) и быть практически не прозрачными для длинноволнового (более 3,0 мкм) теплового излучения, испускаемого поверхностью абсорбера.

Наиболее удовлетворяет этим требованиям упрочнённое или обычное оконное стекло с низким содержанием окислов железа. Перспективным, но малоизученным является применение покрытий из прозрачного поликорбаната.

Материалы прозрачной изоляции должны сохранить свои свойства при температуре от -45°C до $+100^{\circ}\text{C}$ (для верхнего слоя двух – или многослойного покрытия); для внутреннего слоя прозрачной изоляции от -45°C до $+150^{\circ}\text{C}$. Материалы используемые для уплотнения наружного слоя прозрачной изоляции, должны обеспечивать влагонепроницаемость коллектора, сохранять свои свойства при температуре от -45°C до $+100^{\circ}\text{C}$, быть устойчивыми к воздействию солнечного излучения и климатических факторов.

Стекланные покрытия должны быть изолированы от металлических поверхностей с помощью резиновых П – образных двухсторонних прокладок с учётом неизбежных тепловых напряжений. Для уплотнений стекла в корпусе лучше всего подходит силиконовая резина.

Альтернативными материалами стекланным покрытиям являются полимерные (полиэтиленовые или фторсодержащие) плёнки, которые обладают существенным недостатком, связанным с реградиацией свойств под действием ультрафиолетового излучения и, как следствие, имеют малую долговечность (до 1 года).

Полимерная плёнка хорошо пропускает солнечное излучение, для повышения срока службы плёнки её необходимо специально обрабатывать с целью повышения стабильности по отношению к воздействию ультрафиолетового излучения. Плёночные покрытия требуют также специальных устройств натяжения во избежание их деформации и провисания.

Теплоизоляционные материалы для коллекторов.

Теплоизоляционный материал должен отвечать следующим требованиям:

- иметь низкий коэффициент теплопроводности и низкую плотность;
- иметь достаточно высокую температуру плавления ($\geq 180^{\circ}\text{C}$);
- иметь высокую сопротивляемость различным вредным воздействиям и влиянию погодным условиям;
- не должен выделять летучих веществ при нагреве и в процессе производства.

Характеристики некоторых наиболее употребительных конструкций коллекторов теплоизоляционных материалов приведены в таблице 3.1.

Наилучшими теплоизоляционными материалами является пенополиуретан и полистирол. Достаточно доступный материал стекловата (стекловолокно), рекомендуется применять его только в герметичной оболочке. Полистирольный пенопласт не достаточно термостойкий, может использоваться в конструкциях коллекторов не высокой эффективности, но

при условии тепловой защиты от панели, например, с помощью зазора и теплоотражающей фольги.

Таблица 3.1

Теплоизоляционные материалы

Материал	$\lambda Bm / (м \cdot K)$	$T^{\circ}C$	$\rho_{кг} / м^3$
Полистирол	0,035	80	0,02
Пенополиуретан	0,028	100	0,035
Пенопласт	0,03 ÷ 0,08	150	0,4 – 0,7
Поливинилхлорид	0,035	130	0,04 – 0,08
Минеральная вата	0,038	200	0,145
Стекловолокно	0,036	300	0,12

Теплоносители для плоских солнечных коллекторов.

В жидкостных системах горячего водоснабжения и отопления в качестве теплоносителя в солнечном коллекторе используются в основном вода или незамерзающие жидкости – антифризы на этилен – или пропиленгликоль (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Свойства теплоносителей для ПСК

Показатель	Вода	Воздух	Этилен гликоль (50%)	Пропилен гликоль (50%)	Силико новое масло	Углеводороды	
						Аромати ческие	Парафин овые
Температура замерзания $T_{зам.}^{\circ}C$	0	-	-36	-33	-	60-10	-
Температура кипения $T_{кип.}^{\circ}C$	100	-	110	106	-	180-340	-
Удельная теплёмкость C_p (кДж/кг K)	4,187	1,005	3,3	3,6	1,4-2	1,5 – 2,1	1,8 – 2,6
Теплопроводность $\lambda Bm / (м \cdot K)$	0,68	0,026	0,43	0,42	0,16	0,13	0,13
Вязкость $\nu 10^{-6} м^2 / с$	0,9	16,06	3,4	5,0	10-50	9 - 50	1 - 60

В воздушных системах применяются коллекторы, в которых нагревается воздух. Вода обладает наиболее высокими теплофизическими свойствами, но нуждается в защите от замерзания при низких температурах, Кроме того,

вода коррозионно активна по отношению к большинству конструкционных материалов. Воздух не имеет указанных выше недостатков, но его теплофизические свойства значительно уступают воде. Очевидно, размеры каналов для потоков воздуха в коллекторах и в системе теплоснабжения будут намного больше размеров конструктивных элементов жидкостных систем.

В жидкостных системах наряду с водой используются незамерзающие теплоносители (на основе этилена, пропилена и т.п.). Их недостатки – малый срок службы – (3 – 5 лет), токсичность. Менее токсичны углеводороды и силиконовое масло, однако их применение не выгодно по причине их высокой стоимости.

3.4. Основные требования, предъявляемые к конструкциям плоских солнечных коллекторов

Достаточно большой опыт проектирования, изготовления и эксплуатации установок солнечного горячего водоснабжения и отопления с плоскими солнечными коллекторами обработан и оформлен в конце двадцатого столетия (90 – 95 годы) в виде стандартов – ведомственных, государственных и международных, которые содержат ряд нормативных требований, выполнение которых обязательно для обеспечения наибольшей эффективности и долговечности установок. Примером такого стандарта может быть государственный стандарт Союза ССР ГОСТ – 28310 – 90, который распространяется на плоские солнечные коллекторы с металлической поглощающей панелью жидкостным теплоносителем, применяемые в системах с естественной и принудительной циркуляцией теплоносителя для горячего водоснабжения, тепло- или холодоснабжения коммунально – бытовых, промышленных и сельскохозяйственных объектов.

Основные требования к плоским солнечным коллекторам:

1. Число слоёв прозрачной изоляции в коллекторах не ограничивается. Допускается изготовление коллекторов без прозрачной изоляции и без тепловой изоляции по днищу (снизу).

2. Пропускательная способность относительно солнечного излучения одного слоя прозрачной изоляции при падении солнечных лучей по нормали к поверхности должна быть не менее 0,85 (пропускаемая прозрачность изоляцией доля солнечного излучения, падающего на поверхность прозрачной изоляции).

3. Степень черноты поверхности поглощающей панели с селективным поглощающим покрытием должна быть не более 0,30 (при рабочих температурах панели). Степенью черноты поверхности называется отношение интенсивности излучения поверхности к интенсивности излучения черноты тела при той же температуре.

4. Поглощательная способность поглощающей панели относительно солнечного излучения должна быть не менее 0,92 (поглощённая

поверхностью доля солнечного излучения, падающего на эту поверхность). Поглощающая панель должна быть рассчитана на рабочее давление до $0,7 \text{ МПа}$.

5. Соотношение габаритных размеров солнечного коллектора (ширина к высоте) должно лежать в диапазоне $1:1 - 1:5$. Площадь одного солнечного коллектора должна быть в пределах $0,8 \div 2,5 \text{ м}^2$. Тепловоспринимающая поверхность должна составлять не менее 0,9 от габаритной площади.

6. Удельные показатели солнечных коллекторов рассчитывают на 1 м^2 площади коллектора.

7. Удельный объём каналов поглощающей панели сборной листотрубной (труба в листе) и листотрубной (лист – труба) конструкций должен быть не более $1,8 \text{ л/м}^2$, а для иных конструкций (штампованных профилей) – не более 4 л/м^2 .

8. Коллектор должен быть влагонепроницаемым для атмосферных осадков, но должен иметь вентиляционные отверстия (снизу).

9. Удельная масса коллектора должна быть в пределах:

– для коллектора, поглощающая панель которого выполнена из низкоуглеродистой стали - 35 кг/м^2 ;

– для коллекторов, поглощающая панель которых выполнена из цветных металлов или нержавеющей стали - 25 кг/м^2 .

10. Конструкция крепления прозрачной изоляции должна предусматривать возможность её замены; срок службы коллектора должен быть не менее 10 лет, за исключением прозрачного покрытия.

11. Поглощающую панель коллектора следует изготавливать из сталей, цветных металлов и их сплавов, обеспечивающих выполнение требований стандарта в условиях эксплуатации коллектора. Использование материалов, требующих периодическую замену поглощающей панели в пределах срока службы коллектора, не допускается. Лакокрасочные покрытия поглощающей панели должны быть стойкими к воздействию внешних факторов до температуры $+150^\circ \text{C}$, а селективные покрытия до $+190^\circ \text{C}$.

Тема 4. Методика расчета плоских солнечных коллекторов

Цель: Изучение методики расчетов ПСК

Перечень рассматриваемых вопросов:

- 4.1. Уравнение баланса энергии плоского солнечного коллектора
- 4.2. Тепловые потери коллектора в окружающую среду (Q_L)
- 4.3. Полный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора
- 4.4. Определение температуры стеклянного покрытия
- 4.5. Полезная тепловая мощность коллектора (Q_U)
- 4.6. Расчёт параметров эффективности коллектора.
 - 4.6.1. Эффективность ребра коллектора (F)
 - 4.6.2. Коэффициент эффективности коллектора
 - 4.6.3. Коэффициент отвода теплоты из коллектора
 - 4.6.4. Расчет полезной мощности
 - 4.6.5. Конструкторский расчёт ПСК

4.1. Уравнение баланса энергии плоского солнечного коллектора

Режим работы коллектора описывается уравнением энергетического баланса, которое можно представить в виде:

$$S = Q_U + Q_H + Q_S \quad (4.1)$$

где: S - энергия солнечного излучения, поглощённая в абсорбере;

Q_U - тепловой поток, переданный рабочей жидкости в солнечном коллекторе (полезная тепловая энергия);

Q_H - Тепловые потери коллектора в окружающую среду путём излучения, конвенции, теплопроводности;

Q_S - тепло, аккумулируемое самим солнечным коллектором (собственная теплоёмкость).

Мерой совершенства коллектора является его коэффициент полезного действия, определяемый как отношение количества полезного тепла, полученного за некоторый период времени, к количеству энергии солнечного излучения, падающего на коллектор в течение того же периода времени:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_u + Q_H + Q_S} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{\int Q_u d\tau}{\int IR d\tau} \quad (4.2)$$

где A_k - поглощающая площадь коллектора (m^2).

Для оценки тепловой производительности и коэффициента полезного действия коллектора необходимо применить уравнения (4.1) и (4.2) к конкретной схеме коллектора и раскрыть физический смысл всех величин, входящих в указанные уравнения.

Таким путём можно определить ожидаемые характеристики коллектора. Рассмотрим левую часть уравнения баланса энергии. Энергия солнечного излучения, поглощённая абсорбером:

$$S = A_k \left([I_S \cdot R_S(\tau\alpha)]_S + [I_d \cdot R_d(\tau\alpha)] \right) \quad (4.3)$$

где A_k - площадь (поглощающая) коллектора (m^2);

I_S - площадь потока (интенсивность) прямого солнечного излучения (на горизонтальную плоскость), (Bm / m^2);

I_d - площадь потока (интенсивность) рассеянного (диффузного) солнечного излучения (на горизонтальную поверхность) (Bm / m^2);

R_S, R_d - угловые коэффициенты прямого и диффузного излучения, определяющие переход к интенсивности излучения в плоскости ориентации поверхности коллектора (под углом β);

$(\tau\alpha)_S; (\tau\alpha)_d$ - приведённая поглощательная способность системы покрытий относительно прямого и рассеянного излучения.

Методы определения и расчёта величин, входящих в выражение для S , изложены в разделах 2 и 3 настоящего пособия.

4.2. Тепловые потери коллектора в окружающую среду (Q_L)

Рассмотрим солнечный коллектор типа лист – труба, конструкция которого показана на рис. 3.3.

Для анализа и оценки распределения энергии внутри коллектора необходимо рассмотреть характер температурного поля его элементов. В общем случае температурное поле коллектора трёхмерное и его вид в значительной мере зависит от конструкции абсорбера и трубной системы. Очевидно, температура коллектора изменяется главным образом поперёк трубной системы коллектора (по оси X) и вдоль течения теплоносителя (ось Y). На рис. 4.1 изображена область между двумя трубами, длиной W .

Часть солнечной энергии, поглощаемая пластиной абсорбера, передаётся по пластине в направлении к стенке трубы путём теплопроводности. Таким образом, температура коллектора между трубами будет выше, чем около труб. Температура абсорбера на участках, расположенных над трубами, будет почти постоянной, благодаря выравнивающему влиянию трубы металла сварного шва. Жидкость (теплоноситель) нагревается под действием

солнечной энергии, в ней возникает градиент температуры в направлении течения.

На любом участке коллектора общий уровень температуры определяется уравнением местной температуры жидкости, иначе – энергией теплоносителя в данной точке.

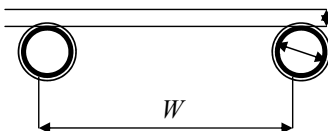


Рис. 4.1. Расстояние между трубками коллектора

На рис. 3.9, в, г представлены распределения температуры в направлении оси X при любом значении Y и в направлении оси Y при любом значении X соответственно. Температура вдоль коллектора изменяется по экспоненте и на выходе из коллектора достигает наибольшего значения. Анализ зависимости температуры абсорбера от расхода теплоносителя показывает, что снижение расхода теплоносителя ведёт к повышению температуры во всей площади коллектора. Если расход теплоносителя равен нулю, то в этом случае вся поглощённая солнечная энергия передаётся в окружающую среду, наступает термодинамическое равновесие. При этом равновесная температура будет иметь максимально возможное значение, одинаковое по всей площади абсорбера. Значение этой равновесной температуры характеризует совершенство гелиоколлектора и может выполнять роль косвенного критерия при сравнении различных коллекторов.

Смежное температурное поле абсорбера можно существенно упростить, приняв ряд допущений, не искажая физическую сущность процесса. Эти допущения следующие:

1. Режим работы стационарный.
2. Рассматривается конструкция лист – труба.
3. Распределение теплоносителя по параллельным каналам коллектора – равномерное.
4. Тепловые потоки через верхнее покрытие и стенки коллектора являются одномерными.
5. Градиенты температур в направлении потока (по оси Y) и между трубами (по оси X) могут рассматриваться независимо друг от друга.
6. Свойства материалов не зависят от температуры.
7. Запыление и загрязнение коллектора не учитывается.

4.3. Полный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора

Для упрощения расчётов и анализа эффективности различных конструкций плоских солнечных коллекторов целесообразно ввести понятие полного коэффициента потерь солнечного коллектора на номинальном рабочем режиме. Полный коэффициент потерь соответствует коэффициенту теплоотдачи, учитывающему все теплофизические процессы, определяющие потери тепловой энергии коллектора через верхнюю (стеклянную) поверхность Q_B , через нижнюю поверхность Q_H и через боковые поверхности $Q_{\text{б}}$. Рассмотрим принципиальную схему коллектора с одним покрытием.

Общие тепловые потери коллектора:

$$Q_L = Q_B + Q_{\text{б}} + Q_H \quad (4.4)$$

По классическим законам термодинамики каждую из составляющих формулы (4.4) можно выразить в виде:

$$Q_i = \alpha_i \Delta T \cdot A_k [Bm] \quad (4.5)$$

где α_i (или U_i) – коэффициент теплоотдачи соответственно по направлению вверх (α_B), через боковые поверхности ($\alpha_{\text{б}}$), через нижнюю поверхность (α_H), $[Bm / m^2 \cdot K]$;

ΔT – разность температур элемента конструкции коллектора (абсорбера, стеклянного покрытия, теплоносителя) и окружающей среды $[K]$;

A_k – площадь абсорбера $[m^2]$.

Потери через нижнюю поверхность коллектора определяются теплопередачей от абсорбера к окружающей среде через теплоизоляцию высотой $L_{\text{из}}$. (материал теплоизоляции имеет теплопроводность λ). Если конвективными потерями через контакт воздуха с днищем коллектора пренебречь, то условный коэффициент теплоотдачи через днище:

$$U_H = \alpha_H = \frac{\lambda}{L_{\text{из}}} \left[\frac{Bm}{m^2 \cdot K} \right] \quad (4.6)$$

Потери через днище:

$$Q_H = \alpha_H \cdot A_{\text{дн.}} \cdot (T_{\text{П}} - T_0) [Bm] \quad (4.7)$$

где $A_{\text{дн.}}$ - площадь днища, равная площади коллектора, м^2 ;
 $T_{\text{П}}$ - температура абсорбера, K ;
 T_0 - температура окружающей среды, K .

Потери через боковую поверхность можно определить аналогичным образом, принимая толщину изоляции боковой поверхности равной толщине изоляции нижней поверхности, плотность теплового потока Q_B по периметру Π коллектора постоянной.

При этих условиях

$$U_B = \alpha_B = \frac{\lambda_{\text{из}} \cdot \Pi \cdot h_{\text{бок}}}{A_k \cdot L} \left[\frac{Bm}{\text{м}^2 \cdot K} \right] \quad (4.8)$$

где Π - периметр плоского солнечного коллектора;

$h_{\text{бок}}$ - высота коллектора;

A_k - площадь коллектора

L - толщина слоя изоляции.

Соответственно потери теплоты через боковые поверхности:

$$Q_B = \alpha_B \cdot \Pi \cdot h_{\text{бок}} \cdot (T_{\text{П}} - T_0) [Bm] \quad (4.9)$$

Потери Q_B составляют 1 – 2% от общих потерь, обычно их добавляют к общей сумме потерь вверх.

Потери через верхнюю поверхность солнечного коллектора обусловлены:

- излучением между абсорбером и стеклом,
- излучением от внешнего стекла конвекцией между параллельными пластинами (в зазоре между абсорбером и стеклом),
- конвекцией от внешнего стекла (рис. 3.3).

$$Q_v = Q_{r, \text{П-C}} + Q_{\text{П-C}} + Q_{\text{П-C}} + Q_{r, \text{C-a}} + Q_{\text{C-a}} \quad (4.10)$$

Соответственно, условный коэффициент теплоотдачи потерь вверх:

$$\alpha_B = U_B = \alpha_{r, \text{П-C}} + \alpha_{\text{П-C}} + \alpha_{r, \text{C-a}} + \alpha_{\text{C-a}} \quad (4.11)$$

Формулу (4.10) удобно выразить через термические сопротивления двух элементов коллектора воздушного зазора между абсорбером (пластиной) и стеклом (R_1) и контакта наружного стекла с атмосферой (R_2). Напомним,

что термическое сопротивление любого элемента равно величине, обратной коэффициенту теплоотдачи (теплопередачи) ($R = \alpha^{-1}$). Тогда термическое сопротивление зазора между абсорбером и стеклом:

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_{П,С} + \alpha_{r,П-С}} \quad (4.12)$$

а термическое сопротивление от внешней поверхности стекла

$$R_2 = \frac{1}{\alpha_{С-a} + \alpha_{r,С-a}} \quad (4.13)$$

Исходную формулу для U_ϵ можно выразить через R_1, R_2 , имея в виду последовательное соединение термических сопротивлений:

$$R = R_1 + R_2 = \frac{1}{U_\epsilon} \quad (4.14)$$

Подставив (4.12), (4.13) в формулу (4.14) получим:

$$\alpha_B = U_B = \frac{1}{R} = \left[\frac{1}{\alpha_{П,С} + \alpha_{r,П-С}} + \frac{1}{\alpha_{С-a} + \alpha_{r,С-a}} \right]^{-1} \quad (4.15)$$

где U_ϵ - коэффициент тепловых потерь вверх, учитывающий все виды потери теплоты, $\left[\frac{Вт}{м^2 \cdot К} \right]$;

$\alpha_{П-С}$ - коэффициент теплоотдачи конвекцией в зазоре между абсорбером (пластиной) и стеклом;

$\alpha_{r,П-С}$ - коэффициент теплоотдачи радиационного теплообмена (излучением) между абсорбером (пластиной) и стеклом;

$\alpha_{С-a}$ - коэффициент теплоотдачи конвективного теплообмена внешнего стекла с атмосферой;

$\alpha_{r,С-a}$ - коэффициент теплоотдачи и радиационного теплообмена внешнего стекла с атмосферой.

Рассмотрим каждую составляющую потерь теплоты в верхнем направлении.

Коэффициент конвективного теплообмена между параллельными пластинами под углом до 45° в пределах $10^4 < 6r < 10^7$ может быть определён критериальным уравнением:

$$Nu = 0,093(6r)^{0,310} \quad (4.16)$$

Переходя к размерному виду, получим:

$$\alpha_{1-} = 1,14 \frac{\Delta T^{0,310}}{L^{0,070}} \quad (4.17)$$

где L - расстояние между параллельными пластинами, см;

$\Delta T = T_{\Pi} - T_C$ - разность температур пластины (абсорбера) и стекла.

Формулы (4.16), (4.17) получены для средней температуры воздуха в зазоре $t = 10^\circ C$. Изменение свойств среды, при средней расчётной температуре среды $\bar{t}$, выражается формулой:

$$\frac{\alpha_t}{\alpha_{10}} = 1 - 0,0018(\bar{t} - 10) \quad (4.18)$$

$$\text{где } \bar{t} = \frac{t_{\Pi} + t_C}{2};$$

$$\alpha_{\Pi-C} = \alpha_t = \alpha_{10} [1 - 0,0018(t - 10)] \cdot \frac{Bm}{m^2 \cdot K} \quad (4.19)$$

Коэффициенты теплопередачи излучением от пластины к стеклу $\alpha_{r,\Pi-C}$, а также от стекла к небосводу $\alpha_{r,C-a}$ определяются из решения уравнений Стефана – Больцмана, где удельный тепловой поток излучения представляется в форме зависимости от T^4 степени черноты $\varepsilon_{\Pi}, \varepsilon_C, \varepsilon_a$ и постоянной Стефана – Больцмана δ :

$$q_{r,П-C} = \frac{\delta(T_{П}^4 - T_C^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{П}}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_C}\right) - 1} \quad (4.20)$$

Приведём эту формулу к линейному виду:

$$q_{r,П-C} = \alpha_{r,П-C}(T_{П} - T_C) \quad (4.21)$$

тогда условный коэффициент теплоотдачи радиацией:

$$\alpha_{r,П-C} = \frac{\delta(T_{П} + T_C) \cdot (T_{П}^2 + T_C^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{П}}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_C}\right) - 1} \quad (4.22)$$

Радиационные потери верхнего покрытия в атмосферу по аналогии определяются коэффициентом теплопередачи (от стекла к атмосфере):

$$\alpha_{r,C-a} = \varepsilon_C \delta(T_{П}^2 + T_C^2) \cdot (T_{П} + T_C) \quad (4.23)$$

Коэффициент теплопередачи конвекцией от верхнего стекла к окружающей среде в значительной степени определяется скоростью ветра над коллектором и может быть вычислен по формуле:

$$\alpha = \alpha_{C-a} = 5,7 + 3,8V, \frac{Bm}{m^2 \cdot K} \quad (4.24)$$

Подставляя значения расчётных коэффициентов теплоотдачи в формулу (4.15) получим коэффициент теплоотдачи плоского солнечного коллектора (потерь в верхнем направлении) U_B (или α_B).

Полный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора равен:

$$U_L = U_H + U_B + U_{B, \left[\frac{Bm}{m^2 \cdot K} \right]} \quad (4.25)$$

Коэффициент U_L является одной из важнейших объективных характеристик эффективности коллектора и его экономичности. Задача инженера проектирующего коллектор, заключается в том чтобы добиваться наименьшей величины этого коэффициента, значение которого отнесено к единице площади коллектора. Абсолютные тепловые потери для конкретной конструкции коллектора на номинальном режиме:

$$Q_L = Q_H + Q_B + Q_{B'} = U_H \cdot A_k \cdot \Delta T_1 + U_B \cdot A_k \cdot \Delta T_2 + U_{B'} \cdot A_k \cdot \Delta T_3, [Bm] \quad (4.26)$$

где $\Delta T_1, \Delta T_2, \Delta T_3$ - разности температур элементов коллектора и окружающей среды.

Основным элементом плоского коллектора является абсорбер (поглощающая пластина), тогда формулу (4.26) можно записать в виде:

$$Q_L = U_H \cdot A_k (T_{\Pi} - T_a), [Bm] \quad (4.27)$$

где T_{Π} - температура абсорбера (пластина)

T_a - температура внешней среды (атмосферы)

4.4. Определение температуры стеклянного покрытия

Формулы, определяющие U_B потери в верхней части коллектора, содержат два важнейших параметра – температуру абсорбера T_{Π} и температуру стекла T_C . Средняя температура абсорбера обычно задаётся, а температура стеклянного покрытия может быть определена методом последовательного приближения. В воздушном зазоре между пластиной и стеклом поток тепловой энергии от пластины к стеклу равен потоку энергии от пластины в окружающую среду:

$$(T_{\Pi} - T_C) \cdot (\alpha_{\Pi-C} + \alpha_{r,\Pi-a}) = U_B (T_{\Pi} - T_a) \quad (4.28)$$

Тогда температура стекла

$$T_C = T_{\Pi} - \frac{U_B(T_{\Pi} - T_a)}{\alpha_{\Pi, C} + \alpha_{r, \Pi-C}} \quad (4.29)$$

Метод расчёта состоит в том, что произвольно задаётся температура стекла T_C и рассчитываются коэффициенты $\alpha_{\Pi-C}, \alpha_{C-a}, \alpha_{r, \Pi-C}, \alpha_{r, C-a}$ и наконец, U_B - в первом приближении. Результаты этих расчётов используются затем для вычисления T_C по приведённому выше уравнению (4.29).

Если полученное значение T_C близко (в пределах $\pm 5\%$) к начальному выбранному значению, то нет необходимости в дальнейших расчётах. В противном случае полученное значение T_C принимается за исходное, и процесс вычисления повторяется (второе приближение).

Многостекольное покрытие. Потери энергии верхним стекольным покрытием в окружающую среду равны количеству энергии, переносимому от пластины с температурой T_{Π} к первому стеклянному покрытию T_{C_1} и далее к покрытию T_{C_2} . Термическое сопротивление зазора между пластиной и первым стеклом R_1 мы умеем вычислять (4.12). Допуская, что степени черноты пластины и стекла примерно одинаковы (для неселективных коллекторов), можно принять, что термическое сопротивление зазора между пластиной и стеклом равно сопротивлению между первым и вторым стеклом, тогда коэффициент теплоотдачи через пространство между первым и вторым стеклом:

$$\alpha_{1,2} = \alpha_{C_1-C_2} + \alpha_{r, C_1-C_2} \quad (4.30)$$

а термическое сопротивление пространства между стеклами (параллельными пластинами):

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_{1,2}} = \frac{1}{\alpha_{C_1-C_2} + \alpha_{r, C_1-C_2}} \quad (4.31)$$

Формула для тепловых потерь в верхнем направлении для двух стекольного покрытия:

$$U_B = \left(\frac{1}{\alpha_{\Pi-C} + \alpha_{r, \Pi-C}} + \frac{1}{\alpha_{C_1-C_2} + \alpha_{r, C_1-C_2}} + \frac{1}{\alpha_{C_2-a} + \alpha_{r, C_2-a}} \right)^{-1} \quad (4.32)$$

Конвективные коэффициенты $\alpha_{C_1-C_2}$ и радиационные α_{r,C_1-C_2} для зазора между стёклами вычисляются по приведённым выше методикам.

4.5. Полезная тепловая мощность коллектора (Q_u)

Плоский солнечный коллектор в составе установки горячего водоснабжения и отопления работает в широком диапазоне условий в течение года. В некоторых случаях рабочий режим характеризуется высокой температурой и низкой эффективностью коллектора, в других случаях, наоборот, низкой температурой и высокой эффективностью. Поэтому в гелиотехнике следует выделять характеристики эффективности коллектора в данный момент времени, зависящие от метеорологических и рабочих условий в данный момент, - мгновенные характеристики коллектора.

Для рассмотрения работы коллектора при переменных условиях за достаточно длительный период (месяц, сезон, год) необходимо определить зависимость его мгновенных характеристик от метеорологических и режимных факторов и учесть эти зависимости для определения долгосрочных характеристик эффективности коллектора и в целом систем солнечного теплоснабжения и горячего водоснабжения. В дальнейшем мы рассмотрим идеи и методы, позволяющие решать такие задачи.

В этом же разделе мы рассматриваем мгновенные характеристики эффективности плоского солнечного коллектора.

Полезная энергия, отводимая из коллектора в данный момент времени, - это разность количества солнечной энергии, поглощённой пластиной коллектора S и количества энергии, теряемой в окружающую среду $U_L \cdot \Delta T$.

Уравнение, которое применимо для расчёта почти всех существующих конструкций плоского коллектора, имеет вид:

$$Q_u = A_k [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_{\Pi} - T_a)] \quad (4.32)$$

$$Q_u = A_k [(I_S(\tau\alpha)_S + I_d(\tau\alpha)_d) - U_L(T_{\Pi} - T_a)] \quad (4.33)$$

где Q_u - полезная энергия, отводимая из коллектора в единицу времени, Дж/с или Вт;

A_k - площадь коллектора, м²;

I, I_S, I_d - плотности потока солнечной радиации в плоскости коллектора (с учётом угловых коэффициентов R, R_S, R_d) соответственно для полной, прямой и диффузной составляющих, Вт/м²;

(τ_a) приведённая поглощательная способность прозрачных покрытий и пластин абсорбера;

U_L - полный коэффициент тепловых потерь коллектора, Вт/(м² · К);

T_{Π} - температура пластины (абсорбера), К;

T_a - температура окружающей среды, К.

В процессе испытаний плоских солнечных коллекторов, которые выполняются по стандартизованным методикам при выполнении условий, максимально приближённым к реальным условиям их работы, полезную энергию коллектора определяемой классическим отражением:

$$Q_u = A_k \cdot G \cdot C_p (T_2 - T_1) \quad (4.34)$$

где G - расход жидкости на 1 м² площади коллектора кг/м²;

C_p - удельная теплоёмкость теплоносителя, Дж / кг · К;

T_2 - температура теплоносителя на выходе из коллектора в расчётном режиме;

T_1 - температура теплоносителя на входе в коллектор в расчётном режиме.

Эффективность коллектора в общем случае определяется мгновенным КПД:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_k \cdot I_T} \quad (4.35)$$

Уравнения (4.32), (4.33) не очень удобны для расчёта солнечных энергетических систем, поскольку полезная энергия определяется по температуре абсорбера (пластины) T_{Π} , которую невозможно задать однозначно без предварительной расчётной оценки. Более определённым показателем является температура жидкости на входе в коллектор T_1 , которая может быть задана предварительно и легко измеряется при испытанных коллекторов.

Однако, температура абсорбера T_{Π} всегда выше температуры жидкости на входе T_1 , следовательно и потери U_L будут зависеть именно от фактической температуры абсорбера T_{Π} .

Для согласования формул (4.32), (4.33), (4.34) при условии замены температуры абсорбера T_{Π} на температуру жидкости на входе в коллектор T_1 (на расчётном режиме) вводится коэффициент отвода теплоты из коллектора F_R , тогда формулы (4.32), (4.33) приобретают вид:

$$F_R = \frac{A_k \cdot G \cdot C_p (T_2 - T_1)}{A_k [I_T(\tau\alpha) - U_L (T_{\Pi} - T_a)]} \quad (4.36)$$

$$Q_u = F_R A_k [I_T(\tau\alpha) - U_L (T_{\Pi} - T_a)] \quad (4.37)$$

Из анализа этих формул очевиден физический смысл коэффициента отвода теплоты F_R : это отношение фактической полезной энергии коллектора Q_u , когда температура жидкости в коллекторе увеличивается по направлению потока от T_1 до T_2 (числитель формулы для F_R) к полезной энергии коллектора (условной), когда температура всей поглощающей пластины (абсорбера) равна температуре жидкости на входе T_1 (знаменатель формулы для F_R). Полный коэффициент потерь $U_L = f(T)$ будет намного меньше фактического (при T_{Π}), а значение коэффициента $F_R < 1$.

Коэффициент F_R зависит от расхода жидкости через коллектор, конструкции абсорбера и свойств материала солнечного коллектора, расчёт этого коэффициента на стадии проектирования будет предметом нашего дальнейшего изучения тепловых процессов в коллекторе.

С учётом формулы (4.37), мгновенная эффективность коллектора:

$$\eta = \frac{Q_u}{I_T \cdot A_k} = F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R \cdot U_L (T_1 - T_2)}{I_T} \quad (4.38)$$

При условии $U_L = const$ зависимость коэффициента полезного действия η от параметра $\frac{T_1 - T_a}{I_T}$ линейна, причём угловой коэффициент прямой равен $(-F_R U_L)$, а координата точки пересечения с вертикальной осью составляет $F_R(\tau\alpha)$. Это наиболее удобная форма представления экспериментальных данных, поскольку значения $F_R U_L$ и $F_R(\tau\alpha)$ меняются незначительно и

необходимы для расчёта долгосрочных характеристик систем солнечного теплоснабжения.

При проектировании нового солнечного коллектора значение коэффициента F_R можно получить только расчётным путём. Рассмотрим методы такого расчёта.

4.6. Расчёт параметров эффективности коллектора.

4.6.1. Эффективность ребра коллектора (F)

Рассмотрим систему лист – труба, изображённую на рис. 4.2. Расстояние между трубами W , диаметр трубы D , толщина абсорбера δ . Локальная базовая температура листа (абсорбера) на участке над трубой, равна T_g . Расстояние между средней линией, разделяющей трубы, и основанием трубы $\frac{W-D}{2}$ называется ребром коллектора. Теплопроводность ребра λ по отношению к плотности потока солнечной энергии определяет количество тепловой энергии, которая передаётся ребром прямоугольного сечения к основанию трубы с теплоносителем.

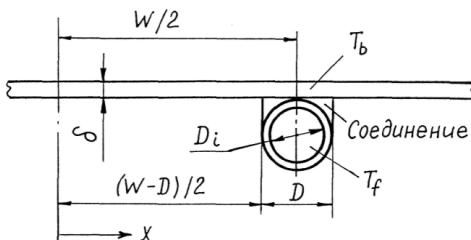


Рис. 4.2. Расчет ребра коллектора (лист и труба)

Определение поля температур между трубами рассматривается как классическая задача теплопроводности прямоугольного ребра.

Применительно к нашему случаю, уравнение теплопроводности по ребру имеет вид:

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} - m^2\psi = 0 \quad (4.39)$$

где

$$m^2 = \frac{U_L}{\lambda \cdot \delta} \quad (4.40)$$

$$\psi = T - T_a - \frac{S}{U_L} \quad (4.41)$$

Решение этого дифференциального уравнения относительно плотности теплового потока через основание ребра на единицу длины трубы в соответствии с законом Фурье:

$$q'_{\text{осн. ребра}} = (W - D) \cdot F [S - U_L (T_{\text{с}} - T_a)] \quad (4.42)$$

где $T_{\text{с}}$ - температура основания ребра;

F - эффективность прямого ребра прямоугольного профиля.

$$F = \frac{th[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (4.43)$$

Коэффициент F зависит от геометрических размеров и формы абсорбера (δ, W, D) , от теплопроводности ребра (λ) и общего коэффициента тепловых потерь (U_L) , определяет эффективность материала абсорбера по передаче теплоты солнечного излучения к основанию трубы с теплоносителем.

4.6.2. Коэффициент эффективности коллектора

Плотность теплового потока $q'_{\text{осн. ребра}}$ не учитывает тепловую энергию, поглощаемую непосредственно над трубой диаметром D , эта составляющая общего поглощаемого теплового потока будет равна (исходя из простых геометрических соотношений).

$$q'_{\text{трубы}} = D [S - U_L (T_{\text{с}} - T_a)] \quad (4.44)$$

Таким образом, поглощённая коллектором полезная энергия на единицу длины в направлении потока жидкости равна:

$$q'_u = q'_{осн. ребра} + q'_{трубы} \quad (4.45)$$

$$q'_u = [(W - D) \cdot F + D] \cdot [S - U_L(T_c - T_a)] \quad (4.46)$$

В конечном счёте тепло передаётся жидкости (теплоносителю), который протекает внутри трубы коллектора. Сопротивление (термическое) переноса теплоты к теплоносителю состоит из сопротивления соединения листа с трубой R_g (сварка, пайка, струбцина, крепление проволокой и т.п.) и сопротивления переносу тепла от внутренней стенки трубы к жидкости (конвекция) R_α . Проводимость соединения листа абсорбера с трубой C_g можно оценить, если известен коэффициент теплопроводности λ_g , средняя толщина слоя контакта δ_g и длина соединения B (в поперечном сечении коллектора):

$$C_g = \frac{\lambda_g \cdot B}{\delta_g} \quad (4.47)$$

При надёжном контакте трубы и пластины сопротивления $R_g = C_g^{-1}$ не должно превышать $0,03(\text{м} \cdot \text{град}) / \text{Вт}$.

Проводимость теплоты внутри трубы (конвекция) определяется выражением:

$$C_\alpha = \alpha_{жс} \cdot \pi D \quad (4.48)$$

где $\alpha_{жс}$ - коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к жидкости (конвекция); D - внутренний диаметр трубы.

Общее термическое сопротивление от абсорбера к жидкости:

$$R = R_\alpha + R_g = \frac{1}{C_\alpha} + \frac{1}{C_g} = \frac{1}{\alpha_{жс} \cdot \pi D} + \frac{1}{C_g} \quad (4.49)$$

Полезная тепловая энергия, переданная теплоносителю и общее термическое сопротивление связаны соотношением:

$$q'_u = \frac{T_g - T_{жс}}{R_\alpha + R_g} = \frac{T_g - T_{жс}}{\frac{1}{\alpha_{жс} \cdot \pi D} + \frac{1}{C_g}} \quad (4.50)$$

Решая это уравнение относительно температуры основания ребра T_{ϵ} , и подставив результат в формулу (4.46), получим:

$$q'_u = W \cdot F' \cdot [S - U_L(T_f - T_a)] \quad (4.51)$$

Коэффициент F' получил название коэффициента эффективности коллектора (эффективность коллектора):

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left[\frac{1}{U_L [D + (W - D) \cdot F]} + \frac{1}{C_{\epsilon}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ж}} \cdot \pi D} \right]} \quad (4.52)$$

Для большинства геометрических схем коллектора физический смысл параметра F' можно объяснить так: знаменатель уравнения представляет собой сопротивление переносу теплоты от жидкости к окружающему воздуху $R_0 = \frac{1}{U_0}$. С другой стороны, числитель представляет собой сопротивление переносу теплоты от поглощающей пластины коллектора к окружающему воздуху $R_n = \frac{1}{U_L}$, тогда:

$$F' = \frac{U_0}{U_L} \quad (4.53)$$

Иначе говоря, коэффициент F' отражает соотношение термического сопротивления от пластины к воздуху к термическому сопротивлению от жидкости к окружающему воздуху.

В другой трактовке U_0 - общий условный коэффициент теплоотдачи от жидкости к окружающему воздуху, U_L - хорошо известный нам общий коэффициент теплопотерь от абсорбера в окружающую среду. Оба эти коэффициента однозначно зависят от эффективности принятых конструктивных решений. Наиболее существенными переменными для F' является температуры $T_{\epsilon}, T_{\text{ж}}$, эффективность ребра F . Коэффициент F' для конкретных конструкций коллектора является практически постоянной величиной. При расчётах F' коэффициент теплоотдачи внутри труб $\alpha_{\text{ж}}$ рекомендуется принимать равным либо $300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ для свободного движения (естественная циркуляция), либо $1500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град})$ для вынужденного движения (принудительная циркуляция).

4.6.3. Коэффициент отвода теплоты из коллектора

В разделе 3 определено, что полезная тепловая мощность плоского солнечного коллектора определяется формулой:

$$Q_u = A_k \cdot F_R [S - U_L (T_1 - T_a)] \quad (4.54)$$

где F_R - коэффициент отвода теплоты из коллектора.

$$F_R = \frac{G \cdot C_p (T_2 - T_1)}{[S - U_L (T_1 - T_a)]} \quad (4.55)$$

где G - расход жидкости на единицу площади коллектора, все остальные параметры определены ранее.

Коэффициент F_R можно представить в виде:

$$F_R = \frac{G \cdot C_p}{U_L} \frac{T_2 - T_1}{\frac{S}{U_L} (T_1 - T_a)} \quad (4.56)$$

или

$$F_R = \frac{G \cdot C_p}{U_L} \left[1 - \frac{\frac{S}{U_L} (T_2 - T_a)}{\frac{S}{U_L} (T_1 - T_a)} \right] \quad (4.57)$$

С учётом экспоненциального характера изменения температуры, от T_1 до T_2 (от входа в коллектор до выхода), коэффициент F_R будет иметь вид:

$$F_R = \frac{G \cdot C_p}{U_L} \left(1 - e^{-U_L F' / G \cdot C_p} \right) \quad (4.58)$$

С помощью уравнений (4.54), (4.56), (4.58) величина Q_u может быть рассчитана в функции температуры жидкости на входе в коллектор (T_1).

Представление полезной энергии в форме (4.54) удобно для расчётов и для исследования солнечных энергетических установок, поскольку температура жидкости на входе (в расчётном режиме работы) обычно известна. Однако, необходимо иметь в виду, что потери вычисленные по температуре T_1 (на входе) слишком малы и отличаются от реальных,

поскольку тепло теряется по всей длине коллектора, а температура жидкости в направлении потока непрерывно увеличивается ($\partial \theta T_2$). Множитель F_R является поправкой, уменьшающей значение полезной энергии, вычисленное при условии, что вся поверхность коллектора находится при температуре входа T_1 , до фактического значения полезной энергии. С увеличением расхода жидкости через коллектор G перепад температур ($T_2 - T_1$) уменьшается. Это приводит к снижению потерь тепла в окружающую среду и соответствующему увеличению полезной энергии, поскольку средняя температура коллектора уменьшается.

Увеличение полезной энергии с возрастанием жидкости проявляется в увеличении коэффициента F_R . Заметим, что коэффициент F_R никогда не может быть больше коэффициента эффективности коллектора F' .

4.6.4. Расчет полезной мощности и производительности ПСК

Полезная расчётная мощность ПСК, согласно (4.37), определяется как:

$$Q_{\Pi} = A \cdot F_R [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_1 - T_a)], \quad \text{Вт}$$

Соответственно ожидаемый мгновенный коэффициент полезного действия ПСК:

$$\eta = \frac{Q_{\Pi}}{IR \cdot A},$$

Суточная производительность ПСК (по горячей воде)

$$G^* = \frac{Q_U \cdot 3600 \cdot t_{\text{эф.}}}{C_p \cdot \Delta T},$$

где: Q_U – среднесуточная тепловая мощность ПСК;

$t_{\text{эф.}}$ – эффективное солнечное время (7 – 8 часов) (время работы ПСК);

ΔT – температура нагрева теплоносителя ($\Delta T = T_{\text{ГВ}} - T_{\text{ХВ}} = T_2 - T_1$).

4.6.5. Конструкторский расчёт ПСК

По заданным исходным значениям диаметров вертикальных труб (d_B) и горизонтальных (d_{Γ}) определим количество вертикальных труб. Порядок расчёта:

1. Площадь сечения трубы (вертикальной):

$$S_B = \frac{\pi d_B^2}{4} \cdot L_B \quad (\text{см}^2),$$

2. Объём воды в вертикальной трубе:

$$V_B = \frac{\pi d_B^2}{4} \cdot L_B \quad (\text{см}^3),$$

L_B - длина вертикальной трубы.

3. Площадь сечения горизонтальной трубы:

$$S_\Gamma = \frac{\pi d_\Gamma^2}{2} \cdot B_\Gamma \quad (\text{см}^2),$$

4. Объём воды в горизонтальной трубе:

$$V_\Gamma^* = \frac{\pi d_\Gamma^2}{2} \cdot B_\Gamma \quad (\text{см}^3),$$

5. Общий объём воды в двух горизонтальных трубах:

$$V_\Gamma = 2V_\Gamma^* \cdot (\text{см}^3),$$

6. Максимальное количество труб в коллекторе, исходя из обеспечения удельного объёма каналов $(1,8 \div 2,5) \text{ л/м}^2$

$$N_B = \frac{(1,8 \div 2,5) \cdot A - V_\Gamma}{V_B} \text{ шт.}$$

7. Минимальное расстояние между трубами:

$$L^{\min} = \frac{B}{N_B} \quad (\text{см}),$$

B - ширина коллектора (дм).

Глава 5. Методика расчета активных систем солнечного горячего водообеспечения и отопления

Цель: Изучение методики расчета установок и систем солнечного горячего теплоснабжения и водообеспечения (УСГВ, СТС, СГВ).

Перечень рассматриваемых вопросов:

5.1. Классификация и состав систем солнечного теплоснабжения

5.2. Основные конструктивные схемы активных установок солнечного теплоснабжения

5.3. Методика расчёта установок солнечного теплоснабжения с естественной циркуляцией теплоносителя

5.4. Методика расчёта установок солнечного теплоснабжения с принудительной циркуляцией теплоносителя

5.5. Методические рекомендации по расчетам установок солнечного горячего теплоснабжения и водообеспечения

5.1. Классификация и состав систем солнечного теплоснабжения

По способу использования солнечной радиации системы солнечного низкотемпературного теплоснабжения подразделяют на пассивные и активные.

Пассивными называются системы солнечного теплоснабжения (отопления), в которых в качестве элемента, воспринимающего солнечную радиацию и преобразующего его в теплоту, служат само здание или его отдельные ограждения (здание, стена, кровля и т.п.).

Активными называются системы солнечного теплоснабжения (СТС) или установки солнечного горячего водоснабжения (УСГВ), в которых гелиоприёмник (коллектор) является самостоятельным отдельным устройством, не относящимся к зданию.

Активные гелиосистемы разделяются:

- по назначению (системы горячего водоснабжения, отопления, комбинированные);
- по виду теплоносителя (жидкостные – вода, антифриз и воздушные);
- по продолжительности работы (круглогодичные, сезонные);
- по техническому решению схем (одно-, двух-, многоконтурные), с естественной циркуляцией теплоносителя, с принудительной циркуляцией теплоносителя.

Сезонные гелиосистемы горячего водоснабжения функционируют в летние и переходные месяцы, в периоды с положительной температурой наружного воздуха. Могут иметь дополнительный источник теплоты (дублёр) или обходится без него в зависимости от назначения обслуживаемого объекта и условий эксплуатации.

Гелиосистемы отопления зданий комбинированные (круглогодичные) обычно двухконтурные или многоконтурные, причём для разных контуров могут применяться различные теплоносители (водные растворы, антифризы, вода), включают дополнительный источник теплоты (традиционный теплогенератор на органическом топливе или электрический нагреватель).

5.2. Основные конструктивные схемы активных установок солнечного теплоснабжения

Для установок солнечного теплоснабжения следует применять плоские проточные солнечные коллекторы с одинарным или двойным остеклением.

Установки солнечного теплоснабжения с естественной циркуляцией как правило следует применять при площади солнечных коллекторов до 10 м^2 .

Гелиоустановки с естественной циркуляцией теплоносителя

Гелиоустановки с естественной циркуляцией теплоносителя в контуре гелиоколлектора имеют достаточно широкое распространение благодаря простой конструкции, автономности работы и простоте эксплуатации. Принципиальные схемы таких установок приведены на рис. 5.1.

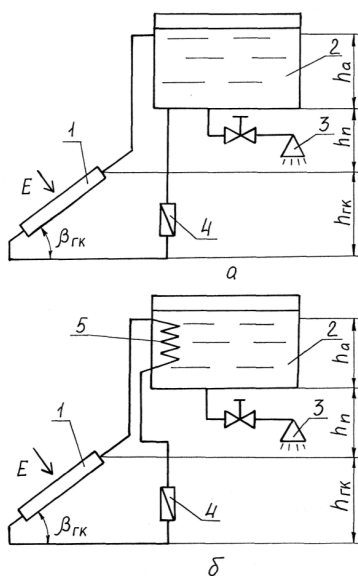


Рис. 5.1. Установка солнечного горячего водоснабжения на естественной циркуляции теплоносителя: а) – одноконтурная; б) двухконтурная.

В составе установки имеется гелиоколлектор (1), бак-аккумулятор (2), расходный трубопровод с потребителем (3), обратный клапан (4), теплообменник (5).

В таких установках бак-аккумулятор размещается выше гелиоколлектора на 0,8–1,0 м для обеспечения естественной циркуляции теплоносителя. После восхода Солнца постепенно нагревается вода в гелиоколлекторе (плоском солнечном коллекторе) и её массовая плотность в подъёмном трубопроводе будет меньше, чем массовая плотность воды в баке-аккумуляторе и в опускном трубопроводе.

Благодаря этому возникает полезный напор естественной циркуляции (разность давлений):

$$\Delta\rho = h_n(\gamma_{хол.} - \gamma_{гор.})$$

где: h_n - расстояние между гелиоколлектором и баком-аккумулятором по высоте;

$\gamma_{хол.}, \gamma_{гор.}$ - удельный вес холодной и горячей воды.

Величина полезного напора зависит от разности удельных весов воды в ветвях установки и относительного размещения бака-аккумулятора и плоского солнечного коллектора h_n . В контуре гелиоколлектора предусмотрен обратный клапан (4) для предупреждения обратной циркуляции, открывается этот клапан только в одну сторону по ходу теплоносителя. После полудня интенсивность солнечной радиации уменьшается, температура воды в коллекторе снижается, циркуляция теплоносителя постепенно снижается и, наконец, прекращается.

Такой гелиосистеме присуще собственное саморегулирование: увеличение температуры воды в ПСК вызывает увеличение расхода теплоносителя через него, а это в свою очередь приводит к снижению температуры воды. Это обстоятельство существенно усложняет выполнение проектных расчётов подобных установок.

Гелиоустановки с принудительной циркуляцией теплоносителя

Схемы гелиоустановок с принудительной циркуляцией представлены на рис. 5.2.

В составе установок должна быть система автоматического управления (АСУ), которая обеспечивает постоянство температуры горячей воды на выходе из бака-аккумулятора за счёт своевременного подключения дублирующего источника энергии.

По мере нагрева гелиоколлектора одноконтурной системы температура воды в нём повышается и становится равной температуре воды в баке-аккумуляторе. АСУ включает циркуляционный насос и начинается процесс

нагрева воды в баке-аккумуляторе (БА). После полудня температура воды на выходе из ПСК снижается и когда она сравняется с температурой воды в баке-аккумуляторе циркуляция воды прекращается. Горячая вода из бака-аккумулятора (2) сливается в расходный бак (7), АСУ контролирует температуру воды для потребителя и поддерживает её постоянное значение ($50 - 60^{\circ}\text{C}$) с помощью дублёра (догревателя) и смесителя. Такая схема обеспечивает круглосуточное снабжение горячей водой по любому графику.

В двухконтурной системе (рис. 9) теплоноситель циркулирует по отдельному теплоприёмному контуру гелиоколлектора и передаёт теплоту воде в баке-аккумуляторе с помощью теплообменного аппарата (внутри бака-аккумулятора или за его пределами). Это позволяет в качестве теплоносителя использовать специальные жидкости (вода, антифризы, масло), которые улучшают эксплуатационные характеристики установки.

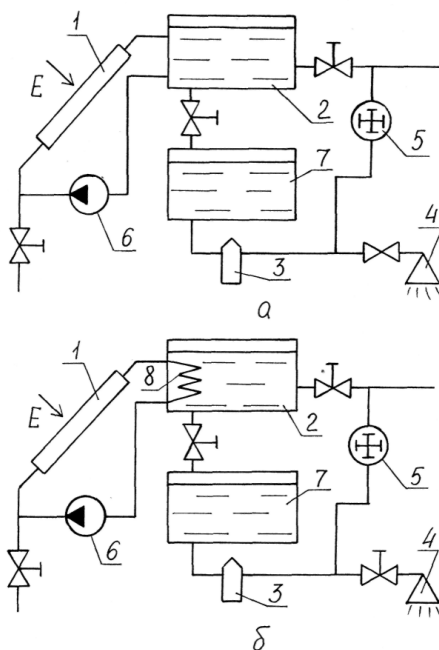


Рис. 5.2. Установка солнечного горячего водоснабжения с принудительной циркуляцией теплоносителя: а) – одноконтурная; б) двухконтурная.

Комбинированные установки солнечного теплоснабжения

Комбинированные установки солнечного теплоснабжения (горячее водоснабжение и отопление) как правило, выполняются многоконтурными с принудительной циркуляцией теплоносителей.

На рис. 5.3 приведён пример комбинированной системы теплоснабжения.

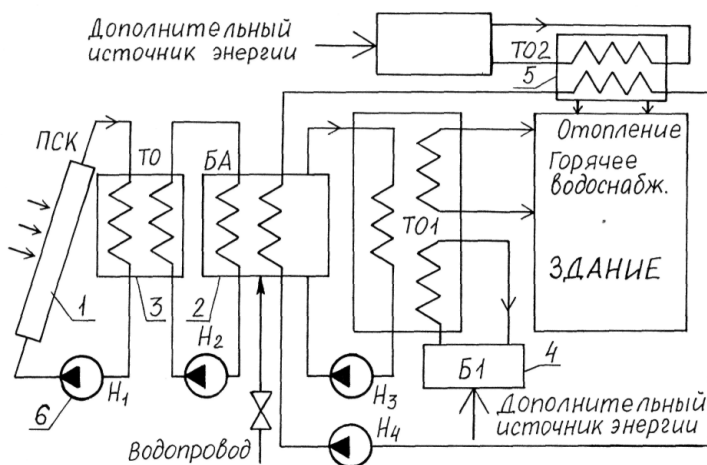


Рис. 5.3. Комбинированная установка солнечного теплоснабжения (горячее водоснабжение и отопление)

Система включает плоские солнечные коллекторы 1, конструкция и параметры которого определены расчётом, с отдельным контуром циркуляции теплоносителя и скоростным вынесенным теплообменным аппаратом 3 (ТО) к баку-аккумулятору 2 (БА). Контур подачи горячей воды через водо-водяной теплообменник $ТО1$ обеспечивает снабжение здания горячей водой. Контур отопления здания содержит водо-воздушный теплообменник $ТО2$, через который подаётся нагретый воздух в помещение. Оба контура снабжены дополнительными источниками энергии. Промежуточный бак 4 (Б1) через систему АСУ связан с источником холодной воды. В зависимости от конкретных условий состав системы и количество контуров может меняться.

Баки-аккумуляторы

В состав установки солнечного теплоснабжения входят баки-аккумуляторы (тепловые аккумуляторы), дополнительные источники энергии (дублёры), теплообменники, система автоматического управления температурой теплоносителя, циркуляционные насосы в каждом контуре, система трубопроводов и арматуры управления (клапаны), воздухонагреватели.

Тепловые аккумуляторы (баки-аккумуляторы) в составе систем горячего водообеспечения и отопления выполняют одновременно роль накопителя горячей воды. Это позволяет обеспечивать потребителя горячей водой независимо от цикла поступления солнечной энергии. Бак-аккумулятор (БА) должен удовлетворять требованиям: выдавать горячую воду при постоянной температуре, иметь высокий КПД, простоту и надёжность эксплуатации, долговечность, низкую стоимость.

Способности БА сохранять температуру накопленной воды обеспечивается применением пассивной тепловой изоляции. По всей поверхности БА устанавливается слой теплоизоляции толщиной до 20 см. Как правило БА имеет форму параллелепипеда, цилиндра или шара. Материал бака – сталь различных марок, защита от коррозии обеспечивается выбором материалов, эмалировкой внутренних поверхностей, электрохимической защитой (анодная защита). Ёмкость (энергетическая) бака-аккумулятора должна превышать суточный расход воды в $1,5 \div 3,0$ раза (без дублёра) и в $1,5 \div 2,0$ раза – при наличии дублёра.

Объём бака-аккумулятора существенно влияет на производительность системы и её эффективность. Рекомендуемые параметры удельного объёма БА $V_{уд.} = (50 - 100) л/м^2$ или $V_{уд.} = (0,05 \div 0,08) м^3/м^2$ (по отношению к одному метру квадратному общей площади солнечных коллекторов).

При общем объёме БА больше $10 м^3$ рекомендуется применить деление бака на секции, во всех случаях поддерживается естественная стратификация горячей воды в баке по его высоте (отношение высоты к ширине $H/B \cong 3 - 5$).

УСГВ с естественной циркуляцией теплоносителя преимущественно одноконтурные с открытым БА (без внутренних теплообменных устройств). Двухконтурные системы имеют в БА внутренние теплообменные устройства ёмкостного типа или вынесенные теплообменные аппараты проточного типа.

Теплообменные аппараты в системах солнечного теплоснабжения работают в области относительно низких переменных температур и расходах порядка $G_{уд.} \cong 0,01 - 0,02 кг/м^2 \cdot с$ ($20 - 40 кг/м^2 час$). Коэффициент

теплопередачи в ёмкостных нагревателях $K = 250 \div 300 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}$ при $\Delta T \approx 10 - 15^\circ \text{C}$, в проточных аппаратах до $1500 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}$.

При использовании антифризов коэффициент теплопередачи уменьшается на 10 – 15%.

Ориентировочная удельная площадь проточных теплообменных аппаратов (на метр квадратный ПСК):

$$F_{TO} \cong (0,05 \div 0,07) \text{ м}^2/\text{м}^2$$

для ёмкостных (объёмных):

$$F_{TO} \cong (0,08 \div 0,12) \text{ м}^2/\text{м}^2$$

Трубопроводы горячей и холодной воды соединяют солнечные коллекторы с потребителями и с источником холодной воды, диаметр трубопроводов до 3,0 ÷ 4,0 см, горячий трубопровод изолируется для уменьшения потерь теплоты.

5.3. Методика расчёта установок солнечного теплоснабжения с естественной циркуляцией теплоносителя

1) Выбор расчётной схемы установки – одноконтурная с открытым баком-аккумулятором (рис. 5.1).

2). Исходные данные: координаты места, данные климатических справочников по солнечной радиации (помесячно), производительность установки и температура горячей воды, время работы установки, параметры выбранного ПСК.

3). По климатическим справочникам определяется интенсивность прямой I_S и рассеянной радиации I_d для горизонтального положения ПСК для заданного месяца. Такие данные для июля и октября месяца, широта 45° СШ (для г. Севастополя) приведены в приложении. Все типы установок с дублирующими источниками рассчитываются по данным месяца с наибольшей суммой радиации за месяц, а системы без дублирующего источника – с наименьшей.

4). Интенсивность солнечного излучения на наклонную поверхность коллектора в пределах угла наклона $\beta = \varphi \pm 15^\circ$, где φ - географическая широта места:

$$I_T = I_S \cdot R_S + I_d \cdot R_d [\text{Вт}/\text{м}^2],$$

где R_S, R_d - угловые коэффициенты для прямой и рассеянной радиации.

Коэффициент R_S определяем по таблицам в зависимости от широты места φ , угла наклона ПСК и расчётного месяца.

Коэффициент R_d можно приближённо оценить по формуле:

$$R_d = \cos^2 \frac{S}{2},$$
 где S - угол наклона ПСК к горизонту.

5). Плотность потока солнечной радиации, поглощённой в абсорбере (поглощающей пластине ПСК) для каждого часа:

$$q_{\theta_i} = [I_S \cdot R_S(\tau\alpha)_S + I_d \cdot R_d(\tau\alpha)_d] \cdot 0,96, [Bm/m^2],$$
 где: $(\tau\alpha)_S, (\tau\alpha)_d$ - соответственно приведённые оптические характеристики ПСК для прямой и рассеянной солнечной радиации. Определяются они при расчёте ПСК, или могут быть приняты $(\tau\alpha)_S = 0,74; (\tau\alpha)_d = 0,64$ для одностекольных ПСК, $(\tau\alpha)_S = 0,63; (\tau\alpha)_d = 0,42$ для двухстекольных солнечных коллекторов.

6). Производительность установки с естественной циркуляцией, отнесённая к одному метру квадратному площади солнечного коллектора ($к\text{з}/м^2$) для каждого часа:

$$g_i = \frac{0,086[q_{\theta_i} - U_L(T_{1i} - T_{a_i})]}{1 + \frac{5U_L}{q_{\theta_i} - U_L(T_{1i} - T_{a_i})}}, (к\text{з}/м^2),$$
 где: U_L - приведённый

коэффициент теплопотерь ПСК, отнесённый к $1м^2$ площади ПСК, определяется при расчёте ПСК. При отсутствии данных можно принять $U_L \cong 8 Bm/m^2 K$ для одностекольного ПСК, $U_L \cong 5 Bm/m^2 K$ для двухстекольного ПСК.

T_{a_i} - температура окружающей среды.

7). Расчёт температуры на входе в коллектор T_{1i} должен учитывать особенности солнечной установки с ЕЦ: она будет меняться со временем в зависимости от поглощённой абсорбером солнечной энергии, расхода горячей воды g_i . После каждого оборота воды через трубную систему ПСК температура воды в баке будет повышаться на величину ΔT_i . Существенное влияние ΔT оказывает объём бака-аккумулятора: чем он больше, тем на меньшую разность ΔT нагреется вода в баке-аккумуляторе за единицу времени. Приближённо эти сложные зависимости можно выразить формулой (для каждого часа работы установки):

$$T_{1,i} = T_{1,i-1} + \Delta T_i = T_{1,i-1} + 10^{-2} \frac{g_i}{V}$$

где: i - это час, для которого определяется температура и производительность по горячей воде;

$i - 1$ - температура воды на входе для предыдущего часа;

ΔT - повышение температуры воды на входе за один час;

V - удельный объём бака аккумулятора (на 1 метр квадратный площади ПСК) $V = 0,06 \div 0,08 \text{ м}^3 / \text{м}^2$.

В первый час работы температура воды на входе принимается равной температуре воды в баке аккумулятора (задана).

8). В двухконтурных установках неизбежны потери при теплообмене между теплоносителем в контуре и водой в баке-аккумуляторе, поэтому для обеспечения заданных параметров горячей воды T_w температуру воды на входе принимаем на 5° выше, чем она определена расчётной формулой для T_{li} .

9). Полная полезная площадь солнечных коллекторов, необходимая для обеспечения заданной суточной потребности в горячей воде $G_{кз}$ для установки без дополнительного источника энергии (без дублёра):

$$A = \frac{G}{\sum_{i=1}^n g_i}, (\text{м}^2)$$

$$\text{где: } \sum_{i=1}^n g_i + g_2 + \dots \dots \dots g_n$$

n - эффективное число часов работы установки за светлое время суток ($\approx 5 - 8$).

10). Для солнечной установки с дублёром и системой АСУ, которая поддерживает режим работы с постоянной температурой горячей воды, полезная площадь солнечных коллекторов определяется по формуле:

$$A = \frac{1,16G(T_{w2} - T_{w1})}{\eta \sum q_i}, (\text{м}^2)$$

В этой формуле $\sum_i q_i$ - интенсивность падающей солнечной радиации в плоскости коллектора $\text{Вт} / \text{м}^2$ (см. выше), η - КПД (суточный) установки солнечного горячего водоснабжения, T_{w2}, T_{w1} - заданные температуры горячей и холодной воды в номинальном (расчётном) режиме.

11). Суточный коэффициент полезного действия солнечной установки:

$$\eta = 0,8 \left\{ (\tau\alpha) - \frac{9U_H [0,5(T_1 + T_2) - T_a]}{\sum_i q_i} \right\}, \quad \text{где: } (\tau\alpha) - \text{приведённая}$$

поглощательная способность ПСК (оптический КПД), определяется при

расчёте ПСК или можно принять $(\tau\alpha) = 0,73$ - для одностекольного ПСК, $(\tau\alpha) = 0,63$ - для двухстекольного ПСК.

T_1, T_2 - температуры воды на входе и на выходе ПСК, для двухконтурных установок принимаются на 5° больше, чем заданные температуры холодной и горячей воды T_{W2}, T_{W1} .

$\sum_i q_i$ - интенсивность падающей солнечной радиации в плоскости коллектора за эффективное число часов работы i .

12). Число плоских солнечных коллекторов в установке:

$$N = \frac{A}{A_{СК}} = \frac{\text{общая} - \text{площадь}}{\text{площадь} - \text{одного ПСК}}, (\text{шт.}).$$

Общая площадь ПСК определена расчётом, площадь одного ПСК – задана при выборе типового ПСК его габаритными размерами, обычно в пределах $1 - 2 \text{ м}^2$.

13). Объём бака-аккумулятора (общий) $V \text{ м}^3$ должен определяться по суточным графикам подогрева воды в установке $T_2 = f(\tau)$ и водопотребления. При отсутствии этих данных можно применить соотношение $V = 0,06 \div 0,08 A (\text{м}^3)$ в зависимости от климатического района.

5.4. Методика расчёта установок солнечного теплоснабжения с принудительной циркуляцией теплоносителя

1. Принципиальная схема установки солнечного горячего водоснабжения с принудительной циркуляцией показано на рис. 5.4.

2. Характеристики солнечного излучения в выбранном районе, выбор параметров ПСК, угла установки ПСК, интенсивности солнечного излучения в плоскости ПСК $\sum q_i$, плотности теплового потока поглощённого в ПСК q_{θ_i} определяются аналогично предыдущему пункту 5.3.

3. При принудительной циркуляции теплоносителя в контуре, который переносит теплоту от гелиоколлектора к баку-аккумулятору, часовая производительность установки по горячей воде определяется из решения уравнения теплового баланса установки:

$$g_i = \frac{0,86 U_L}{\ln \frac{T_{\max_i} - T_1}{T_{\max_i} - T_2}}, (\text{кВт} / \text{м}^2)$$

Величина g_i определена по отношению к одному квадратному метру площади коллектора, где: U_L - приведённый коэффициент теплопотерь солнечного коллектора, (Bm/m^2) ; T_1, T_2 - температуры теплоносителя на входе и выходе солнечного коллектора, $^{\circ}C$.

Для двухконтурных систем температура:

$$T_2 = T_{W2} + 5^{\circ}C$$

$$T_1 = T_{W1} + 5^{\circ}C$$

Здесь T_{W2}, T_{W1} - заданные температуры горячей и холодной воды.

Для одноконтурных систем $T_1 = T_{W1}; T_2 = T_{W2}$. Равновесная температура каждого часа $T_{\max i}$ представляет собой максимальную температуру абсорбера (поглощающей пластины), которая будет достигнута при полном прекращении циркуляции и теплоотвода из коллектора. Полезная энергия коллектора равна нулю, энергия солнечного коллектора будет расходоваться только на тепловые потери U_L . Очевидно, эта температура будет зависеть от количества поглощённой коллектором солнечной энергии на протяжении

каждого часа q_{θ_i} и величины U_L : $T_{\max i} = \frac{q_{\theta_i}}{U_L} + T_{ai}$.

Приведённая интенсивность поглощенной солнечной радиации $q_{\theta_i} Bm/m^2$ определяется по пункту 5.3, температура наружного воздуха $T_{ai}^{\circ}C$ приводится в справочных данных.

4. Площади солнцепоглощающей поверхности для установок с дублиром тепловой энергии и без дублира рассчитываются по пункту 4.3.9; 4.3.10.

5. Выбор насоса для теплоприёмного контура следует производить из условия обеспечения среднечасового расхода воды: производительность насосов должна обеспечить расход:

$G_{\text{час}} = \frac{G}{\tau} [m^3/\text{час}]$, где: G - заданный общий суточный расход горячей воды ($G = \sum_i g_i A$); τ - эффективная производительность работы установки за сутки ($\approx 5 - 7 \text{ часов}$). При достаточно больших расходах горячей воды устанавливают несколько параллельно работающих насосов (подбор насосов производится по справочникам).

6. В заключение необходимо определить количество солнечных коллекторов N (п. 5.3), разработать схему их соединения (параллельная

смешанная), построить графики изменения основных параметров установки за сутки: $T_2 = f(\tau)$; $T_{\max} = f(\tau)$; $g_i = f(\tau)$; $q_{\partial i} = f(\tau)$.

7. Оценка эффективности работы УСГВ. Мгновенный КПД установки (или часовой) определяется выражением:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{A \cdot I_T} = \frac{Q_u}{A \cdot I_0 R}$$

где: Q_u - полезная тепловая мощность солнечного коллектора [Дж];

$$Q_u = A \cdot q_i = A \cdot G \cdot Cp(T_{W_2} - T_{W_1}) \text{ или}$$

$$Q_u = F_R \cdot A \cdot [I_T(\tau a) - U_L(T_1 - T_a)]$$

С учётом последней формулы, КПД плоского солнечного коллектора можно представить в виде:

$$\eta_i = F_R(\tau a) - \frac{F_R \cdot U_L(T_1 - T_a)}{I_0 R}$$

$$\eta_i = F_R \left[(\tau a) - \frac{U_L(T_1 - T_a)}{I_0 R} \right]$$

В этих формулах $I_T = I_0 R$, U_L , T_1 , T_2 , (τa) принимаются для одного часа (на протяжении светового дня), обычно – для номинального (расчётного режима), их значения заданы или определяются расчётным путём.

Если в формулу для η_i подставить осреднённые за сутки параметры $I_0 R = \sum_i q_i$, (τa) , U_L , T_1 , T_2 , получим выражение для расчёта среднего за сутки работы коэффициента полезного действия УСГВ:

$$\eta_{\text{сут.}} = 0,8 \left[(\tau a) - \frac{9U_L [0,5(T_1 + T_2) - T_a]}{\sum_i q_i} \right]$$

Для оценки эффективности УСГВ за более длительный период (месяц, сезон, год) необходимо учитывать осреднённые значения интенсивности солнечного излучения за сезон (месяц) или общую сумму солнечной энергии, поглощённую солнечными коллекторами установки за этот период. Один из вариантов оценки эффективности установки на стадии проектирования заключается в определении экономии топлива (органического) за счёт использования солнечной энергии в тоннах условного топлива в год (или сезон) [м.у.т./год]:

$$B = \frac{0,0342 Q}{\eta_{\text{зам.}}} \left[\frac{\text{тонн} - \text{условного} - \text{топлива}}{\text{год}} \right]$$

В этой формуле Q - суммарное количество теплоты ГДж/год, выработанной установкой солнечного горячего водоснабжения (УСГВ) за сезон (год); $\eta_{зам.}$ - КПД замещаемого источника теплоты (0,5 - 0,7).

Суммарное количество теплоты Q [ГДж], выработанное установкой за сезон (год) определяется по формуле:

$$Q = A \cdot \eta \cdot \sum_{Z,j,i} q_i [\text{Дж}/\text{сезон}],$$
 где: Z - число месяцев работы установки, j - число дней в месяце, i - число эффективных часов в сутки, $q_i = I_{T_i} = I_0 R$ - интенсивность солнечного излучения за час, отнесённая к одному метру квадратному поверхности солнечного коллектора, $\text{Вт} \cdot \text{час}/\text{м}^2$, A - суммарная площадь солнечных коллекторов для установки, $[\text{м}^2]$, η - сезонный или годовой КПД СУГВ (осреднённый за принятый период времени).

На рис.5.4 приведены графики зависимости сезонного КПД.

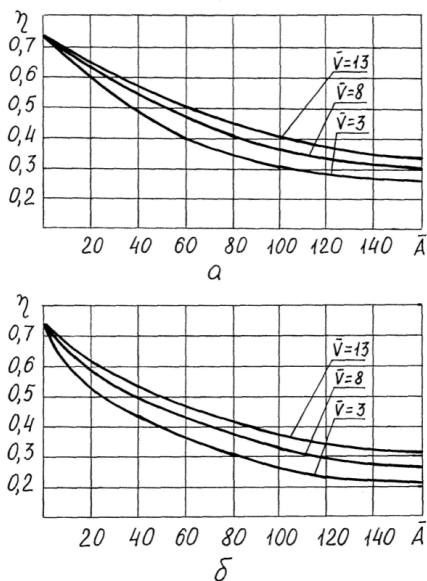


Рис. 5.4. Коэффициент полезного действия установки солнечного теплоснабжения длительного применения: а) – сезонный; б) – годовой.

Годовой (сезонный) КПД можно определить по графикам рис. 5.4 в зависимости от удельной величины площади солнечных коллекторов

$\tilde{A} \text{ м}^2 / (\text{ГДж} \cdot \text{сутки})$ и удельной вместимости бака-аккумулятора $\tilde{V} \text{ м}^3 / (\text{ГДж} \cdot \text{сутки})$, приходящихся на единицу суточной тепловой нагрузки установки солнечного горячего водоснабжения, которые вычисляются по формуле:

$$\tilde{A} = 10^6 A / [4,19 \cdot G(T_{w_2} - T_{w_1})] \text{ м}^2 / (\text{ГДж} \cdot \text{сутки})$$

$$\tilde{V} = 10^6 V / [4,19 \cdot G(T_{w_2} - T_{w_1})] \text{ м}^3 / (\text{ГДж} \cdot \text{сутки})$$

Здесь G - суточная производительность УСГВ по горячей воде, (кг).

Расчёты $\sum_{Z,j,i} q_i$ удобно производить в табличной форме, конечный результат суммирования необходимо перевести в джоули по простому соотношению:

$$\sum_{Z,j,i} q_i \frac{\text{Вт} \cdot \text{час}}{\text{м}^2 \cdot \text{сезон}} = 360 \sum_{Z,j,i} q_i \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{сезон}} = 10^{-9} \cdot 360 \sum_{Z,j,i} q_i \frac{\text{ГДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{сезон}}$$

Определение располагаемого количества солнечной энергии

Основным источником информации о солнечной радиации являются простые измерения на метеорологических станциях. Данные по солнечной радиации должны содержать следующую информацию:

1. Являются ли они непосредственно измеренными величинами или суммарными значениями за какой-либо период времени (за час или за сутки).

2. Время или период времени, в течение которого проводились измерения.

3. Тип солнечной радиации (прямая, рассеянная или суммарная) и тип измерительной аппаратуры.

4. Ориентация приемной поверхности (обычно горизонтальная или с определенным наклоном).

5. Для усредненных данных период времени, для которого проводилось усреднение (например, среднемесячное значение суточной суммы солнечной радиации).

Наиболее общая форма, в которой представляются опытные данные: 1) часовые суммы солнечной радиации, усредненные по месяцам; 2) сумма солнечной радиации за сутки на горизонтальной поверхности, усредненная по месяцам; 3) значения углового коэффициента (табл. 5.1, 5.2 и 5.3). Полученные результаты расчета средней поверхностной плотности солнечной энергии в плоскости солнечного коллектора (по месяцам) заносятся в табл. 5.4.

Таблица 5.1

Часовые суммы солнечной радиации, усредненные по месяцам (на горизонтальную поверхность); $\varphi = 45^0$ с.ш.

Месяц	Часы	Плотность потока радиации, Вт/м ²									$\Sigma \frac{Bm \cdot \varphi}{m^2}$
	Величины	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	
июль	I _s	267	394	487	545	568	557	499	441	336	$\Sigma I_s = 4,095$
	I _d	128	162	186	209	209	220	209	197	162	$\Sigma I_d = 1682$
	I	395	556	673	754	777	777	708	638	498	$\Sigma I = 5777$
	t _{о.с.} °C	25,0	25,5	25,9	26,1	26,1	26,1	26,2	26,1	26,1	
октябрь	I _s	200	400	450	475	490	425	315	180	100	$\Sigma I_s = 3035$
	I _d	40	75	80	80	85	75	65	55	37	$\Sigma I_d = 592$
	I	240	475	530	555	575	500	380	235	137	$\Sigma I = 3627$
	t _{о.с.} °C	14,0 8	16,0	16,6	17,0	17,1	17,2	17,1	16,9	16,4	

$$\Sigma I = 5777 \frac{Bm \cdot \varphi}{m^2} = 5777 \frac{Дж \cdot час}{с \cdot m^2} = 5777 \cdot 3600 \frac{Дж}{m^2 \cdot с} = 20797200 \frac{Дж}{m^2 \cdot с} = 20,8 \frac{МДж}{m^2 \cdot сутки}.$$

Таблица 5.2

Среднемесячное дневное количество суммарной ($\bar{I}$) и рассеянной ($\bar{I}_d$) солнечной энергии на 1 м² горизонтальной поверхности $\left[\frac{МДж}{m^2 \cdot сутки} \right]$ и среднемесячная температура $\bar{t}_{о.с.}$

Данные	Широта	Месяцы				
		Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
$\bar{I}$	45 ° с.ш.	20,25	23,07	23,62	20,11	14,73
$\bar{I}_d$		9,18	10	9,04	7,83	5,98
$\bar{t}_{о.с.}$		15,6	19,2	21,4	20,56	15,70
$\bar{I}$	40 ° с.ш.	27,81	29,47	27,81	24,16	19,04
$\bar{I}_d$		5,26	5,84	5,8	5,4	3,61
$\bar{t}_{о.с.}$		16,3	21,5	24,7	24,2	19,3

Таблица 5.3

Среднее значение коэффициента $\bar{R}_s$ при различном угле установки коллектора β

Данные	Месяцы				
	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
$\varphi = 40^\circ \text{ с.ш.}$					
$S - \varphi = +15^\circ (55^\circ)$	1,1	1,15	1,0	1,2	1,25
$S - \varphi = -15^\circ (25^\circ)$	0,7	0,6	0,6	0,8	1,25
$S = \varphi (40^\circ)$	1,1	1,0	1,0	1,25	1,45
$\varphi = 45^\circ \text{ с.ш. 1,3}$					
$S - \varphi = +15^\circ (60^\circ)$	1,15	1,2	1,0	1,25	1,3
$S - \varphi = -15^\circ (30^\circ)$	0,7	0,6	0,6	0,8	1,25
$S = \varphi (45^\circ)$	1,12	1,0	1,0	1,25	1,45

Таблица 5.4.

Результаты расчета средней поверхностной плотности солнечной энергии в плоскости солнечного коллектора (по месяцам)

Месяц	$I \times 10^6, \text{ Дж/м}^2 \text{ сут}$	I_d/I	R_s	$(1-I_d/I)R_s$	$I_d/I \times (1+\cos S)/2$	$\times (1-\cos S)/2$	R	$I_k \times 10^6, \text{ Дж/м}^2 \text{ сут}$	$t_{0.c.}, ^\circ\text{C}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Май									
Июнь									
Июль									
Август									
Сентябрь									
Октябрь									

Данные по интенсивности солнечного излучения (таблица 5.1, 5.2) находятся в метеорологических (климатических) справочниках и измерены по отношению к горизонтально расположенным плоскостям.

Для обеспечения максимального количества (за расчетный период) солнечной энергии коллектор обычно устанавливают в наклонном положении с оптимальным углом наклона к горизонту.

Среднемесечное дневное суммарное количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность солнечного коллектора, определяется по формуле:

$$I_k = RIK_a, \quad (5.1)$$

где I – среднемесечное дневное суммарное количество солнечной энергии, поступающее на горизонтальную поверхность, [МДж/(м²дни)] или [(кВт х ч)/м²].

R – угловой коэффициент, отношение среднемесечных дневных количеств солнечной радиации, поступающей на наклонную и горизонтальную поверхности.

Если коллектор ориентирован строго на юг (отклонение по азимуту равно нулю), то коэффициент пересчета количества солнечной энергии с горизонтальной поверхности на наклонную поверхность равен сумме трех составляющих, соответствующих прямому, рассеянному и отраженному солнечному излучению:

$$R = \left(1 - \frac{I_d}{I}\right) R_S + \frac{I_d}{I} \cdot \frac{1 + \cos S}{2} + \rho \frac{1 - \cos S}{2} \quad (5.2)$$

где I_d – среднемесечное дневное количество рассеянного солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, [МДж/(м²дни)] или [(кВт·ч)/м²];

I_d/I – среднемесечная дневная доля рассеянного солнечного излучения;

R_S – среднемесечный коэффициент пересчета прямого солнечного излучения с горизонтальной на наклонную поверхность (коэффициент пропускательной способности атмосферы);

S – угол наклона коллектора к горизонту;

ρ – отражательная способность (альбедо) Земли (принимается равным 0,7 – для зимы и 0,2 – для лета).

Значения коэффициента R_S в зависимости от широты места и угла установки коллектора приведены в справочной таблице 3.

Коэффициент K_a в формуле (5.1) зависит от ориентации коллектора по азимуту (угол между нормалью к плоскости КСЭ и южным направлением). При $a_k = \pm 15^\circ$ среднегодовой приход солнечной энергии на поверхность солнечного коллектора по сравнению с южно ориентированным коллектором уменьшается всего на 2 %; при $a_k = \pm 40^\circ$ на 13 %. Значения коэффициента K_a : $a_k = 0$; $K_a = 1$; при $K_a = 0,98$.

Результаты расчетов по формулам (5.1), (5.2) удобно ввести в сводную расчетную таблицу 4.

Величина $I_k I_k$ (столбец 9 таблицы 5.4):

$$I_k = R \cdot K_a \cdot I, \text{ МДж} / \text{м}^2 \text{сутки} \quad (5.3)$$

Коэффициент R (столбец 8) вычисляется как сумма столбцов 5,6,7 таблицы 5.4.

Расчет затрат тепловой энергии на горячее водоснабжение и отопление здания.

Средний расход теплоты (Дж) на горячее водоснабжение здания за расчетный период.

$$Q_{ГВ} = 1,2 N G_B d (t_{г.в.} - t_{х.в.}) C_p \cdot 10^{-9} \text{ ГДж} \quad (5.4)$$

или

$$Q_{ГВ} = 1,2 N G_B^* d \cdot \rho (t_{г.в.} - t_{х.в.}) C_p \cdot 10^{-9} \text{ ГДж} \quad (5.5)$$

где N – количество пользователей (человек);

G_B – расход воды в системе на одного человека в день ($\text{кг} / \text{день} \cdot \text{чел.}$);

G_B^* – расход воды в системе на одного человека в день [$\text{литров} / (\text{сутки} \cdot \text{чел.})$];

ρ – плотность воды, равная $1 \text{ кг} / \text{л}$;

$$G_B = G_B^* \cdot \rho$$

$t_{г.в.}$ – температура горячей воды, $^{\circ}\text{C} (50^{\circ}\text{C})$;

$t_{х.в.}$ – температура холодной воды, $^{\circ}\text{C} (12^{\circ}\text{C})$;

d – количество дней в месяце (или за расчетный период);

C_p – удельная изобарная теплоемкость воды, равная $4190 \text{ Дж} / \text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C}$).

Суммарная средняя за месяц потребная тепловая энергия $\bar{Q}$ составляет:

$$\bar{Q}_H^M = \bar{Q}_{ГВ} + \bar{Q}_{от} \quad (5.6)$$

Сезонная тепловая нагрузка складывается из месячных величин:

$$\bar{Q}_H^{год} = \sum_1^6 \bar{Q}_H^M (\text{ГДж}) \quad (5.7)$$

Норма потребления воды на одного человека в соответствии со СНиП 2.04.01-85 составляет $100 \text{ литров} / \text{сутки}$.

Данные расчета $\bar{Q}_H^M$ по формулам (5.6), (5.7) по месяцам сезона следует записать в расчетную таблицу 5.5. Доля отопительной нагрузки в процентах по месяцам приводится в задании.

5.5. Методические рекомендации по расчетам установок солнечного горячего теплоснабжения и водообеспечения.

Таблица 5.5.

Затраты средней месячной тепловой энергии для горячего водоснабжения и отопления

Месяц	Число дней в мес.	$\bar{Q}_{ГВ}, ГДж$	Доля отопительной нагрузки, %	$\bar{Q}_{от}, ГДж$	$\bar{Q}_H^M, ГДж$
1	2	3	4	5	6
Май	31				
Июнь	30				
Июль	31				
Август	31				
Сентябрь	30				
Октябрь	31				

Тепловую нагрузку отопления (Дж) для каждого месяца можно определить по формуле:

$$Q_{от} = \sum K_i \cdot F_i \cdot \Delta t \cdot \tau + Q_{инф.} - Q_{в.м.} \quad (5.8)$$

где K_i – расчетный коэффициент теплопотерь для данного элемента ограждающих конструкций (стен, окон, потолка, пола), $[Вт/м^2 \cdot ^\circ C]$; F_i – площадь поверхности элемента ограждающих конструкций, $м^2$; Δt – расчетная разность температур, $^\circ C$; τ – продолжительность расчетного периода, сек.; $Q_{инф.}$ – теплопотери, обусловленные инфильтрацией холодного воздуха, $Дж$; $Q_{в.м.}$ – внутренние тепловыделения от людей, осветительных приборов, $Дж$.

Для многослойных стен и других элементов ограждения коэффициент теплопотерь равен:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_B} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_H} \right)^{-1} \quad (5.9)$$

где α_B и α_H - коэффициенты теплоотдачи для внутренней и наружной поверхностей стены, $[Вт / м^2 \cdot ^\circ C]$; δ_i и λ_i - толщина в (м) и коэффициент теплопроводности, $[Вт / м \cdot ^\circ C]$.

Расчеты по этим формулам для реальных зданий довольно сложны и трудоемки, поэтому средняя месячная тепловая нагрузка системы отопления – количество тепловой энергии в месяц для отопления здания - $\bar{Q}_{om}$ в данной работе указана в процентах от месячной тепловой нагрузки горячего водоснабжения $\bar{Q}_{ГВ}$.

Расчёт плоского солнечного коллектора

1. Задачи расчета.

Выполнить конструктивный и тепловой расчеты солнечного коллектора с параметрами, отвечающими требованиям ТЗ и ГОСТ 28310.

2. В тепловом расчете сделан ряд допущений, не искажающих физической сущности теплового процесса. К этим допущениям относятся:

- режим работы коллектора – стационарный;
- поглощение солнечной энергии покрытиями не влияет на тепловые потери коллектора;
- градиент температуры в направлении потока и по толщине листа является пренебрежимо малым;
- свойства материалов не зависят от температуры.

3. Основные требования к солнечным коллекторам.

3.1. Конструкционные материалы для абсорбера и трубной системы (труба в листе или лист-труба): алюминий, латунь, медь, нержавеющая сталь, углеродистая сталь, никель.

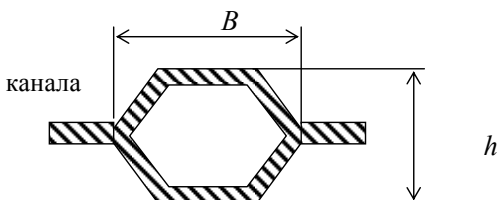
3.2. Площадь одного солнечного коллектора должна быть в пределах $0,8 \div 2,0 м^2$. Соотношение габаритных размеров $(H : B)$ в диапазоне $(1 : 1) \div (3 : 1)$.

3.3. Геометрические размеры трубной системы солнечного коллектора: наружный диаметр от 10 до 20 мм (вертикальные трубы), горизонтальные трубы – до 30 мм. Расстояние между осями соседних труб рекомендуется – 60-150 мм. Соединение труб – параллельное или змеевидное (для принудительной циркуляции), толщина стенки трубы – 0,5-0,8 мм, для стальных труб – 1,0-2,0 мм.

3.4. Абсорбер (поглощающая пластина) имеет толщину от 0,45 мм до 1,00 мм (рекомендуется 0,6;0,9).

3.5. Можно применять штампованные панели различного профиля, в которых каналы движения теплоносителя создаются с помощью точечной сварки (типа лист-труба), материал – латунь, алюминий, сталь.

Параметры плоского канала:



$B = 12 \div 20 \text{ мм}, h = 3 - 5 \text{ мм}$
Толщина стенки плоского

$\delta = 0,15 - 0,3 \text{ мм}$

3.6. Удельные показатели СК рассчитываются на 1 м^2 площади коллектора.

3.7. Удельный объем каналов поглощающей панели сборной трубной или листотрубной конструкций должен быть не более $1,8 \text{ л} / \text{м}^2$, для иных конструкций – не более $3,0 \text{ л} / \text{м}^2$.

3.8. Удельная масса коллектора должна быть не более:

- для коллектора, поглощающая панель которого выполнена из низкоуглеродистой стали – $35,0 \div 45,0 \text{ кг} / \text{м}^2$;

- для коллектора, поглощающая панель которого выполнена из цветных металлов или нержавеющей стали - $25,0 \div 30,0 \text{ кг} / \text{м}^2$.

3.9. Конструкция крепления прозрачной изоляции должна предусмотреть возможность ее замены.

3.10. Срок службы коллектора – не менее 10 лет, за исключением прозрачного покрытия.

3.11. Коллектор должен иметь вентиляционное отверстие, но быть влагонепроницаемым для атмосферных осадков.

3.12. Прозрачная изоляция коллектора может быть выполнена из стекла, органического стекла или полимерных пленок, удовлетворяющих требованиям стандарта в части пропускательной способности, устойчивых к атмосферным и эксплуатационным воздействиям (при температуре от минус 45 до плюс 150).

3.13. Лакокрасочное покрытие поглощающей панели должно быть стойким к воздействию особых сред до плюс 150°C , а селективное покрытие – до плюс 190°C .

3.14. Материалы тепловой изоляции должны быть стойкими к воздействию температуры не менее $+180^\circ \text{C}$ при селективном покрытии рабочей поверхности поглощающей пластины и не менее $+150^\circ \text{C}$ при черном поглощающем покрытии. Допускается изготовление тепловой изоляции коллектора из нескольких слоев различных материалов. Изоляционные материалы должны быть негигроскопичны, не выделять пылевые частицы и стойкие при указанных выше температурах.

Исходные данные для расчета коллектора

1. Конструкция и материалы трубной системы и абсорбера: (плоская труба, круглая труба, лист-труба, труба в листе).

2. Параметры трубной системы $l_{nl}, b_{nl}, h_{nl}, \delta_{nl}, l_{kp}, d_n, \delta_{kp}$ и абсорбера (H, B, δ) .

3. Количество стекол (прозрачных покрытий), параметры покрытия (толщина стекла $\delta_{ст}$, коэффициент преломления n , коэффициент ослабления покрытия $\varphi_{ст}$).

4. Поглощающая способность, степень черноты и теплопроводность абсорбера $(\alpha, \varepsilon, \lambda)$.

5. Материал, геометрические размеры и коэффициент теплопроводности тепловой изоляции (снизу, сбоку, толщина).

6. Высота боковых поверхностей коллектора $h_s = 0,1 \div 0,3 \text{ м}$.

7. Расстояние между абсорбером и стеклом $h[\text{см}]$

$$h = 1,5 \div 3,0 \text{ см}$$

8. Параметры окружающей среды ($t_{о.с.}$, скорость ветра, средняя температура пластины абсорбера, предварительная температура стекла, их средняя температура).

9. Угол наклона коллектора к горизонту

$$S = (\varphi \pm 15^\circ).$$

10. Угол падения излучения (для определения диффузной способности стекла принимается $\theta_1 \approx 60^\circ$).

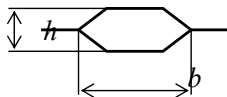
11. Поверхность коллектора

$$A = (l_{mp} + 2\delta_{из})B, (\text{м}^2).$$

12. Геометрические параметры гидравлического коллектора (D, δ_{mp}) выбираются конструктивно.

Конструктивный расчет солнечного коллектора.

1. На основании принятых исходных данных определяем: площади сечения для плоской трубы



$$S_{mp}^{nl} = 100[(b - 2\delta_{nl}) \cdot (h - 2\delta_{nl})] \rho \text{ м}^2$$

$$S_{mp}^{kp} = 100[0,785(d_n - 2\delta_{kp})^2] \rho \text{ м}^2$$

2. Объем воды в одной (плоской или круглой трубе) $V_g = S_{mp} \cdot l [\text{м}^3]$ и в гидравлическом (горизонтальном) коллекторе $V_k = S_k \cdot B [\text{м}^3]$.

3. Максимальное количество труб в коллекторе определяется из условия обеспечения удельного объема каналов (на 1 м^2 площади СК) не более $1,8 \text{ л} / \text{м}^2$ (для круглых труб):

$$N_{\max} = \frac{A \cdot 1,8 - V_k}{V_B}.$$

4. Минимальное расстояние между трубами:

$$\Delta L_{\min} = \frac{B}{N_{\max}} \cdot \text{см}$$

Тепловой расчет солнечного коллектора

1. Определим приведенную поглощательную способность коллектора ($\tau\alpha$) с учетом физических процессов отражения от поверхности стекла (ρ), поглощения в стеклянном покрытии (τ_α), диффузного отражения от стекла (ρ_d), пропускательной способности стеклянного покрытия без учета поглощения (τ_r) (см главу 3).

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau \cdot \alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho_d};$$

2. Определим количество энергии, поглощенной абсорбером $S = I \cdot R \cdot (\tau\alpha), \text{Вт} / \text{м}^2$.

3. Определим потери тепловой энергии солнечного коллектора, отнесенные к одному квадратному метру поверхности СК, с учетом процессов теплопередачи, конвекции и излучения – через нижнюю стенку коллектора U_H , через боковые поверхности U_δ , от абсорбера в воздух – вверх, через воздушную прослойку и стекло – U_T .

Общий коэффициент теплопотерь:

$$U_L = U_T + U_H + U_\delta, \text{Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{град.}$$

Необходимые для расчета формулы приведены в главе 4.

4. Для расчёта полезной тепловой мощности коллектора определим коэффициенты F, F', F_R (см. тему 4), тогда:

$$Q_{II} = A \cdot F_R [S - U_H (T_{\text{ex}} - T_a)], \text{Вт}$$

5. Ожидаемый мгновенный КПД

$$\eta = \frac{Q_{\Pi}}{A \cdot I \cdot R} 100\%$$

6. Среднесуточная производительность солнечного коллектора

$$G_{\text{сут}} = \frac{Q_{\Pi} \cdot 3600 \cdot t_{\text{эф.}}}{C_p (T_{W_2} - T_{W_1})} \text{ кг/сутки.}$$

Расчет энергетических характеристик комбинированной солнечной установки теплоснабжения

1. Исходные данные для расчета.

- назначение установки: снабжение горячей водой и отопление дома отдыха, расположенного в Крыму, на широте $\varphi = 40^0$ и ($\varphi = 45^0$) северной широты;

- установка сезонная, с дублирующим источником (индивидуальная котельная, $\eta = 0,7$);

- количество людей в доме отдыха, температуры горячей и холодной воды, параметры солнечного коллектора, его положение – приведены в задании на проектирование, получены в расчётах ПСК.

- расчет системы выполняется для сезона с мая по октябрь (для горячего водоснабжения) для теплоснабжения – май, сентябрь, октябрь;

- климатические данные и расчет интенсивности солнечной радиации выполнены в разделах 5.3 и 5.4.

Схема системы солнечного отопления и горячего водоснабжения, рекомендуемая для расчета, представлена на рис. 5.3.

Система включает плоские солнечные коллекторы (СК), площадью A (м^2) с отдельным контуром циркуляции жидкости (вода или антифриз), теплообменник (ТО) и бак-аккумулятор (БА), аккумулирующей средой в которых является вода. Эта вода в свою очередь используется для нагрева воды в контуре горячего водоснабжения (водо-водяной теплообменник ТО-1) и в контуре отопления здания (водо-воздушный ТО-2).

Система солнечного теплоснабжения здания является дополнительной к системе теплоснабжения от традиционного (дублирующего) источника энергии, который включает бак нагрева воды (Б-1) и нагреватель воздуха (Н-1).

- Система солнечного теплоснабжения (ССТ) предусматривает работу установки в режимах:

- отопления и горячего водоснабжения;

- горячего водоснабжения.

- Система ССТ включает три контура циркуляции:

- первый контур, состоящий из солнечных коллекторов 1, циркуляционного насоса 8 и жидкостного теплообменника 3;

- второй контур, состоящий из бака-аккумулятора 2, циркуляционного насоса 8 и теплообменника 3;

- третий контур (солнечного отопления), состоящий из бака-аккумулятора 2, циркуляционного насоса 8, водо-воздушного теплообменника (калорифера) 5, дополнительного источника нагрева Н-1;
- контур горячего водоснабжения содержит водо-водяной теплообменник 4 (ТО-1) и дополнительный источник энергии с баком нагрева воды (Б-1).

Теплоноситель (вода, антифриз) теплообменного контура, нагреваясь в солнечных коллекторах 1, поступает в теплообменник 3, где теплота теплоносителя (антифриза) передается воде, циркулирующей в межтрубном пространстве теплообменника 3 под действием насоса 6 второго контура. Нагретая вода поступает в бак-аккумулятор 2. Из бака-аккумулятора вода забирается насосом 6 ГВС, доводится при необходимости до требуемой температуры в дублере 7 (Б-1) и поступает в систему ГВС здания. Подпитка бака-аккумулятора осуществляется из водопровода.

Для отопления вода из БА 2 подается насосом третьего контура 6 в калорифер 5 через который с помощью вентилятора пропускается воздух и после нагрева поступает в здание.

В случае отсутствия солнечной радиации или нехватки тепловой энергии в работу включаются дублиры (дополнительные источники энергии) в качестве которых используются паровые котлы, газовые нагреватели, электрические нагреватели.

2. Методика расчета установки солнечного горячего водоснабжения для установки с принуждённой циркуляцией приведена в 5.4.

Результаты расчёта удобно представить в виде таблицы 5.6.

Таблица 5.6

Расчет установки солнечного горячего водоснабжения с принудительной циркуляцией

Июль

[illegible]

Рассеянное $R_d \cdot I_d \cdot \theta_d$									
Полное поглощенное излучение q_{θ_i} , Вт/м ²									
Максимальная равновесная температура $t_{\max_i}$									
Расход теплоносителя g_i , кг/м ²									

Здесь: $q_i = R_s \cdot I_s + R_d \cdot I_d$, Вт/м² – интенсивность падающей солнечной радиации для пространственного поглощения СК каждого часа светового дня.

$R_d = \cos^2 \frac{S}{2}$, где S - угол наклона СК к горизонту (см. в задании угловой коэффициент (для рассеянного излучения));

R_s - угловой коэффициент для прямого солнечного излучения;

$R_s = f(\varphi, \beta)$ - по таблице 3 (для июля месяца).

Приведенная интенсивность падающей солнечной радиации с учетом оптических характеристик солнечного коллектора:

$$q_{\theta_i} = (I_s \cdot R_s \cdot \theta_s + I_d \cdot P_d \cdot \theta_d) \cdot 0,96$$

где θ_s, θ_d - соответственно приведенные оптические характеристики СК для прямой и рассеянной солнечной радиации (поглощательная способность). Можно взять из расчета СК $\theta_{s,d} \approx \tau \cdot \alpha$ или по средним параметрам принять:

- для одностекольных СК $\theta_s = 0,74$; $\theta_d = 0,64$;
- для двухстекольных $\theta_s = 0,63$; $\theta_d = 0,42$.

2.1. Суточный КПД установки определяем по формуле:

$$\eta = 0,8 \left\{ \theta - \frac{9U[0,5(T_1 + T_2) - t_{e_i}]}{\sum_i q_i} \right\}, \text{ где } \theta = \tau \alpha - \text{приведенная оптическая}$$

характеристика коллектора (из расчета СК) или по стандартным данным;

T_a - средняя дневная температура воздуха, °C;

q_i - падающая солнечная радиация в плоскости коллектора на протяжении светового дня.

3. Общую площадь коллекторов для установок с дублиром А, м² следует определить по формуле: $A = \frac{1,16G(T_{w2} - T_{w1})}{\eta \sum_i q_i} [\text{м}^2]$,

где q_i - интенсивность падающей солнечной радиации в плоскости коллектора Вт/м² в интервале от 8 до 17 часов для СК южной ориентации.

i - часы работы установки.

4. Объем бака-аккумулятора в зависимости от климатического района определяется по формуле:

$V = (0,06 - 0,08)A$, принимая большее значение для IV климатического района.

5. При постоянном расходе теплоносителя его удельный расход должен приниматься в пределах 20-40 кг/(м² х час) (из опыта проектирования установок).

Подбор насоса для контура СК следует производить из расчета его производительности:

$$Q_{\text{нас.}} = (20 \div 40) \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \cdot A [\text{м}^2] = q_v \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{час}} \cdot A [\text{м}^2] = \left[\frac{\text{м}^3}{\text{ч}} \right].$$

6. Количество солнечных коллекторов в установке: $N = \frac{A}{A_{\text{ск}}}$ (штук); где

$A_{\text{ск}}$ - площадь СК, определенная в расчете коллектора.

7. Выбрать схему соединения N коллекторов в солнечной установке (параллельно-последовательную).

8. Расчет замещаемого топлива за счет использования солнечной энергии и сезонного КПД выполняется согласно п. 5.4.

Вопросы для проверки теоретической и практической подготовки по разделу 2

1. Отражательная способность непрозрачных материалов (ρ_0, ρ_θ).
2. Оптические характеристики частично прозрачных сред. Пропускательная способность стекла (2 поверхности) с учётом отражения (τ_ρ).
3. Пропускательная способность покрытия с учётом поглощения (τ_α).
4. Приведённая пропускательная способность ПСК (оптический КПД).
5. Устройство плоского солнечного коллектора, основные части, схемы компоновки трубной системы. Материалы для ПСК.
6. Спектральная селективность абсорбера, физический смысл, методы реализации.
7. Уравнение баланса энергии ПСК, основные составляющие. Плотность потока солнечного излучения на поверхность абсорбера.
8. Тепловые потери ПСК по периметру U_B и через днище (U_H), методика расчёта.
9. Тепловые потери ПСК через верхнее покрытие (U_T). Составляющие, методика расчёта.
10. Полный коэффициент тепловых потерь U_L , определение, физический смысл, тепловые потери ПСК.
11. Радиационные тепловые потери ПСК, методика расчёта.
12. Конвективные тепловые потери ПСК, методика расчёта.
13. Метод определения температуры стеклянного покрытия ПСК (итерации).
14. Особенности теплового расчёта ПСК с двумя стеклянными покрытиями.
15. Расчёт полезной мощности ПСК (из уравнения баланса). Коэффициент эффективности ребра ПСК F , физический смысл.
16. Коэффициент эффективности ПСК (F'), физический смысл, методика расчёта.
17. Коэффициент отвода теплоты из коллектора (F_R), физический смысл, методика расчёта.
18. Конструктивный расчёт ПСК, определение количества вертикальных труб.
19. Параметры эффективности ПСК (мгновенная полезная мощность Q_{Π} , мгновенный КПД η).
20. Метод определения сезонного (годового) КПД ПСК.
21. Аккумулирование тепловой энергии в системах УСГВ. Назначение и выбор объёма бака – аккумулятора.
22. УСГВ с жидкими теплоносителями, с применением естественной циркуляции. Схемы, принципы работы, методика расчёта.

23. УСГВ с жидкими теплоносителями, с применением принудительной циркуляции. Схемы, принципы работы, методика расчёта.

24. Методика определения площади для приемников и количества ПСК в установке (с дублёром, без дублёра). Схемы соединения ПСК в установке. Эффект затенения.

25. Метод расчёта УСГВ с применением коэффициента замещения (f -метод). Физический смысл коэффициента f .

26. Комбинированные установки (УСГВ плюс отопление), схема установки, методы отопления помещений.

Литература, используемая в разделе 2

1. Дж. Даффи, У.А. Бекман. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. Пер. с англ. М.: Мир. 1977 г. . п. 1, 2, 3, 4.
2. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. М. Энергоатомиздат. 1991.
3. А.Д. Байрамов, А.Д. Ушаков. Солнечные водонагревательные установки. Ашхабад. 1987г.
4. Авезов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. Ташкент “ФАН”. 1988.
5. У.А. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. Расчёт систем солнечного теплоснабжения. Пер. с англ. М. Энергоиздат. 1982.
6. Методические указания по расчёту и проектированию систем солнечного теплоснабжения. М. Союзтехноэнерго. 1990.
7. Установки солнечного горячего водоснабжения. ВСН 52 – 86. Нормы проектирования. М. 1988.
8. Р.Р. Авезов, М.А. Барский-Зорин, И.М. Васильева. Системы солнечного тепло – и хладоснабжения. М. Стройиздат. 1990.
9. Танака С., СудаР. Жильё дома с автономным солнечным теплохладоснабжением. Пер. с англ. М. Стройиздат. 1989.
10. Харченко Н.В., Никифоров В.А. Системы гелиотеплоснабжения и методика их расчёта. Киев. Знание. 1982.
11. Селиванов Н.П., Заколев С.В. Энергоактивные здания. М. Стройиздат. 1988.

РАЗДЕЛ 3 СОЛНЕЧНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Тема 1. Фотоэлектрическое преобразование потока солнечной радиации

Цель: Изучение теоретических основ фотоэлектрического эффекта

Перечень рассматриваемых вопросов:

- 1.1. Теоретические основы фотоэлектрического эффекта*
- 1.2. Основные характеристики кремниевого фотоэлектрического преобразователя (солнечного элемента)*
- 1.3. Конструкция фотоэлектрических модулей*
- 1.4. Возможности увеличения мощности фотоэлектрических модулей*
- 1.5 Использование плоских низкопотенциальных концентраторов в фотоэлектрических установках*

1.1. Теоретические основы фотоэлектрического эффекта

Фотоэлектрический метод преобразования солнечной энергии в электрическую относится к методам прямого получения электрической энергии с помощью статических полупроводниковых преобразователей. Физические явления, лежащие в основе принципа действия фотоэлектрического преобразователя известны уже несколько десятилетий. Однако реализация этих принципов стала возможной в связи с достигнутыми успехами в области разработки новых материалов с заданными химическими и электрофизическими свойствами.

Главной причиной развития методов прямого преобразования следует считать возникновение новых специфических областей применения источников электрической энергии. К этим областям относятся: бортовые энергетические установки космических аппаратов, автономные электростанции в отдалённых и труднодоступных районах, снабжение электроэнергией оборудования и аппаратуры средств навигации и метеорологической службы, обеспечение электроэнергией коммунальных и производственных объектов, а также строительство и эксплуатация крупных сетевых фотоэлектрических станций работающих на общую энергосистему.

Основные свойства всех видов прямого преобразования солнечной энергии в электрическую:

- отсутствие движущих элементов конструкции;
- большой ресурс;
- возможность работы в различных температурных диапазонах.

Недостатки – относительно невысокая экономичность; сложности в получении больших электрических мощностей.

Фотоэлектрические преобразователи (ФЭП) относятся к числу прямых преобразователей, обладают свойством преобразовывать световую энергию в электрическую.

Разновидностью фотоэлектрических преобразователей являются солнечные батареи, область применения которых весьма широка. Они часто используются в сочетании с химическими аккумуляторами. Фотоэлектрическое преобразование является пока главным способом получения энергии в космической энергетике. За последнее время реальная мощность (электрическая), которую можно получить от солнечных батарей, достигает до тысяч киловатт. Это, конечно, связано с большими площадями панелей, высокой стоимостью, подверженностью действию климатических факторов.

Непосредственное преобразование солнечной энергии в электрическую осуществляется полупроводниковыми фотоэлементами (или солнечными). Их использование позволило создать энергетически эффективные источники электрического питания для различных объектов (в том числе и коммунальных).

В основе принципа действия современных преобразователей лежит использование свойств полупроводников с различными типами проводимости. Напомним, чем определяется тип проводимости полупроводников.

Классическим полупроводником является четырёхвалентный кремний. Если часть атомов заменить примесями пятивалентного фосфора, то часть электронов фосфора не будет связана с атомами кремния – образуются свободные электроны, полупроводник будет n-типа.

Если примеси меньшей валентности (трёхвалентный бор), то часть валентных электронов не будет связана, образуются вакансии (дырки) – положительные заряды, ФЭП будет p-типа.

Энергетически ФЭП имеет зонную структуру.

Граница между двумя областями ФЭПа, обладающими разными примесными проводимостями называется p-n переходом (диод). (Например, индий-германий).

Вследствие диффузии: n – основные носители справа, p – основные носители слева, p-n переход – будет запирающим слоем (барьером) для основных носителей тока.

Если есть электрическое поле, то движение зарядов в этом поле изменяет энергию самих зарядов.

Электрическое поле p-n перехода непрерывно усиливается, поскольку продолжается диффузия электронов и дырок по направлениям противоположным.

Разность потенциалов будет возрастать до значения $E_2 \rightarrow$ ширины запретной зоны (потенциальный барьер, который является важным параметром для данного полупроводникового материала).

Потенциальный барьер характеризует собой величину энергии, которую необходимо затратить для разрыва связи электрона с атомом в кристаллической решётке кремния, или иначе говоря, энергии активации, затрачиваемой на образование свободной пары электрон-дырка.

Используя подобные элементы с р-п переходом, рассмотрим, что будет происходить при поглощении фотона переходным слоем.

Пусть фотон (квант света) $h\nu$ попадает в материал типа р.

Если энергия фотона превышает энергию активации атомов ПП, то при поглощении энергии фотона образуется фотопара «электрон-дырка». Под действием контактной разности потенциалов образовавшиеся электроны (неосновные носители в р-типе) будут перемещаться вправо (для них барьер р-п прозрачен). По тем же причинам при попадании фотона в материал п-типа образовавшиеся дырки (неосновные носители в п-типе) станут перемещаться влево.

Рассматриваемый механизм разделения зарядов в соединении с р-п переходом имеет большое значение в явлении фотоэлектрического эффекта.

Важно отметить следующее. В интервале времени между образованием фотопары электрон-дырка и их разделением переходным слоем следует стремиться к тому, чтобы они не имели возможности рекомбинировать друг с другом. Иными словами, необходимо обеспечить условия, при которых электрон из материала типа р и дырка из материала типа п имели бы достаточный промежуток времени для достижения ими границы переходного слоя. Таким образом, время жизни носителей зарядов, или промежуток времени от момента их образования до момента рекомбинации, является также одним из важнейших критериев полупроводникового материала.

Чем больше время жизни носителей зарядов, тем больше вероятность того, что носители (электроны проводимости) будут разделены переходным слоем.

Представим себе, что переходный слой усиленно поглощает фотоны.

По рассмотренным выше причинам произойдёт поглощение зарядов слева от границы перехода и отрицательных – справа.

Образующееся при этом электрическое поле E_f будет направлено в противоположную сторону по отношению направления диффузии носителей зарядов, или направления поля, создаваемого контактной разностью потенциалов (E_d).

В состоянии равновесия указанные поля будут определять напряжение разомкнутой цепи устройства. Это напряжение пропорционально контактной разности потенциалов данного полупроводникового материала. Таким образом, для обеспечения больших значений напряжения разомкнутой цепи (фото-ЭДС) необходимо использовать материалы с большим значением контактной разности потенциалов.

Устройства для получения электрической энергии подобным образом называются солнечными батареями.

1.2. Основные характеристики кремниевого фотоэлектрического преобразователя (солнечного элемента)

Любая солнечная электрическая система прямого преобразования состоит из набора фотоэлектрических элементов (ФЭП), которые в основе

свой представляют полупроводниковую структуру с достаточно сложным физико-химическим составом, так же называют солнечными элементами (СЭ). Размеры фотоэлектрических элементов варьируются в широком диапазоне, от нескольких сантиметров квадратных до окружностей диаметром порядка 30 см. Материалы, применяемые в производстве фотоэлектрических элементов, самые разнообразные. Они могут базировать на дешевом кремнии, а строятся, могут на экзотичный и дорогой арсенид галлия, теллура, индия.

Базовым элементом солнечной энергетики по праву считается *кремний*. Его подразделяют на три категории кристаллический, поликристаллический и аморфный.

В первом приближении технология получения *кристаллического кремния* выглядит так: кварцит, металлургический кремний, поликремний, монокристаллический кремний, кремниевые пластины.

Большинство фирм российского солнечного рынка предлагают ФЭП на пластинах, полученные на сравнительно дешевом "солнечном" *кристаллическом кремнии* (с-Si), который "грязнее" полупроводникового на три-четыре порядка, однако позволяют достичь рекордного отношения КПД 17% к цене. Теоретически максимальный коэффициент полезного действия для подобных ФЭП равен 24 %.

На сегодняшний день различные компания производят различные типы ФЭП:

1. Псевдоквадратные монокристаллические кремниевые фотопреобразователи размером 102,8х102,8 мм с диагональю 135 мм;
2. Псевдоквадратные монокристаллические кремниевые фотопреобразователи размером 125х125 мм с диагональю 150 мм;
3. Поликристаллические кремниевые фотопреобразователи, квадрат 100х100 мм, 165х165 мм, и больших размеров.

Кроме ФЭП стандартных размеров возможно изготовление изделий с меньшим размером стороны пластины. Фотоэлектрические преобразователи производятся на основе кремния *p*-типа и имеют структуру *p*⁺-*p*-*p*⁺, т.е. являются фотопреобразователями с полем на тыльной поверхности. Для снижения оптических потерь поверхность ФЭП текстурируется и покрывается антиотражающим покрытием. Контакты формируются методом фотаретной печати.

Более дешевый вариант *поликристаллического кремния* *p*-Si для СЭ не выращиваются, а производятся по литейной технологии, с дальнейшей резкой их на пластины. Получаемый КПД в 12-15 % *p*-Si/СЭ всего на несколько процентов меньше, чем у *мк*-Si СЭ при значительном снижении стоимости материала.

Простейшая конструкция кремниевого солнечного элемента показана на рис.1.1. На малой глубине от поверхности кремниевой пластины *p*-типа сформирован *p*-*n*-переход с тонким металлическим контактом. На тыльную сторону пластины нанесен сплошной металлический контакт. Когда СЭ освещается, поглощенные фотоны генерируют неравновесные электронно-

дырочные пары. Электроны, генерируемые в p -слое вблизи p - n -перехода, подходят к p - n -переходу и существующим в нем электрическим полем выносятся в n -область, которая заряжается отрицательно.

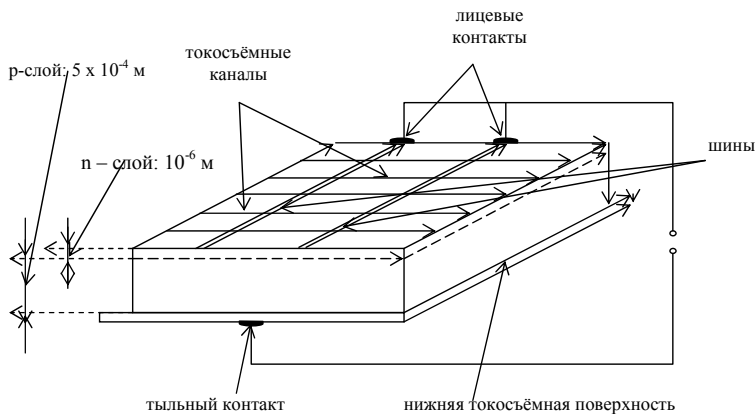


Рис. 1.1. Типовая конструкция кремниевого солнечного элемента

Величина установившейся фото-ЭДС при освещении p - n -перехода излучением постоянной интенсивности описывается уравнением вольтамперной характеристики (ВАХ):

$$U = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{\phi}}{I_o} \right), \quad (1.1)$$

где: e – элементарный заряд; k – постоянная Больцмана; T – температура фотоэлемента; I_o – ток насыщения; I_{ϕ} – интенсивность фототока.

Вид ВАХ представлен на рис.1.2.

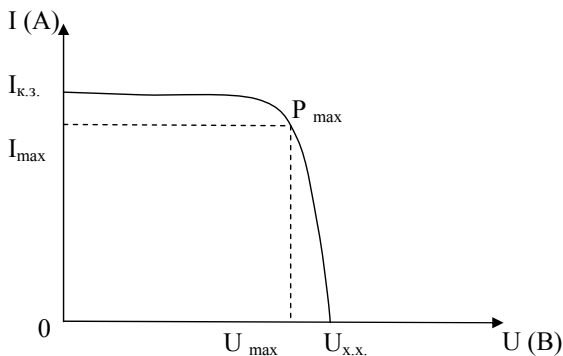


Рис. 1.2. Типовой вид зависимости тока I от напряжения U (вольтамперная характеристика солнечного элемента)

Максимальная мощность отбирается в том случае, когда фотоэлемент находится в режиме $P_{\max}$ (рис. 1.3) и вычисляется как:

$$P_{\max} = F_{\text{ff}} I_{\text{кз}} U_{\text{хх}} = I_{\max} U_{\max}, \quad (1.2)$$

где: F_{ff} – фактор заполнения ВАХ; $I_{\text{кз}}$ – ток короткого замыкания; $U_{\text{хх}}$ – напряжение холостого хода; $I_{\max}$ – ток в рабочей точке; $U_{\max}$ – напряжение в рабочей точке.

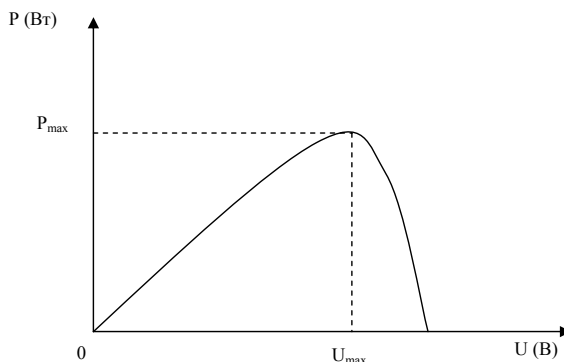


Рис. 1.3. Типовой вид зависимости мощности P от напряжения U (мощностная характеристика солнечного элемента)

Чем выше F_{ff} , тем мы имеем более качественный элемент. У кремниевых элементов фактор заполнения составляет порядка 0,75-0,8.

КПД фотоэлектрического элемента рассчитывается по формуле:

$$\eta_{\text{ФЭП}} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{S_{\text{эл.}} E_o} = \frac{P_{\max}}{S_{\text{эл.}} E_o}, \quad (1.3)$$

где: $S_{\text{эл.}}$ – площадь элемента (м^2); E_o – освещенность рабочей поверхности ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Если к внешней цепи подключено сопротивление нагрузки ($R_{\text{н}}$), то при $R_{\text{н}}=0$ устанавливается режим короткого замыкания ($I_{\text{к.з.}}$), а при $R_{\text{н}}=\infty$ режим холостого хода ($U_{\text{х.х.}}$). При работе в режиме короткого замыкания через р-п переход и внешний проводник течет максимальный ток [10]. Если цепь замкнута, то значение U в цепи (формула 1.1) будет меньше $U_{\text{х.х.}}$ и в цепи возникает ток:

$$I = I_{\phi} - I_o \left(\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right), \quad (1.4)$$

где: I_{ϕ} – фототок, I_o – обратный ток насыщения p - n – перехода; U – напряжение на нагрузке.

Ток и напряжение, которое вырабатывает солнечный элемент, сильно зависит от потока солнечной радиации. Практически каждый дополнительный фотон, поглощенный и преобразованный ФЭПом создает новую электронно-дырочную пару, которая увеличивает фототок. Следовательно, $I_{кз}$ возрастает практически в прямой зависимости от солнечной освещенности плоскости рабочей панели (рис. 1.4).

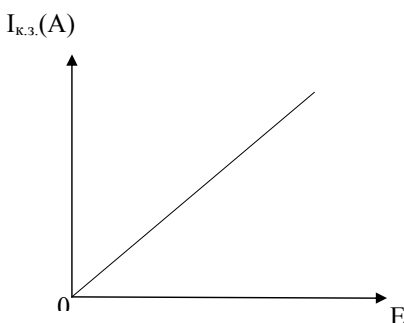


Рис. 1.4 Типовой вид зависимости тока короткого замыкания $I_{кз}$ от освещенности E_o рабочей поверхности солнечного элемента

1.3. Конструкция фотоэлектрических модулей

Современные серийные фотоэлектрические установки представляют собой плоские панели солнечных модулей (батарей) ориентированных перпендикулярно направлению распространения солнечных лучей. Основой для фотоэлектрических модулей являются солнечные элементы (СЭ), сделанные из монокристаллического, поликристаллического или аморфного кремния. Существуют также промышленные арсенид-галлиевые солнечные батареи с концентраторами на основе линз Френеля. В настоящее время, для наземного использования, на промышленный поток поставлены, в основном, кремниевые солнечные батареи.

На сегодня в мире выпускается уже значительное количество фотоэлектрических модулей, и практически все они производятся из кремниевых элементов, имеющих планарную конструкцию, т.е. плоскую приемную поверхность на которую падает солнечная радиация. Естественно

и все фотоэлектрические модули, сделанные из этих элементов, также имеют плоскую конструкцию.

В России освоено производство солнечных элементов. Они вырабатываются на базе монокристаллического и мульткристаллического кремния различных размеров и характеристик. В основном это псевдоквадратные пластины размером до 125x125 мм и толщиной до 300 мкм. В зависимости от класса средний КПД серийных элементов 14,5-15,5 %, максимальная мощность до 1,7 Вт, при токе до 3,15 А и напряжении 0,53 В, ток короткого замыкания до 3,4 А, напряжение холостого хода до 0,64 В. Основные типы фотоэлектрических модулей различных фирм производителей и различных конструкций, могут иметь мощность 12, 50, 100, 200 Вт и др. При этом модули рассчитаны на различное напряжение, обычно модули мощностями до 100-200 Вт ориентированы на автономного потребителя и используются для зарядки аккумуляторных батарей, поэтому они обычно рассчитаны на напряжение 12-17 В. На сегодняшний день, китайские производители выпускают фотоэлектрические модули (ФЭМ) на основе ФЭПов размерами 165x165 мм и более (до 250x250мм). При этом вырабатываемый ток составляет 11-12 А и более. На основе этих ФЭМов построено основное количество солнечных электростанций, работающих на общую энергосистему.

Описание стандартного фотоэлектрического модуля проведем на примере монокремниевого солнечного модуля мощностью 50 Вт, используемого в системах для обеспечения автономного потребителя. Обычно солнечный модуль выполняется в виде панели, заключенной в каркас из анодированного алюминиевого профиля (рис. 1.4).

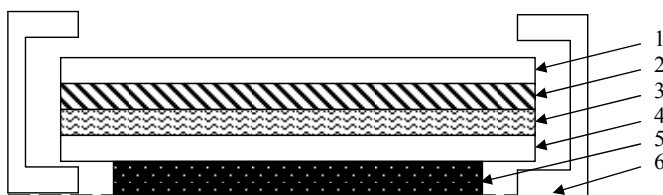


Рис. 1.4. Каркасный фотоэлектрический модуль:

1 – верхний слой покрытия (стекло или пластик); 2 – слой клея; 3 – полимерное уплотнение; 4 – герметизирующая пленка; 5 – кремниевый солнечный элемент; 6 – каркас.

Панель представляет собой фотоэлектрический генератор, защищённый закалённым стеклом 3 – 4 мм. Под ним, между слоями герметизирующей пленки, размещены солнечные элементы, электрически соединенные между собой металлическими шинами.

С тыльной стороны панель защищена от внешних воздействий слоем защитной пленки. К внутренней стороне корпуса модуля прикреплен контактная коробка с диодным блоком, предназначенная для подключения модуля в составе энергосистемы. Модуль имеет облегченную герметичную конструкцию, повышенную градоустойчивость, интервал рабочих температур $-60^{\circ}\text{C} \div +75^{\circ}\text{C}$, допустимую влажность 1000%, согласно техническим требованиям.

Электрические характеристики ФЭМ сильно зависят от температуры рабочей поверхности, чем сильнее нагрев, тем ниже напряжение и больше падение КПД. Температурные характеристики модуля указаны в таблице 1.1.

Таблица 1.1

Зависимость характеристик модуля от температуры воздуха

Температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$	Мощность, Вт	Напряжение, В	Ток, А
25	50	17	2,88
45	44,8	15,44	2,9
60	41,5	14,27	2,91

Солнечный модуль – это энергетическая система с хорошо разработанной технологией. Она обеспечивает подачу энергии потребителям, независимым от электросетей. Модуль содержит 36 монокристаллических кремниевых солнечных элементов. Модуль имеет пиковую мощность 50 Вт, напряжение 17 В и ток 3 А, при этом максимальное напряжение модуля (напряжение холостого хода) составляет около 22 В, а ток короткого замыкания 3,5 А.

1.4. Возможности увеличения мощности фотоэлектрических модулей

В различных работах описываются возможные виды потерь в мощности солнечных элементов и модулей, которыми являются оптические потери, потери на затенение контактной сеткой, и др. потери. При различных углах падения солнечного излучения на рабочую поверхность оптические потери являются основными. Для гладкой поверхности солнечного элемента, коэффициент отражения при увеличении угла падения световых лучей до $30-40^{\circ}$ почти не меняется, однако затем быстро увеличивается, стремясь к единице при углах падения, около 90° . При использовании некоторых типов концентраторов излучения угол падения части лучей может достигать значений близких к 90° .

В различных работах были представлены описания концентраторов для фотоэлектрических установок и тепловых гелиоколлекторов. В задачу диссертации входило разработать и исследовать концентратор, который подходит для большинства фотоэлектрических модулей, производимых на сегодняшний день мировой промышленностью. При установке такого

концентратора на уже действующую установку можно значительно поднять эффективность её работы и существенно увеличить её энерговыработку.

При правильных расчетах и соблюдении режимов эксплуатации практически все концентраторы будут увеличивать энерговыработку солнечных установок, однако это увеличение может не компенсировать затратную часть, в этом случае необходимо снизить себестоимость концентраторов. Это возможно, если упростить их конструкцию и использовать для их производства недорогие материалы. При некоторых режимах работы солнечных установок, некоторые типы концентраторов могут только ухудшать характеристики фотоэлектрических установок. Поэтому необходимо провести анализ, и выяснить какие типы концентраторов лучше использовать и когда они будут улучшать эффективность работы установок.

Первыми, самым простым типом концентраторов солнечного излучения для любых солнечных установок, и, в частности, для фотоэлектрических модулей являются фоконы (что означает фокусирующий конус) и фоклины (фокусирующий клин). В названиях этих концентраторов раскрывается их внешний вид (рис.1.5).

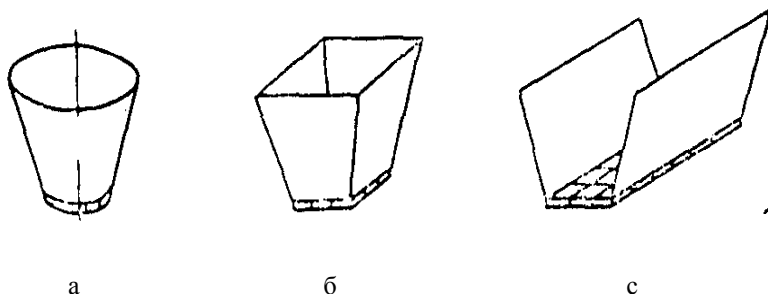


Рис. 1.5. Внешний вид концентраторов: а — фоко́н; б — фо́клин; с — фо́клин из двух отражающих поверхностей.

Фоко́н представляет собой отражающую поверхность в виде конуса (рис.1.5, а), фо́клин состоит из плоских отражающих поверхностей (рис.1.5, б), он может состоять из простых плоских зеркал, установленных под определенным углом к приемной поверхности (рис.1.5, с) [15].

Существенными отличиями фоко́нов и фо́клинов от других отражающих и линзовых концентраторов является длительная работа в пределах параметрического угла концентратора без слежения за положением Солнца. В государственном оптическом институте (г. Санкт-Петербург) В.К. Барановым были предложены параболические фоко́ны, которые имеют отражающие стенки в виде поверхностей вращения, и параболические фо́клины, имеющие корытообразные стенки. Это стационарные концентраторы, способные длительное время работать без

слежения за Солнцем, что уменьшает требования к точности изготовления солнечных станций, удешевляет их стоимость.

Второй, из наиболее известных типов концентраторов – параболоидные концентраторы солнечного излучения (рис.1.6).

Форма отражающей поверхности параболоида образуется вращением параболы вокруг оси симметрии. Одно из свойств параболы – сходямость всех световых лучей, падающих параллельно главной оптической оси (оси симметрии) в фокусе. Параболоид создаёт изображение удалённого предмета в фокальной плоскости. Параболоид относится к разряду высокопотенциальных концентраторов, концентрация излучения которых может превысить 10^4 солнц.

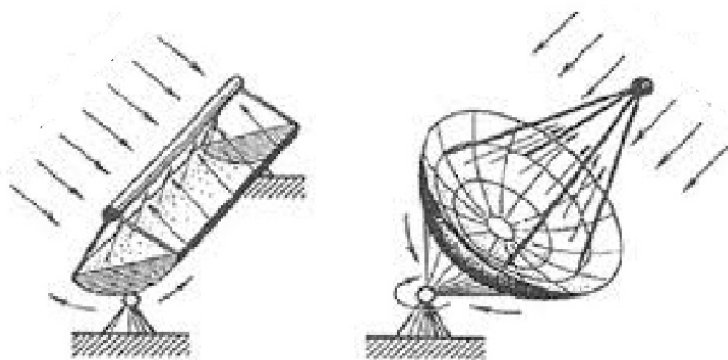


Рис. 1.6. Параболоидные концентраторы

Преимуществом этого типа концентратора является высокая степень концентрации, которая, как описывалась выше, может быть неэффективной и даже вредной для серийных солнечных установок. Из этого следует, что недостатками параболоидных концентраторов являются кроме трудоемкости их исполнения, невозможность оснащать ими серийные солнечные установки, т.к. высокая степень концентрации может их повредить. Также, при использовании этого типа концентратора, нет равномерного освещения всей поверхности фотоэлектрического модуля, что мешает его эффективной работе.

Третий известный тип – концентраторы на основе линз Френеля. Первые два типа концентраторов, в отличие от этого типа, представляли собой отражающие системы, линзы Френеля, преломляющие системы. Этот тип концентратора используется в фотоэлектрических установках на основе арсенида-галлия (с промышленным КПД 22-24 % и теоретическим 32-34 %). Этот материал является одним из наиболее эффективных материалов для создания высокоэффективных солнечных батарей. Ограничением к

использованию этих концентраторов в серийных фотоэлектрических установках являются следующие недостатки: трудоёмкость исполнения, дороговизна арсенида галлия, необходимость использования системы ориентации на Солнце, невысокая эффективность вследствие использования только прямой составляющей солнечного излучения.

Четвёртый рассматриваемый тип концентратора – это призматические концентраторы (призموконы). Призматические концентраторы представляют в поперечном сечении призму, имеющую переднюю принимающую грань, заднюю грань с отражающим покрытием, расположенную под углом к передней грани, и поверхность выхода концентрированного излучения. Основным недостатком призмоконов как класса концентраторов солнечного излучения являются большие светопотери в прозрачном материале призм, большой расход прозрачного материала (стекла или орг. стекла), относительно высокие весовые характеристики.

Пятый тип – это стационарные цилиндрические концентраторы с U – образным профилем. Идеальный профиль U-образного симметричного стационарного концентратора со сплошным отражающим покрытием образуется двумя ветвями параболы, развернутыми относительно общего фокуса. Шестой из рассматриваемых типов – жалюзные гелиостаты-концентраторы. Параллельные ряды синхронно работающих зеркал, расположенных горизонтально или под углом к горизонту, можно назвать линейными жалюзными гелиостатами-концентраторами.

К недостаткам четвертого, пятого и шестого типов из рассматриваемых концентраторов можно отнести: трудоёмкость исполнения, высокую стоимость, невозможность оснастить ими серийные фотоэлектрические батареи, вследствие недостаточно эффективной работы и невозможности использования высокой степени концентрации.

Большинство из рассматриваемых типов концентраторов имеют геометрически сложные поверхности. Производство таких концентраторов является дорогостоящим, поэтому их эффективность не всегда оправдана. Самым простым типом концентраторов солнечного излучения является фоклин. Этот концентратор хорошо описан в различных источниках. Он может состоять из простых плоских зеркал, установленных под определенным углом к приемной поверхности. Преимущества такого концентратора в простоте изготовления. Простотой изготовления отличаются только фоклины с простыми плоскими поверхностями. Другие же типы, например, описанные выше параболоторические фоклины, имеющие сложную корытообразную поверхность, отличаются трудоёмкостью изготовления. Для серийных фотоэлектрических установок, рассчитанных на работу в натурных земных условиях, невысокая степень концентрации более приемлема для увеличения их характеристик.

После проведения анализа основных типов концентраторов, используемых для фотоэлектрических установок видно, что для оснащения выпускаемых на сегодня промышленных серийных фотоэлектрических модулей, наиболее приемлемыми являются фоклины, у них низкий

коэффициент концентрации, т.е. они являются низкопотенциальным концентраторами подходящими для использования в серийных фотоэлектрических установках.

1.5 Использование плоских низкопотенциальных концентраторов в фотоэлектрических установках

При оснащении фотоэлектрических модулей концентраторами важно, чтобы солнечная освещённость их рабочей поверхности была равномерна. Т.е., согласно рис. 1.4., при неравномерной освещенности, ток, вырабатываемый фотопреобразователями модуля, будет различный, следовательно, элементы будут работать в различных режимах, что негативно скажется на работе ФЭМ.

Как ранее говорилось, практически все ФЭМ работающие в настоящее время, имеют плоскую конструкцию. При этом при нагреве их рабочей поверхности происходит падение КПД. Следовательно, логично для ФЭМ использовать и системы из концентраторов плоской конструкции с невысоким коэффициентом отражения. Такими концентраторами являются фоклины.

Для производства фоклинов. можно использовать односекционные плоские системы (рис. 1.7) позволяющие получать двух-десятикратную концентрацию солнечного излучения при приемлемых массогабаритных показателях и обеспечивать достаточно равномерное распределение плотности лучистого потока на приемнике при неточной ориентации концентратора на Солнце и деформации его отражающих поверхностей.

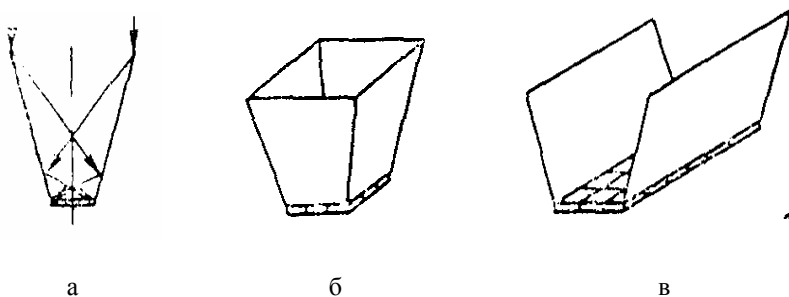


Рис. 1.7. Фоклинные зеркальные концентрирующие системы: а – ход лучей в плоском концентраторе; б – четырехгранный концентратор; в – двухгранный концентратор.

Слабоконцентрирующие системы применяются, главным образом, для повышения освещенности модулей (панелей солнечных элементов), в связи с чем, важным требованием к их выходным энергетическим характеристикам является обеспечение равномерного распределения плотности лучистого

потока на приемной поверхности. В группе систем с расположением приемника в проходящем потоке и прямолинейными образующими к концентраторам с плоскими отражающими поверхностями относятся двухгранные концентраторы, получившие название плоских фоклинов.

Известны различные конструкции плоских солнечных концентраторов с невысоким коэффициентом концентрации с двумя отражателями, установленными по бокам приёмных панелей, которые описаны в работе. Конструкция панели солнечной батареи с плоским концентратором, состоит из отражателей солнечного света, установленных по одному с обеих сторон панели. Отраженный поток от отражателя падает на половину ширины панели солнечной батареи, а сам отражатель выполнен в половину размера панели. Суммарный отраженный поток увеличивает освещенность солнечных элементов в 1,5 раза. В конструкции панели солнечной батареи отражатели концентратора выполнены в виде пленки и растянуты в плоскость при помощи специального подпружиненного каркаса. Недостатками всех этих конструкций является недостаточно эффективная работа концентраторов при установке их на серийных фотоэлектрических модулях в натурных условиях, не учитываются погодные факторы, не рассматриваются возможные поломки при плохих погодных условиях.

Известная конструкция панели солнечной батареи состоит из четырех боковых отражающих поверхностей, расположенных по две с каждой стороны фотоэлектрической панели. Как видно из графика на рис. 1.8, приведенного в работе, начиная с суммарной ширины отражателей, равной примерно двум с половиной значениям ширины панели солнечной батареи, коэффициент концентрации светового потока при использовании составного концентратора превышает аналогичный коэффициент для одинарного концентратора. Однако это может не позволить повысить в той же пропорции выходную мощность солнечной батареи. Как видно из графика (рис.1.8), площадь дальних панелей для получения реального эффекта должна в 2,5 раза и более превышать площадь ближних панелей.

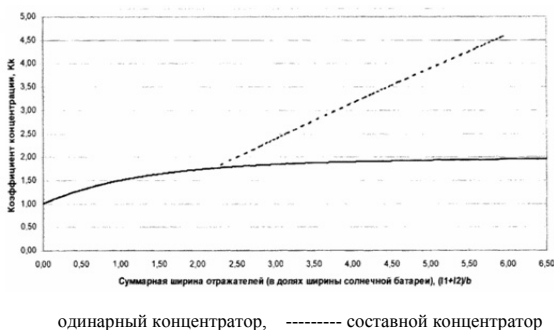


Рис. 1.8. Зависимость коэффициента концентрации от ширины отражателей

Причем при добавлении панелей сразу скажется неравномерность освещения рабочей панели модуля, что может повлиять на нормальную работу и свести эффект, полученный в результате увеличения степени концентрации, до минимума. Также при работе в натуральных условиях увеличение парусности конструкции может привести к поломкам концентратора и утяжелению в несколько раз всей конструкции.

Отсюда можно сделать вывод, что недостатком конструкции этого концентратора являются трудоёмкость исполнения, связанная с необходимостью установки двух отражающих поверхностей под определёнными углами друг к другу и к плоскости приёмной поверхности. Лишний расход материала на установку вторых отражающих поверхностей, которые имеют площади, значительно превышающие размеры отражателей непосредственно примыкающих к бокам приёмной панели.

При использовании стандартных промышленных серийных солнечных элементов наиболее приемлемая конструкция концентратора, состоящего из двух плоских отражающих, для серийных модулей энергоэффективность увеличивается значительно, чем при одной отражающей поверхности, при этом, согласно экспериментальным данным, не наступает перегрев поверхности, который может быть при использовании концентратора с более высоким геометрическим коэффициентом.

Тема 2. Фотоэлектрические системы

Цель: Изучение основных типов фотоэлектрических систем, методов их расчета

Перечень рассматриваемых вопросов:

- 2.1. Использование фотоэлектрических систем*
- 2.2. Фотоэлектрические системы для обеспечения автономного потребителя*
- 2.3. Фотоэлектрические системы электропитания постоянного тока*
- 2.4. Фотоэлектрические системы электропитания переменного тока*
- 2.5. Методики расчетов фотоэлектрических систем*

2.1. Использование фотоэлектрических систем

Одним из перспективнейших направлений использования солнечной энергетики является применения фотоэлектрических систем (ФЭС) - систем прямого преобразования световой энергии солнечного излучения в электричество. Преимущества ФЭС прямого преобразования состоят в том, что они не имеют движущихся механических частей, не нуждаются в воде или другом теплоносителе. В зависимости от конструктивного исполнения практически не нуждаются в обслуживании.

В настоящее время в результате использования новых полупроводниковых материалов, повышения их коэффициента полезного действия, удешевления стоимости и качественного улучшения характеристик стало возможным более широкие применение фотоэлектрических преобразователей и реализованных на их основе солнечных батарей.

Проблемы повышения энергоэффективности фотоэлектрических систем электропитания и электроснабжения, решаются на различных уровнях, включая повышение коэффициентов полезного действия при преобразовании энергии солнечного излучения в электрическую энергию за счет использования новых материалов, технологий их производств. Использование концентраторов солнечного излучения для уменьшения площади дорогих полупроводниковых материалов, применения различных видов электрохимических аккумуляторов для обеспечения электрической энергией потребителей в то время, когда существенно уменьшается интенсивность солнечного излучения.

Развитие фотоэлектрических систем электроснабжения является особенно важным для Российской Федерации благодаря благоприятным климатическим условиям - интегральная величина энергии солнечного излучения по территории России колеблется в диапазоне $1000 \div 1500 \text{ кВт} \cdot \text{час} / \text{м}^2$ в год при перемещении по широте.

Важным фактором является также наличие мощной производственной базы по выпуску основного материала для фотоэнергетики – полупроводникового кремния, который производится в России на Подольском заводе чистых металлов, в Украине на Запорожском

титаномагниевого комбинате и ОАО «Квазар» (г. Киев). Следует отметить, что на заводе «Квазар» освоено не только производство полупроводникового кремния, но также фотопреобразователей и фотобатарей на уровне 150 МВт в год, значительная часть которых идёт на экспорт.

Программой государственной поддержки развития возобновляемых нетрадиционных источников предусматривается, что к 2017 г. производство солнечных батарей в России должно достичь 96,5 МВт.

В России также интенсивно идет разработка и освоение серийного производства приборов автоматики для преобразования и управления генерируемой мощности солнечных фотоэлектрических систем, например, в г. Подольск.

Фотоэлектрические системы структурно и конструктивно однородны, что позволяет автоматизировать их производство. А последовательно-параллельное соединение обеспечивает рабочие токи от микро до сотен ампер, при напряжениях от полутора до нескольких сотен вольт.

До недавнего времени широкому использованию солнечного электричества препятствовало отсутствие соответствующей дополнительной аппаратуры, позволяющей полноценно использовать преобразованную энергию. Стоимость фотоэлектрической системы за последние десять лет снизилась практически в пять раз. Это обусловлено как тем, что сами солнечные панели стали дешевле, так и тем, что уменьшилась стоимость преобразователей постоянного (переменного) напряжения и другого периферийного оборудования, имеющего более практичную конструкцию, основанную на современных технологиях.

Интенсивность потребление средней семьи из четырех человек составляет, примерно, 3 - 4 кВт·ч. Такое количество энергии можно генерировать с помощью солнечных панелей на крыше, если направленная к солнцу часть крыши составит 20-30 квадратных метров. Для установок с большей производимой мощностью требуется соответственно и большая площадь. Способ получения электроэнергии от солнца больше всего подходит для индивидуальных домов, когда необходимо обеспечить собственные нужды потребителей.

Недостатком фотоэлектрических установок является отсутствие возможности генерировать электричество ночью, или в плохую погоду. Но в то же время эту проблему можно решить, пользуясь электроэнергией из общей сети, или используя избыточную электроэнергию, запасенную в аккумуляторных батареях. В системах автономного электроснабжения в качестве резервного источника применяется бензиновый или дизельный электрогенератор.

Автономные источники электропитания на базе солнечных фотоэлектрических преобразователей являются в настоящее время наиболее перспективными в плане электроснабжения как индивидуальных потребителей, так и при генерировании электрической энергии в питающую электрическую систему.

Тенденции широкомасштабного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, особенно солнечных фотоэлектрических преобразователей приводит к необходимости разработки методов и устройств преобразования постоянного напряжения в переменное однофазное и трехфазное синусоидальное напряжение.

Метод преобразования солнечной энергии в энергию электрическую переменного синусоидального тока с подключением в энергосистему должен предусматривать следующие мероприятия:

- преобразование солнечной энергии в энергию постоянного тока (осуществляется с помощью солнечных батарей на полупроводниковых элементах);
- стабилизация нестабильного напряжения, поступающего от нетрадиционного источника (осуществляется с помощью импульсных стабилизаторов напряжения);
- преобразование постоянного стабильного напряжения в переменное синусоидальное напряжение;
- синхронизация переменного напряжения синусоидальной формы, получаемого от фотоэлектрической системы с напряжением промышленной сети и включение получаемого напряжения в энергосистему.

В системах электроснабжения автономных объектов в качестве первичных источников могут быть использованы солнечные батареи, мощность которых лежит в пределах 50÷300 Вт при номинальной освещенности. Соответствующим набором солнечных батарей получаемую мощность можно увеличить.

Современные преобразовательные устройства, предназначенные для преобразования напряжения постоянного тока от возобновляемых источников в электрическую энергию требуемого качества с выходным синусоидальным напряжением, должны обеспечивать высокую точность преобразования. Поэтому они требуют регулирования выходных параметров – напряжения или тока в широких пределах для поддержания постоянного значения отдаваемой потребителю мощности, и характеризуются высокими энергетическими и надежностными показателями.

2.2. Фотоэлектрические системы для обеспечения автономного потребителя

Интенсивность потребления средней семьи из четырех человек примерно 3 или 4 кВт электричества в час. Такое количество энергии можно генерировать с помощью солнечных панелей на крыше, если направленная к солнцу часть крыши составит 20-30 квадратных метров. Для установок с большей производимой мощностью требуется соответственно и большая площадь. Способ получения электроэнергии от солнца больше всего подходит для индивидуальных домов, когда необходимо обеспечить собственные нужды потребителей.

Недостатком фотоэлектрических установок является отсутствие возможности генерировать электричество ночью или в плохую погоду. Но в то же время эту проблему можно решить, пользуясь электроэнергией из общей сети или используя избыточную электроэнергию, запасенную в аккумуляторных батареях. В системах автономного электроснабжения в качестве резервного источника применяется бензиновый или дизельный электрогенератор.

Автономные источники электропитания на базе солнечных фотоэлектрических преобразователей являются в настоящее время наиболее перспективными в плане электроснабжения как индивидуальных потребителей, так и при генерировании электрической энергии в питающую электрическую систему.

2.3. Фотоэлектрические системы электропитания постоянного тока

В народном хозяйстве имеются потребители постоянного тока (электрическое освещение, двигатели постоянного тока и др.) для питания которых можно использовать солнечные батареи. Блок-схема преобразователя для электропитания потребителей постоянного тока от солнечных батарей (СБ) представлена на рисунок 2.1.

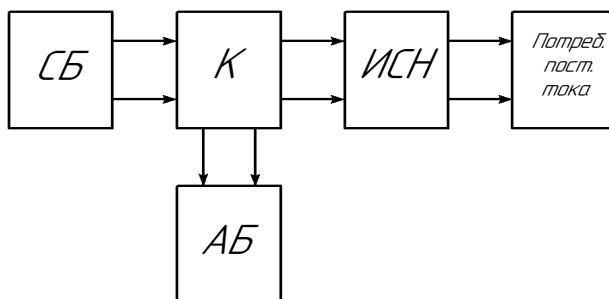


Рис. 2.1. Блок-схема преобразователя для электропитания потребителей постоянного тока от СБ.

Блок-схема включает: СБ – солнечные батареи; К – коммутатор (коммутирующее устройство); АБ – аккумуляторная батарея; ИСН – импульсный стабилизатор напряжения.

В зависимости от требуемой мощности модули солнечных элементов соединяются в батареи. Для получения требуемого напряжения они соединяются последовательно, а для получения необходимого значения тока – параллельно.

Коммутирующее устройство необходимо для коммутации ИСН и нагрузки к солнечной батарее или к аккумуляторной батарее. Необходимость коммутирующего устройства заключается в следующем: в солнечное время дня, если аккумулятор разряжен постоянное напряжение от СБ поступает через К на АБ и заряжает до необходимого значения. При заряженном аккумуляторе К переключает СБ через ИСН на нагрузку постоянного тока. В состав блока К входит устройство контроля заряда-разряда АБ, которое следит за состоянием АБ. В темное время суток К подключает нагрузку к АБ. Кроме того, назначение АБ заключается в следующем: если нагрузкой постоянного тока является двигатель постоянного тока, мощность которого допустим равна или немного больше мощности СБ, то при запуске двигателя пусковой ток в несколько раз превосходит номинальный, а так как солнечная батарея не может обеспечить такой ток в момент запуска двигателя, то он обеспечивается за счет АБ.

При питании нагрузки от СБ, напряжение на выходе СБ может быть нестабильным в виду изменения потока солнечной энергии, падающей на поверхность СБ (облачность). С целью стабилизации напряжения, поступающего на нагрузку, необходимо включение стабилизатора напряжения. В качестве стабилизатора напряжения наиболее целесообразным является применение импульсного стабилизатора напряжения – ИСН, в котором использование широтно-импульсной модуляции (ШИМ) приводит к уменьшению массогабаритных параметров. На выходе ИСН имеет стабилизированное напряжение постоянного тока.

Общий вид коммутирующего устройства, аккумуляторной батареи и импульсного стабилизатора напряжения показан на рис. 2.2.



а)



б)



в)

Рис.2.2. Вспомогательное оборудование фотоэлектрических систем: коммутирующее устройство (а), аккумуляторная батарея (б) и импульсный стабилизатор напряжения (в)

2.4. Фотоэлектрические системы электропитания переменного тока

Тенденции широкомасштабного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, особенно солнечных фотоэлектрических преобразователей приводит к необходимости разработки методов и устройств преобразования постоянного напряжения в переменное однофазное и трехфазное синусоидальное напряжение.

Метод преобразования солнечной энергии в энергию электрическую переменного синусоидального тока с подключением в энергосистему должен предусматривать следующие мероприятия:

- преобразование солнечной энергии в энергию постоянного тока (осуществляется с помощью солнечных батарей на полупроводниковых элементах);

- стабилизация нестабильного напряжения, поступающего от нетрадиционного источника (осуществляется с помощью импульсных стабилизаторов напряжения);

- преобразование постоянного стабильного напряжения в переменное синусоидальное напряжение 220 В с частотой 50 Гц;

- синхронизация переменного напряжения синусоидальной формы, получаемого от фотоэлектрической системы с напряжением промышленной сети и включение получаемого напряжения в энергосистему.

В системах электроснабжения автономных объектов в качестве первичных источников могут быть использованы солнечные батареи, мощность которых лежит в пределах 50÷250 Вт при номинальной освещенности. Соответствующим набором солнечных батарей получаемую мощность можно увеличить.

Современные преобразовательные устройства, предназначенные для преобразования напряжения постоянного тока от возобновляемых источников в электрическую энергию требуемого качества с выходным синусоидальным напряжением, должны обеспечивать высокую точность преобразования. Поэтому они требуют регулирования выходных параметров – напряжения или тока в широких пределах для поддержания постоянного значения отдаваемой потребителю мощности, и характеризуются высокими энергетическими и надежностными показателями.

Блок-схема преобразователя для электропитания потребителей переменного тока от солнечных батарей представлена на рис. 2.3.

Представленная на рис. 2.3 блок-схема включает:

СБ – солнечные батареи;

К1 – коммутирующее устройств для коммутации напряжения постоянного тока;

АБ – аккумуляторные батареи;

ИСН – импульсный стабилизатор напряжения;

И – инвертор;

РИП – резервный источник питания;

К2 – коммутирующее устройство для коммутации напряжения переменного тока.

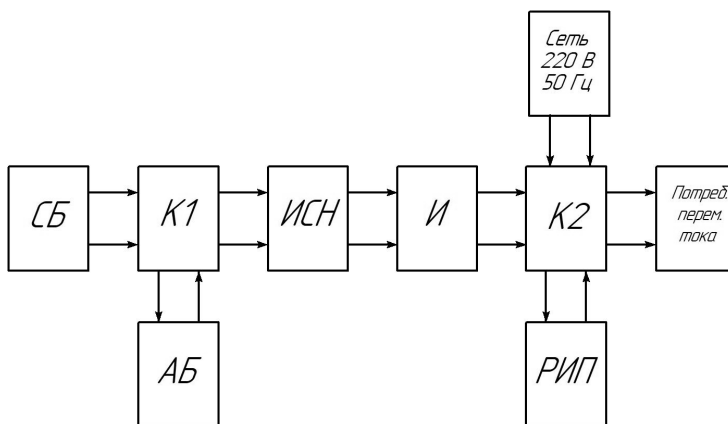


Рис. 2.3. Блок-схема преобразователя для электропитания потребителей переменного тока от СБ

Для электропитания потребителей переменного тока необходимо постоянное напряжение с выхода ИСН преобразовать в переменное, что осуществляется с помощью инвертора И (рис. 2.4).

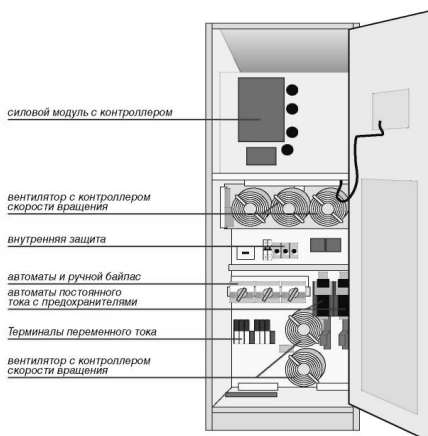


Рисунок 2.4. Шкаф-инвертор

Полученное переменное напряжение через коммутирующее устройство К2 питает нагрузку переменного тока. В пасмурные зимние дни, когда солнечные батареи не обеспечивают требуемую мощность, а аккумуляторные

батареи разряжены, коммутирующее устройство К2 переключают потребителей переменного тока к резервному источнику питания, в качестве которого может быть использован бензиновый или дизельный электрогенератор, общий вид которых показан на рис. 2.5, возможно использование другого альтернативного источника питания: ветрогенератор, малая гидротурбина и др., либо питание от сети переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц.



Рисунок 2.5. Общий вид бензинового (а) и дизельного (б) генератора

Данный способ может быть использован для автономной системы электропитания жилого дома, который удален от промышленных систем электропитания более чем на 2 км, когда экономически невыгодно и нецелесообразно устанавливать опоры электропередач и провода [2].

Схема электроснабжения дома без учета резервного источника питания показана на рисунке 2.6, а при использовании дублера, например ветрогенератора, на рисунке 2.7.

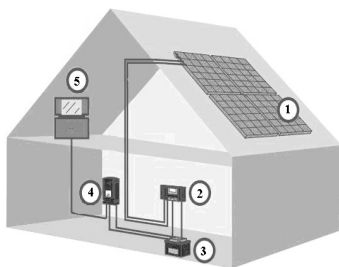


Рис. 2.6. Схема электроснабжения дома без резервного источника питания.

На схеме: 1 – солнечные батареи, 2 – коммутирующее устройство (контроллер солнечного заряда), 3 – аккумуляторные батареи, 4 – инвертор, 5 – потребитель переменного тока.

Согласно современным требованиям по выработке электроэнергии экологически безопасными возобновляемыми, альтернативными источниками энергии в ряде стран Европы приняты законы о передаче избыточной генерируемой электроэнергии в общую систему энергоснабжения.



Рис. 2.7. Схема электроснабжения дома при использовании ветроэлектрического генератора: 1 – солнечные батареи, 2 – коммутирующее устройство (контроллер солнечного заряда), 3 – аккумуляторные батареи, 4 – инвертор, 5 – потребитель переменного тока.

При наличии свободного места на крышах и стенах домов, ориентированных на юг, в Крыму возможна установка СБ для передачи избыточной генерируемой электроэнергии в систему электропитания. Однако их широкое применение пока сдерживается высокой стоимостью солнечных батарей и большими сроками окупаемости.

Современные технологии способствуют увеличению к.п.д. солнечных элементов, улучшению их технических характеристик, также наблюдается тенденция к снижению их стоимости. Перечисленные факторы приводят к росту использования солнечных батарей в наземных системах получения электроэнергии экологически безопасным методом. Один из способов электроснабжения потребителей постоянного и переменного тока с передачей избыточной генерируемой электроэнергии в промышленную сеть возможно осуществить с помощью предлагаемой блок-схемы (рис. 2.8).

В данной блок-схеме (рис. 2.8) предусмотрено устройство БСС – блок синхронизации с сетью, которое осуществляет синхронизацию синусоидального напряжения с выхода инвертора (И) через коммутирующее устройство К2 с напряжением промышленной сети по амплитуде, частоте и фазе и передачу генерируемой электроэнергии в сеть. Блок синхронизации (БСС) обеспечивает подключение выхода преобразователя напряжения в сеть при равенстве частот преобразованного напряжения и напряжения сети с точностью $\pm 0,1$ Гц и если преобразованное напряжение больше, чем напряжение сети.

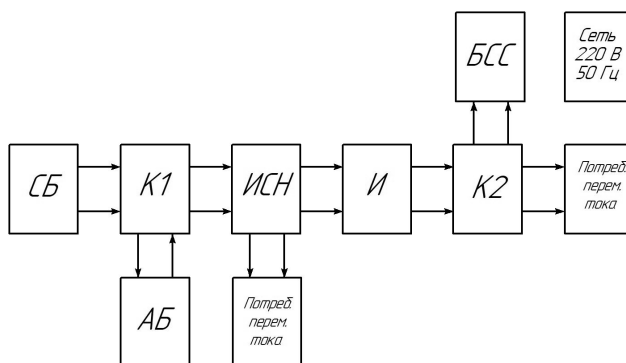


Рис. 2.8. Блок-схема системы электроснабжения внутренних потребителей постоянного и переменного тока с передачей избыточной генерируемой энергии в промышленную сеть переменного тока.

Промышленностью выпускаются блоки бесперебойного питания, в которые входят стабилизаторы напряжения, инверторы и коммутаторы.

Автономные источники электропитания на базе солнечных фотоэлектрических преобразователей являются перспективными в плане электроснабжения как индивидуальных потребителей, так и при генерировании электрической энергии трехфазного синусоидального напряжения в питающую электрическую систему. Сущность данного метода заключается в стабилизации постоянного напряжения фотоэлектрических преобразователей, преобразовании этого напряжения в прямоугольные импульсы, умножении по частоте, и подаче фаз прямоугольных импульсов через распределитель на три инвертора, выходы которых подключены к трем усилителям мощности и подключение этих усилителей мощности к трем фазам питающей системы (рис. 2.9).

Напряжение постоянного тока от нетрадиционного источника энергии поступает на импульсный стабилизатор напряжения (ИСН) – блок 1. ИСН преобразовывает нестабильное напряжение нетрадиционного источника питания в стабильное напряжение постоянного тока. Мощность источника зависит от применяемых силовых ключей и мощности нетрадиционного источника питания. С выхода ИСН стабилизированное напряжение поступает на схему управления и остальные блоки.

Напряжение одной из фаз, например фазы А, поступает на формирователь сетевых импульсов напряжения (ФСИН) – блок 2, который формирует напряжение прямоугольной формы. Это напряжение поступает на оптоэлектронный преобразователь (ОЭП), который выполнен в виде оптоэлектронной пары светодиод – фотодиод и служащий для гальванической развязки между сетевым напряжением и источником питания схемы преобразователя. Фотодиод ОЭП подключен к умножителю частоты (УЧ), блок 3, который служит для умножения в шесть раз частоты сетевого

напряжения. Блок 3 через переключатель подключается к распределителю по фазам (РФ) – блоку 5, который осуществляет сдвиги по фазам А, В, С, т.е. трехфазное напряжение. Схемотехника устройства содержит генератор частоты (Г) – блок 4, который представляет собой внутренний генератор частотой 300 Гц для работы в режиме отсутствия напряжения сети.

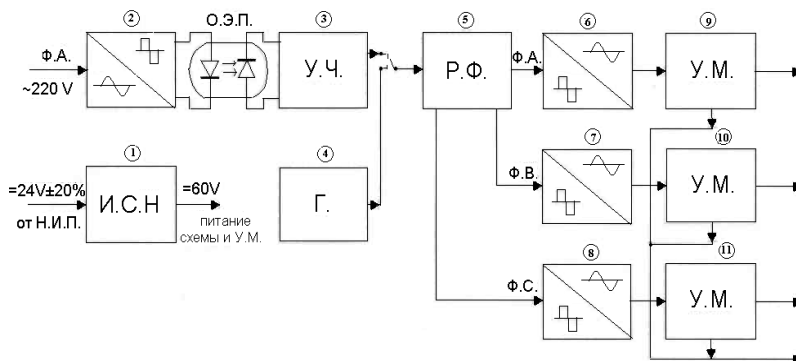


Рис. 2.9. Структурная блок-схема трехфазного преобразователя синусоидального напряжения.

Выходы распределителя по фазам подключены к блокам – 6, 7 и 8, то есть к преобразователям напряжения прямоугольной формы в напряжение синусоидальной формы фазы А, фазы В, фазы С соответственно. Выходы блоков 6, 7 и 8 подключены к блокам 9, 10 и 11 – усилителям мощности (УМ) каждой фазы соответственно.

Устройство формирования прямоугольных импульсов (блок 1) выполнено по безтрансформаторной схеме с оптоэлектронной развязкой. Умножитель частоты (блок 3) умножает частоту сети в 6 раз для нормальной работы распределителя фаз (блок 6). Генератор (блок 4) предназначен для полной автономной работы с нетрадиционным источником энергии. Он генерирует импульсы для работы распределителя фаз при отсутствии питающей сети и в этом случае вся система синхронизации работает от одной фазы.

2.5. Методики расчетов фотоэлектрических систем

Расчёты фотоэлектрической системы состоит из нескольких этапов:

1). Расчет фотоэлектрического модуля

Используем стандартный фотоэлектрический модуль с фотоэлементами, характеристики которых предложены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Электрические характеристики солнечного элемента при освещенности 1000 Вт/м^2

Размер, мм	Диаметр, мм	$I_{\text{к.з.}}, \text{ А}$	$U_{\text{х.х.}}, \text{ В}$	$U_{\text{max}}, \text{ В}$	$I_{\text{max}}, \text{ А}$	$P_{\text{max}}, \text{ Вт}$
125*125	150	5,2	0,61	0,49	4,7	2,3

Внешний вид фотоэлемента представлен на рис. 2.10.

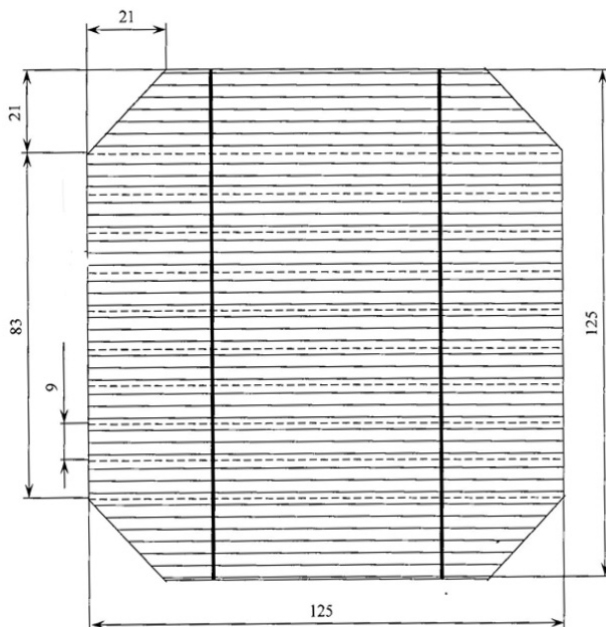


Рис. 1. Кремниевый фотоэлектрический элемент (размеры 125х125 мм)

Плотность тока, вырабатываемая фотоэлементом (ФЭП), вычисляется как:

$$J_{\text{м}} = \frac{I_{\text{max}}}{(12,5^2 - 2 \cdot 2,1^2)} \left(\text{мА/см}^2 \right) \quad (2.1)$$

Шаг сетки контактов фотоэлемента размером 125х125 мм, составляет 3мм.

Рабочая поверхность модуля состоит из ФЭП, представляющих полосы шириной 9мм.

Ток получаемый с ФЭП размерами 9*125 мм:

$$I_{м9 \times 125} = 0,0319 (0,9 \cdot 12,5) = 0,36 \text{ A}$$

Количество ФЭП соединенных последовательно для получения напряжения модуля 12 В будет:

$$N_{ФЭПос} = \frac{U_{мод}}{U_{м9 \times 125}} \quad (2.2)$$

где $U_{м9 \times 125}$ -напряжение (В) одного ФЭП размером 9*125 мм.

Необходимый ток для получения мощности модуля 120Вт:

$$I_{мод} = \frac{P_{мод}}{U_{мод}} \quad (2.3)$$

Количество ФЭП соединенных параллельно:

$$N_{ФЭпар} = \frac{I_{мод}}{I_{м9 \times 125}} \quad (2.4)$$

Количество ФЭП в модуле:

$$N_{ФЭ} = N_{ФЭос} \cdot N_{ФЭпар}$$

Длина модуля:

$$L_{мод} = (L_{дл.ФЭ} + 0,003)N_{ФЭ,по дл.} + 0,03 = (0,125 + 0,003) \cdot 8 + 0,03 = 1,054 \text{ м}$$

где $L_{дл.ФЭ}$ -длина одного ФЭП, $N_{ФЭ,по дл.}$ -количество ФЭ по длине.

Ширина модуля:

$$B_{мод} = (B_{шир.ФЭ} + 0,003)N_{ФЭ по шир.} + 0,03 = (0,009 + 0,003)81 + 0,03 = 1 \text{ м}$$

Размер модуля составляет 1,054*1 м.

2). Расчет автономной фотоэлектрической системы электроснабжения

Для расчета системы необходимо задать потребляемую мощность (табл.2.2).

Потребитель энергии, Вт

Нагрузка переменного тока, питаемая через инвертор	Мощность, Вт	$t_{\text{нед}}$, час/нед	Q, Втч/нед

Расчет фотоэлектрической системы производится по следующим формулам:

Коэффициент полезного действия инвертора принимается 80%

$$Q_{\text{инв}} = \frac{Q}{\eta_{\text{инв}}} (\text{Вт} \cdot \text{ч} / \text{нед}) \quad (2.5)$$

Входное напряжение инвертора переменного тока ;обычно 12 или 24 В.

Полная нагрузка переменного тока в Ач в неделю:

$$Iq_{\text{инв}} = \frac{Q_{\text{инв}}}{U_{\text{инв}}} (A \cdot \text{ч} / \text{нед}) \quad (2.6)$$

Потребление Ач в сутки:

$$Iq = \frac{Iq_{\text{инв}}}{7} (A \cdot \text{ч}) \quad (2.7)$$

3). Расчет аккумуляторной батареи (АКБ)

Количество электричества, которое надо запасти в АКБ:

$$C_{+25} = Iq \cdot (1 + n) A \cdot \text{ч} \quad (2.8)$$

где n- максимальное число последовательных «дней без солнца»или число дней автономного электроснабжения без подзарядки

Емкость АБ, с учетом коэффициента глубины разряда:

$$C'_{+25} = \frac{C_{+25}}{K_{\text{гп}}} A \cdot \text{ч} \quad (2.9)$$

где $K_{\text{гп}}$ –коэффициент глубины разряда АКБ (%).

Емкость АБ необходимая при пониженной температуре:

$$C = C'_{+25} \cdot K (A \cdot \text{ч}) \quad (2.10)$$

где K-коэффициент учитывающий снижение емкости АКБ при понижении температуры АКБ (при 15 °С, K=1,1).

Номинальная емкость выбранной батареи C_{AB} .

Число батарей соединенных параллельно:

$$N_{пар. AB} = \frac{C}{C_{AB}} \quad (2.11)$$

Число батарей соединенных последовательно:

$$N_{пос. AB} = \frac{U}{U_{AB}} \quad (2.12)$$

где U - напряжение сети постоянного тока; U_{AB} - напряжение одной АКБ

Общее количество АКБ:

$$N_{AB} = N_{пар. AB} \cdot N_{пос. AB} \quad (2.13)$$

4). Расчет количества фотоэлектрических модулей

Количество электричества с учетом потерь на заряд – разряд аккумуляторной батареи(обычно 20% при использовании специальных батарей).

$$Iq_{з-р} = Iq(1 + K_{з-р})A \cdot \eta$$

где $K_{з-р}$ - коэффициент потерь на заряд- разряд; Iq - потребление электричества в сутки

Количество пиковых часов:

$$t_{пик} = \frac{E}{n} \quad (2.14)$$

где E -приход солнечной радиации на 1 м² за месяц; n - число дней в месяце.

Требуемый ток от фотоэлектрической системы:

$$I_{CB} = \frac{Iq_{з-р}}{t_{пик}} A \quad (2.15)$$

Количество модулей, соединенных параллельно:

$$N_{пар, м} = \frac{I_{CB}}{I_m} ум. \quad (2.16)$$

Число модулей, соединенных последовательно:

$$N_{пос, м} = \frac{U}{U_m} ум. \quad (2.17)$$

Общее количество модулей:

$$N = N_{пар, м} \cdot N_{пос, м} ум. \quad (2.18)$$

Пример 1. Расчет фотоэлектрической системы

1). Расчёт фотоэлектрического модуля

Плотность тока;

$$J_m = \frac{4.7}{(12.5^2 - 2 \cdot 2.1^2)} = 31.9 \text{ мА/см}^2$$

Шаг сетки контактов ФЭП (125*125) составляет 3мм.

Ток получаемый с ФЭП размерами 9*125 мм:

$$I_{м9 \times 125} = 0,0319 (0,9 \cdot 12,5) = 0,36 \text{ А}$$

Количество ФЭ соединенных последовательно для получения напряжения модуля 12 В:

$$N_{\text{ФЭ пос}} = \frac{U_{\text{мод}}}{U_{м9 \times 125}} = \frac{12}{0,5} = 24 \text{ шт}$$

где $U_{м9 \times 125}$ -напряжение одного ФЭ размером 9*125, В

Необходимый ток для получения мощности модуля 120Вт:

$$I_{\text{мод}} = \frac{P_{\text{мод}}}{U_{\text{мод}}} = \frac{120}{12} = 10 \text{ А}$$

Количество ФЭ соединенных параллельно:

$$N_{\text{ФЭ пар}} = \frac{I_{\text{мод}}}{I_{м9 \times 125}} = \frac{10}{0,36} \approx 27 \text{ шт}$$

Количество ФЭ в модуле:

$$N_{\text{ФЭ}} = N_{\text{ФЭ пос}} \cdot N_{\text{ФЭ пар}} = 648 \text{ шт}$$

Длина модуля:

$$L_{\text{мод}} = (L_{\text{дл.ФЭ}} + 0,003) N_{\text{ФЭ, по дл.}} + 0,03 = (0,125 + 0,003) \cdot 8 + 0,03 = 1,054 \text{ м}$$

Где $L_{\text{дл.ФЭ}}$ -длина одного ФЭ,

$N_{\text{ФЭ, по дл.}}$ -количество ФЭ по длине;

Ширина модуля:

$$B_{\text{мод}} = (B_{\text{шир.ФЭ}} + 0,003) N_{\text{ФЭ по шир.}} + 0,03 = (0,009 + 0,003) 81 + 0,03 = 1 \text{ м}$$

Размер модуля составляет 1,054*1м.

2). Потребитель энергии:

Система «Теплый пол» мощностью 305Вт

Таблица. 2.3

Потребитель энергии, Вт

Нагрузка переменного тока, питаемая через инвертор	Мощность, Вт	t _{нед.} , час/нед	Q, Втч/нед
Система «Теплый пол»	305	14	4270

Коэффициент полезного действия инвертора принимается 80%

$$Q_{инв} = \frac{Q}{\eta_{инв}} = \frac{4270}{0,8} = 5337,5 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{нед}$$

Входное напряжение инвертора переменного тока ;обычно 12 или 24 В
Принимаем 12В

Полная нагрузка переменного тока в Ач в неделю:

$$Iq_{инв} = \frac{Q_{инв}}{U_{инв}} = \frac{5337,5}{12} = 444,8 \text{ А} \cdot \text{ч} / \text{нед}$$

Потребление Ач в сутки:

$$Iq = \frac{Iq_{инв}}{7} = \frac{444,8}{7} = 63,5 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

3). Расчет аккумуляторной батареи

Количество электричества, которое надо запасти в АБ:

$$C_{+25} = Iq \cdot (1 + n) = 63,5(1 + 1) = 127 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

где n- максимальное число последовательных «дней без солнца»или
число дней автономного электроснабжения без подзарядки

Емкость АБ, с учетом коэффициента глубины разряда

$$C'_{+25} = \frac{C_{+25}}{K_{гp}} = \frac{127}{0,4} = 317,7 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

где $K_{гp}$ –коэффициент глубины разряда АБ %

Емкость АБ необходимая при пониженной температуре

$$C = C'_{+25} \cdot K = 317,7 \cdot 1,1 = 349,5 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

где K-коэффициент учитывающий снижение емкости АБ при понижении
температуры АБ(при 15 °С $K=1,1$)

Номинальная емкость выбранной батареи $C_{АБ}=200 \text{ А} \cdot \text{ч}$

Число батарей соединенных параллельно:

$$N_{пар.АБ} = \frac{C}{C_{АБ}} = \frac{349,5}{200} \approx 2 \text{ шт.}$$

Число батарей соединенных последовательно:

$$N_{пос.АБ} = \frac{U}{U_{АБ}} = \frac{12}{12} = 1 \text{ шт.}, \text{ где } U - \text{напряжение сети постоянного тока; } U_{АБ} -$$

напряжение одной АКБ.

Общее количество АКБ: $N_{АБ} = N_{пар.АБ} \cdot N_{пос.АБ} = 2 \cdot 1 = 2 \text{ шт.}$

4). Расчет количества фотоэлектрических модулей

Количество электричества с учетом потерь на заряд – разряд
аккумуляторной батареи(обычно 20% при использовании специальных
батарей).

$$Iq_{з-р} = Iq(1 + K_{з-р}) = 63,5(1 + 0,2) = 76,2 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

где $K_{з-р}$ - коэффициент потерь на заряд- разряд; Iq - потребление
электричества в сутки

Количество пиковых часов:

$$t_{\text{пик}} = \frac{E}{n} = \frac{132,5}{31} \cdot 3,9 \text{ ч}$$

где E-приход солнечной радиации на 1 м² за месяц

n- число дней в месяце

Требуемый ток от СБ:

$$I_{\text{СБ}} = \frac{I_{\text{q3-p}}}{t_{\text{пик}}} = \frac{76,2}{3,9} = 19,5 \text{ А}$$

Количество модулей, соединенных параллельно:

$$N_{\text{пар,м}} = \frac{I_{\text{СБ}}}{I_{\text{м}}} = \frac{19,5}{10} \approx 2 \text{ шт.}$$

Число модулей, соединенных последовательно:

$$N_{\text{пос,м}} = \frac{U}{U_{\text{м}}} = \frac{12}{12} = 1 \text{ шт.}$$

Общее количество модулей:

$$N = N_{\text{пар,м}} \cdot N_{\text{пос,м}} = 2 \cdot 1 = 2 \text{ шт.}$$

Пример 2. Расчет фотоэлектрической системы (с концентратором)

1). Расчёт фотоэлектрического модуля

В качестве приемника солнечной радиации используем ФЭП завода "Солнечный Ветер" (Краснодар). Завод производит различные модификации элементов на основе монокристаллического кремния виде псевдоквадрата, с размерами: 85x85 мм, 102,8x102,8 мм, 103.5x103.5 мм, 125x125 мм, а также их части.

Таблица 2.4

Электрические характеристики солнечных элементов

Размер, мм	Диаметр, мм	$I_{\text{к.з.}}, \text{ А}$	$U_{\text{х.х.}}, \text{ В}$	$U_{\text{м}}, \text{ В}$	$I_{\text{м}}, \text{ А}$	$P_{\text{м}}, \text{ Вт}$
85x85	100	2.4	0.61	0.49	2.14	1.05
102.8x102.8	135	3.6	0.61	0.49	3.3	1.6
103.5x103.5	125	3.6	0.61	0.49	3.3	1.6
125x125	150	5.2	0.61	0.49	4.7	2.3

Концентрация солнечной радиации в концентрирующей системе на заданной широте приведенная к условиям АМ 1,5 коэффициент концентрации $K_c = 4,5$.

$$K_{c \text{ АМ-1}} = \frac{553,77 \cdot 1,1879}{1000} \cdot 4,5 = 3$$

В качестве ФЭП выбираем псевдоквадрат размером 125x125 мм.

По номограммам находим параметры ФЭП при $K_c = 3 \text{ AM 1}$

Таблица 2.5

Электрические характеристики ФЭП при $K_c = 3 \text{ AM 1}$

Размер, мм	Диаметр, мм	U_m , В	I_m , А	P_m , Вт
125x125	150	0,50	13,5	6,75

Плотность тока

$$J_m = 13,5 / (12,5^2 - 2 \cdot 2,1^2) = 91,56 \text{ мА/см}^2$$

Шаг сетки контактов ФЭП (125x125) составляет 3мм

Ток получаемый с ФЭП размером 9x125 мм

$$I_{m \ 9 \times 125} = 0,09156 (0,9 \cdot 12,5) = 1,03 \text{ А}$$

Количество ФЭ соединенных последовательно для получения напряжения модуля 12 В

$$N_{\text{ФЭ пос}} = U_{\text{мод}} / U_{m \ 9 \times 125}, \text{шт.}$$

где $U_{i \ 9 \times 125}$ - напряжение одного ФЭ размером 9x125, В.

$$N_{\text{ФЭ пос}} = 24 / 0,5 = 48 \text{ шт.}$$

Необходимый ток для получения мощности модуля 145 Вт

$$I_{\text{мод}} = P_{\text{мод}} / U_{m \ 9 \times 125}$$

$$I_{\text{мод}} = 145 / 24 = 6,04 \text{ А}$$

Количество ФЭ соединенных параллельно

$$N_{\text{ФЭ пар}} = I_{\text{мод}} / I_{m \ 9 \times 125}, \text{шт.}$$

где $I_{i \ 9 \times 125}$ - вырабатываемый ток одного ФЭ размером 9x125, А.

$$N_{\text{ФЭ пар}} = 6,04 / 1,03 = 5,9 \text{ шт.}$$

Принимаем $N_{\text{ФЭ пар}} = 6$ шт.

Количество ФЭ в модуле

$$N_{\text{ФЭ}} = N_{\text{ФЭ пос}} \cdot N_{\text{ФЭ пар}}, \text{шт.}$$

$$N_{\text{ФЭ}} = 48 \cdot 6 = 288 \text{ шт.}$$

Длина модуля

$$L_{\text{мод}} = (L_{\text{ФЭ}} + 0,003) \cdot N_{\text{ФЭ L}} + 0,03, \text{ м}$$

где $L_{\text{ФЭ}}$ - длина одного ФЭ, м;

$$N_{\text{ФЭ L}} - \text{число ФЭ по длине.}$$

$$L_{\text{мод}} = (0,125 + 0,002) \cdot 12 + 0,03 = 1,566 \text{ м}$$

Ширина модуля

$$B_{\text{мод}} = (B_{\text{ЛФ}} + 0,003) \cdot N_{\text{ЛФ В}} + 0,03, \text{ м}$$

где $B_{\text{ЛФ}}$ - ширина, м;

$N_{\text{ЭО В}}$ - число ФЭ по длине.

$$B_{\text{мод}} = (0,0465 + 0,003) \cdot 12 + 0,03 = 0,624 \text{ м}$$

Размер модуля составит 1,566x0,624 м

2). Расчет автономной фотоэлектрической системы электро-снабжения

2.1. Расчет потребления энергии.

Составляется список всех нагрузок переменного тока, ее мощность и часы работы в неделю.

Таблица 2.6

Список всех нагрузок переменного тока, ее мощность и часы работы в неделю

Нагрузка переменного тока, питаемая через инвертор	Мощность, Вт	Количество ед.	$t_{\text{нед}}$, час/нед	Q , Втч/нед
Телевизор	75	1	28	2100
Холодильник	250	1	32	8000
Насос	260	1	24	6240
Итого:	585			16340

Нагрузка постоянного тока, в неделю, для питания инвертора.

Коэффициент полезного действия инвертора принимается 80%. (умножается на 1.2)

$$Q_{\text{инв}} = 16340 \cdot 1,2 = 19608 \text{ Вт} \cdot \text{ч} / \text{нед.}$$

Входное напряжение инвертора (В) постоянного тока; обычно 12 или 24В, принимаем 24 В.

Полная нагрузка переменного тока в Ач в неделю

$$Iq_{\text{инв}} = 19608 / 24 \text{ А} \cdot \text{ч} / \text{нед.}$$

Таблица 2.7

Список всех нагрузок постоянного тока, ее мощность и часы работы в неделю

Потребитель	Мощность, Вт	Количество ед.	$t_{\text{нед}}$, час/нед	Q , Вт ч/нед
Люминесцентные лампы 20 Вт	20	5	34	3400
Итого:				16340

Напряжение постоянного тока. Обычно 12 или 24 В. (Как для инвертора)

Общее количество Ач в неделю потребляемого нагрузкой постоянного тока: $Iq_n = 3400 / 24 = 141,67 \text{ А} \cdot \text{ч} / \text{нед.}$

Общее количество Ач в неделю потребляемое всей нагрузкой

$$Iq_{\text{нед}} = 817 + 141,67 = 958,67 \text{ А} \cdot \text{ч} / \text{нед.}$$

Потребление Ач в сутки

$$Iq = 958,67 / 7 = 136,95 \text{ А} \cdot \text{ч} / \text{сутки}$$

2.2. *Расчет аккумуляторной батареи.* Количество электричества, которое нужно запастись в АКБ: $C_{+25} = 136,95 \cdot (1 + 1) = 273,9 \text{ А} \cdot \text{ч}$

Емкость АКБ, с учетом коэффициентом глубины разряда

$$C'_{+25} = 273,9 / 0,4 = 684,75 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

Емкость АБ необходимая при пониженной температуре

$$C = 684,75 \cdot 1,1 = 753,23 \text{ А} \cdot \text{ч}, \text{ при температуре } 15^{\circ}\text{C } K = 1,1.$$

Номинальная емкость выбранной батареи $C_{AB} = 200 \text{ Ач}$.

Число батарей соединенных параллельно, округлить до ближайшего большего целого: $N_{\text{пар } AB} = 753,23 / 200 = 4 \text{ шт.}$

Число батарей соединенных последовательно, округлить до ближайшего большего целого: $N_{\text{пос } AB} = 24 / 12 = 2 \text{ шт.}$

Общее количество аккумуляторных батарей: $N_{AB} = 4 \cdot 2 = 8 \text{ шт.}$

2.3 *Расчет количества фотоэлектрических модулей.* Количество электричества с учетом потерь на заряд-разряд аккумуляторной батареи (обычно 20% при использовании специальных батарей).

$$Iq_{з-р} = 136,95 \cdot (1 + 0,2) = 164,34 \text{ А} \cdot \text{ч}$$

Количество пиковых часов

$$t_{\text{пик}} = 4926 \cdot 1,1879 / 1000 = 5,85 \text{ ч}$$

Требуемый ток от СБ

$$I_{CB} = 164,34 / 5,85 = 28,1 \text{ А}$$

Количества модулей соединенных параллельно

$$N_{\text{пар } M} = 28,1 / 5,8 = 4,7 \text{ шт.}$$

принимаям $N_{\text{пар } M} = 5 \text{ шт.}$

Число модулей, соединенных последовательно

$$N_{\text{пос } M} = 24 / 24 = 1 \text{ шт.}$$

Общее количество модулей

$$N = 5 \cdot 1 = 5 \text{ шт.}$$

Тема 3. Термофотоэлектрические солнечные установки

Цель: Изучение основных типов фотоэлектрических систем

Перечень рассматриваемых вопросов:

3.1 Комбинированные фотоэлектрические тепловые установки

3.2 Увеличение эффективности работы термофотоэлектрической установки при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии

3.3 Конструкция термофотоэлектрической установки

3.1 Комбинированные термофотоэлектрические установки (ТФУ)

Комбинированные теплофотоэлектрические установки (ТФУ) представляют комбинацию абсорберов плоских гелиоколлекторов, на приемной стороне которых находятся кремниевые элементы различных размеров. Фотоэлектрическая мощность системы определяется мощностью солнечных элементов, а тепловая мощность – площадью и эффективностью абсорбера. Данные, полученные в результате исследований, позволили оценить увеличение не только КПД фотоэлектрического преобразования, но и всей системы в целом. Исследования, проводимые на комбинированном гелиоколлекторе с воздушным теплоносителем, показали, что в результате двухстороннего воздушного охлаждения фотоэлектрического модуля был улучшен тепловой и электрический КПД, что подтвердилось экспериментальными данными. Проведенные исследования показали, что воздушное охлаждение фотоэлектрического модуля дает заметное улучшение выходных электрических характеристик. Использование нагретого воздуха существенно увеличивает общий КПД комбинированного коллектора. Результаты исследований, показали, что при помощи комбинированного теплофотоэлектрического модуля в 2 раза была увеличена выработка электрической энергии солнечными элементами. Существенное увеличение КПД всей системы связано с использованием комбинированной установкой значительной части солнечного спектра излучения. Если тепловой коллектор использует, в основном, инфракрасную и ближнюю видимую часть, то кремниевые элементы используют фиолетовую и коротковолновую видимую часть спектра.

Принцип работы ТФУ поясняется рис. 3.1. Нагрев теплоносителя осуществляется за счет тепла солнечного излучения 1, которое поглощается теплопоглощающей поверхностью 2 и солнечными элементами 3. От теплопоглощающей поверхности тепло передается через стенки гелиопрофиля 4 воздушному теплоносителю в его полости 5 и жидкому теплоносителю в трубе 6.

Для снижения потерь теплоты в окружающую среду приемная сторона профиля имеет защитное остекление 7, а задняя стенка профиля имеет тепловую изоляцию 8. Фотоэлектрические элементы 3 соединены последовательно в солнечные батареи, которые имеют выходные электрические контакты 9.

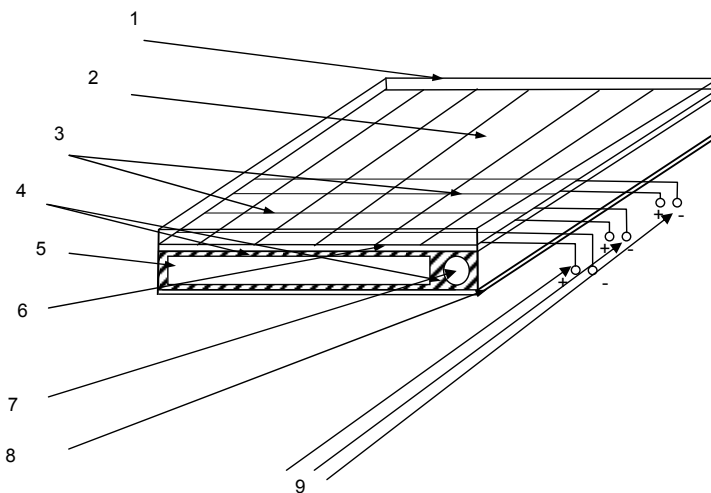


Рис. 3.1. Схема термофотоэлектрической установки: 1 – падающая солнечная радиация; 2 – теплопоглощающая поверхность; 3 – солнечные элементы; 4 – стенки поглощающей поверхности гелиопрофиля; 5 – воздушный канал; 6 – верхнее защитное остекление; 7 – канал для воды; 8 – задняя стенка каркаса с тепловой изоляцией; 9 – выходные электрические контакты солнечных элементов.

При разработке комбинированных солнечных установок плоской конструкции можно использовать несколько типов комбинации их приёмной поверхности – комбинированного абсорбера. Первый – солнечные элементы плотно покрывают весь абсорбер. В такой конфигурации приёмная поверхность фотоэлектрического модуля одновременно является и абсорбером теплового коллектора. При этом для абсорбера не требуется дорогого селективного покрытия, необходим лишь эффективный теплообмен между солнечными элементами и металлической пластиной, к которой с нижней стороны приварены трубки с теплоносителем. Во втором случае солнечные элементы могут быть наклеены на уже готовый абсорбер гелиоколлектора, в этом случае солнечные элементы покрывают какой-то процент площади абсорбера. Количество элементов определяется из необходимой электрической мощности солнечной установки. Для более эффективной работы солнечные элементы можно располагать в нижней части пластины абсорбера. При такой конфигурации, при выборе оптимального теплового режима циркуляции теплоносителя, все солнечные элементы будут работать при определенной температуре. Температура воды на входе в гелиоколлектор ниже, чем на выходе, поэтому металлическая пластина (рис.3.1) с пониженной температурой будет охлаждать элементы.

Кремниевые солнечные элементы, как было показано ранее, более эффективно работают при пониженных температурах.

В общем виде ТФУ представляет типичный гелиоколлектор на рабочей поверхности которого находятся фотоэлементы (рис. 3.2) и который можно использовать в системах солнечного теплоснабжения, описанных в разделе 2 настоящего пособия. Все расчеты, проводимые для систем УСГВ, будут и справедливы для систем с ТФУ, а для фотоэлектрической части установки можно применять расчеты, используемые в предыдущем разделе.

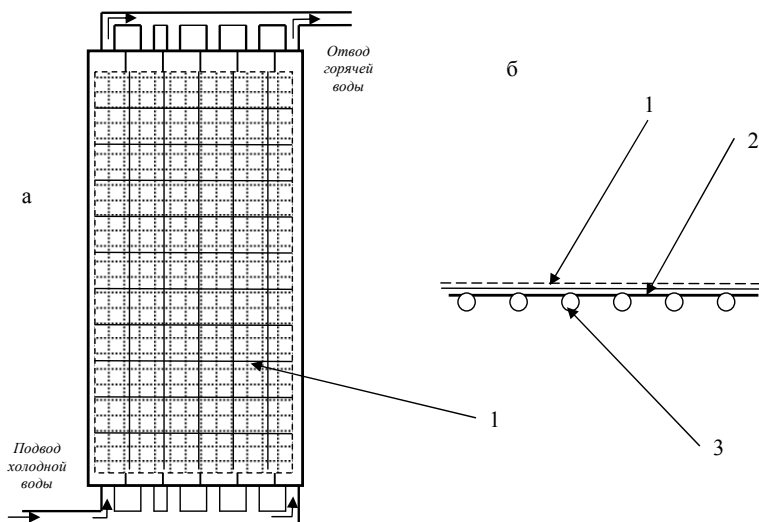


Рис. 3.2. Комбинированная солнечная установка с полным покрытием абсорбера солнечными элементами (а – термофотоэлектрический коллектор, б – абсорбер термофотоэлектрической установки): 1 – фотоэлементы; 2 – приемная металлическая пластина абсорбера; 3 – трубки для теплоносителя.

Несмотря на многообразие различных видов солнечных установок для комбинированной выработки тепловой и электрической энергии, всё-таки, большая часть современных разработок состоит из плоского солнечного коллектора (ПСК) на приёмной панели которого находятся солнечные элементы (рис. 3.3 - 3.5). Такая конструкция позволяет комбинировать тепловые и фотоэлектрические установки и использовать для производства теплофотоэлектрических устройств серийные солнечные коллекторы и фотоэлектрические элементы уже выпускаемые промышленностью.

Анализируя комбинированные термофотоэлектрические установки плоской конструкции, их можно свести к трём типам. Это установки с

воздушным, жидкостным и воздушно-жидкостным теплоносителем. Плоский воздушный комбинированный теплоэлектрический гелиоколлектор имеет вид, изображенный на рис. 3.3. Как видно из рисунка в этой установке теплопоглощающая пластина с фотоэлектрическими элементами размещена посередине металлического корпуса с тепловой изоляцией, сверху находится стекло, а сверху и снизу пластины находятся каналы для воздуха, который является в этой конструкции тепловым носителем.

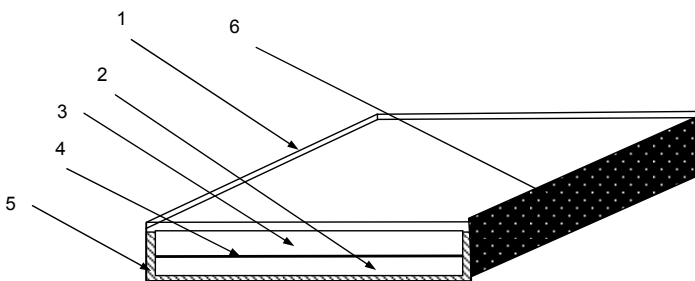


Рис. 3.3. Устройство термофотоэлектрической установки с воздушным теплоносителем: 1 — верхнее остекление; 2 — верхний канал для теплоносителя; 3 — нижний канал для теплоносителя; 4 — панель с солнечными элементами; 5 — теплоизоляция; 6 — корпус.

Циркулирующий теплоноситель охлаждает фотоэлементы, за счет чего растёт эффективность их работы и увеличивается суммарная выработка электроэнергии, а нагретый теплоноситель используется потребителем (рис. 3.3).

Устройство комбинированного гелиоколлектора с жидким теплоносителем показано на рис. 3.4. Здесь теплопоглощающая пластина с фотоэлементами является типичным абсорбером плоского солнечного коллектора. Снизу пластины находятся трубки, по которым циркулирует жидкий теплоноситель. Теплоносителем может являться вода или антифриз. Аналогично установке изображенной на рис. 3.3, жидкий теплоноситель, циркулируя по трубкам, охлаждает фотоэлементы и используется потребителем.

Третий тип плоского комбинированного коллектора отличается от первых двух тем, что имеет кроме трубок с жидким теплоносителем ещё и каналы для воздуха (рис. 3.5). В результате потребитель, кроме электроэнергии, может ещё использовать для систем теплоснабжения горячую воду и нагретый воздух.

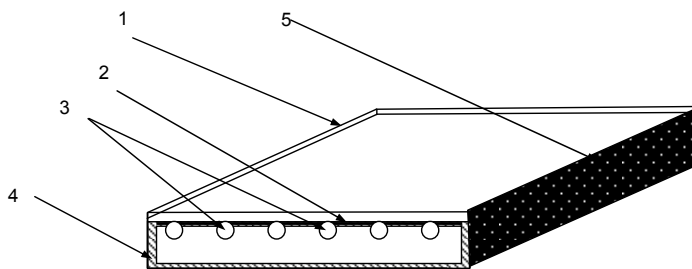


Рис. 1.13. Устройство термофотовольтрической установки с жидкостным теплоносителем: 1 – верхнее остекление; 2 – панель с солнечными элементами; 3 – трубки для жидкого теплоносителя; 4 – теплоизоляция; 5 – корпус.

Использование того или иного типа установок выбирается из задач, которые должна выполнять система солнечного обеспечения. Например, если потребитель рассчитывает получать электрическую энергию и обеспечивать только нагрев и вентиляцию помещений, то приемлем первый тип, если необходимо получать только электроэнергию и горячую воду, то второй. При проектировании полной системы водообеспечения, отопления и вентиляции зданий можно использовать третий тип (рис. 3.3).

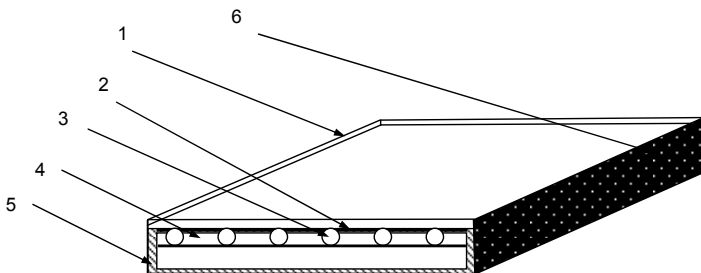


Рис. 3.5. Устройство термофотовольтрической установки с воздушно-жидкостным теплоносителем: 1 – верхнее остекление; 2 – панель с солнечными элементами; 3 – трубки для жидкого теплоносителя; 4 – каналы для воздуха; 5 – теплоизоляция; 6 – корпус.

В настоящее время в некоторых странах промышленными предприятиями выпускаются термофотовольтрические коллекторы (PVT), эта аббревиатура означает комбинированные фотовольтрические (PV) и тепловые (T) установки. В Турции есть завод, выпускающий установки

второго типа (рис.3.4), в Китае также выпускаются различные виды термофотоэлектрических установок.

3.2 Увеличение эффективности работы термофотоэлектрической установки при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии

В работах американских и российских ученых была описана спектральная зависимость солнечного излучения у поверхности атмосферы и у поверхности Земли. Согласно выводам, сделанным из этих и других источников, спектр солнечного излучения сильно зависит от состояния атмосферы. Фотоэлектрические элементы преобразуют диапазон длин волн солнечного спектра отличный от диапазона преобразовываемого теплопоглощающей поверхностью абсорбера, за счет этого возможно дополнительное преобразование падающей солнечной радиации термофотоэлектрической установкой.

Как описывалось в предыдущем разделе, экспериментальные исследования показали, что комбинированная выработка тепловой и электрической энергии повышает эффективность работы солнечной установки, увеличивает суммарный КПД и выработку электрической энергии. Рассмотрим теоретические расчеты, подтверждающие эти эксперименты.

Зависимости изменения КПД фотоэлемента от температуры носят линейный характер. Используем формулу (3.1) для описания изменения КПД ФЭП в зависимости от температуры.

$$\eta = \eta_1(1 - \kappa(T - T_1)), \quad (3.1)$$

κ – температурный градиент, зависящий от типа и конструкции фотопреобразователя; η_1 – КПД ФЭП при стандартных условиях (освещенность 1000 Вт/м^2 , $T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$), обычно КПД монокремниевых элементов составляет 14-15 %.

Для определения предельного термодинамического КПД солнечного элемента при температуре источника T_c , равной 5800 К и температуре приемника T около 300 К, воспользуемся уравнением (3.2):

$$\eta_{\text{прео.}} = \left(1 - \frac{4}{3} \cdot \frac{T}{T_c}\right). \quad (3.2)$$

Фактически эта формула соответствует наземному применению солнечных установок.

Фотоэлектрические блоки (рис. 3.6) термофотоэлектрической комбинированной солнечной установки (далее КСК) рассчитываются по известным формулам. Максимальная мощность P_{max} , вырабатываемая солнечной батареей выражается как:

$$P_{max} = F_{ff} I_{K3} U_{XX} = I_{max} U_{max}, \quad (3.3)$$

где F_{ff} – фактор заполнения ВАХ; I_{K3} – ток короткого замыкания; U_{XX} – напряжение холостого хода; I_{max} – ток в рабочей точке; U_{max} – напряжение в рабочей точке.

КПД фотоэлектрической солнечной батареи равен:

$$\eta_{CB} = \frac{I_{max} U_{max}}{S_{эл.} E_o} = \frac{P_{max}}{S_{эл.} E_o}, \quad (3.4)$$

где $S_{эл.}$ – полезная площадь солнечных элементов (m^2); E_o – освещенность рабочей поверхности ($Вт/м^2$).

Соответственно, расчет теплового абсорбера производится также известным методом, описанным в разделе 2. Полезная энергия Q_u , отводимая из коллектора в единицу времени ($Вт$), равна:

$$Q_u = GC_p (T_{вых} - T_i) (Bm), \quad (3.5)$$

где $S_{СК}$ – площадь коллектора, m^2 ; G – расход теплоносителя ($кг/с$); C_p – теплоемкость воды; $T_{вых.}$ – температура на выходе из коллектора.

Соответственно, КПД солнечного коллектора определяется формулой:

$$\eta_{СК} = \frac{Q_u}{S_{СК} E_o}. \quad (3.6)$$

Для комбинированной установки освещенность E_o одинакова для тепловой и электрической части, а величины площадей $S_{СК}$ и $S_{эл.}$, эквивалентны, т.е. можно записать:

$$\eta_{СК} = \frac{P_{СК}}{S_{СК} E_o}, \eta_{CB} = \frac{P_{CB}}{S_{СК} E_o}, \quad (3.7)$$

где $\eta_{СК}$ – тепловой; η_{CB} – электрический КПД комбинированной установки; $P_{СК}$ и P_{CB} – мощность, отводимая от теплового коллектора и солнечной батареи; $S_{СК}$ – полезная площадь комбинированной солнечной установки, заполненная солнечными элементами.

Общая мощность комбинированной установки равна сумме мощностей тепловой и фотоэлектрической частей установки:

$$P_{KCK} = P_{СК} + P_{CB} = S_{СК} E_o (\eta_{СК} + \eta_{CB}) = S_{СК} E_o \eta_{KCK}, \quad (3.8)$$

где $\eta_{\text{КСК}}$ – общий суммарный КПД комбинированной установки (комбинированного солнечного коллектора).

Из (3.8) видно, что при увеличении отбираемой мощности от солнечной установки за счет фотоэлектрической составляющей возрастает её суммарный КПД, т.к. площадь и освещенность рабочей поверхности остаются постоянными. При неполном покрытии приемной поверхности комбинированной установки солнечными элементами формулу (3.8) необходимо заменить следующей формулой:

$$P_{\text{КСК}} = S_{\text{КСК}} E_o (\eta_{\text{СК}} + f_{\text{КСУ}} \eta_{\text{СБ}}), \quad (3.9)$$

где $f_{\text{КСУ}}$ – коэффициент заполнения солнечными элементами приемной поверхности комбинированной установки.

В нашем случае $f_{\text{КСУ}}$ изменяется в пределах от 1/2 до 1/3.

$$P_{\text{КСК}} = S_{\text{КСК}} E_o \left(\eta_{\text{СК}} + \frac{1}{2 \dots 3} \eta_{\text{СБ}} \right). \quad (3.10)$$

По этим формулам можно определить все параметры и характеристики КСУ с учетом тепловой и электрической части.

Известно, что КПД полупроводниковых кремниевых элементов падает с увеличением их температуры. Зависимости изменения КПД фотоэлемента от температуры носят линейный характер:

Если солнечные элементы находятся в нижней части приемной поверхности, то температура теплоносителя на входе в гелиоколлектор T_i , будет соответствовать температуре нагрева солнечных элементов T . Измеряя температуры на входе и выходе в гелиоколлектор, расход теплоносителя и значения тока и напряжения в рабочей точке, можно производить расчеты всей комбинированной установки.

$$\eta = \eta_o \cdot (1 - \kappa(T - T_o)), \quad (3.11)$$

где T – температура солнечного элемента;

κ – температурный градиент, зависящий от типа и конструкции фотопреобразователя (0,3-0,5 %/°C);

η_o – КПД ФЭП при стандартных условиях (освещенность 1000 Вт/м², $T_o = 25$ °C). Для кремниевых элементов исследуемой комбинированной солнечной установки он составляет 14-15 %.

$$P_{\text{КСК}} = S_{\text{КСК}} E_o \left(\frac{GC_p (T_{\text{вых}} - T_i)}{E_o} + f_{\text{КСУ}} \eta_o (1 - \kappa(T_i - T_o)) \right). \quad (3.12)$$

Температурное распределение по поверхности фотоэлектрического модуля для конкретной установки – величина постоянная. Измеряя освещенность, расход теплоносителя, температуры на входе и выходе в коллектор, можно рассчитывать все характеристики этой системы.

3.3 Конструкция термофотоэлектрической установки

Формула (3.12) показывает, что при уменьшении температуры теплоносителя на входе в коллектор КПД фотоэлементов уменьшается, и соответственно, увеличивается их выработка. Отсюда можно сделать вывод, что при неполном заполнении рабочей поверхности ТФУ солнечными элементами, логично их располагать в нижней части установки (рис. 3.6).

Солнечные элементы наклеены непосредственно на теплопоглощающую поверхность установки специальной теплопроводящей пастой, имеющей высокое омическое сопротивление (рис. 3.7). Электрические контакты отдельных фотоэлементов спаиваются последовательно, образуя электрические солнечные батареи термофотоэлектрической установки, которые вырабатывают постоянный электрический ток.

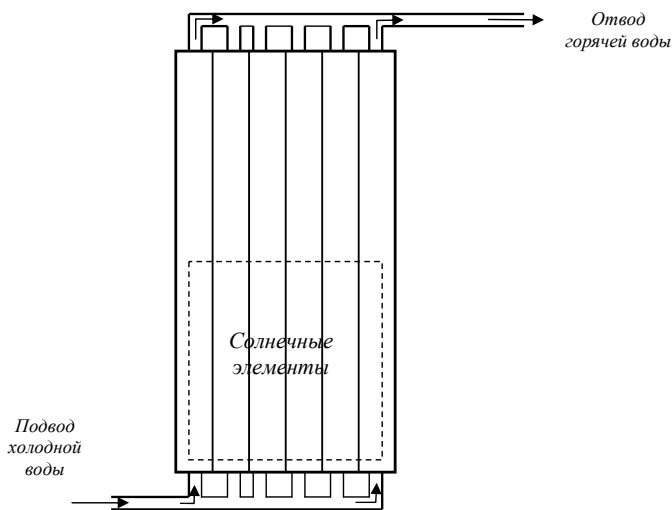


Рис. 3.6. Термофотоэлектрическая установка с нижним расположением фотоэлементов

Фотоэлектрические модули собираются из необходимого числа солнечных элементов (рис. 3.6), при этом отдельный солнечный элемент рассчитан на напряжение 0,4-0,6 вольт и ток в зависимости от его площади. Соответственно напряжение модуля собранного из последовательно

соединенных фотоэлектрических элементов будет суммироваться, а ток соответствовать значению тока отдельных элементов. Эти показатели имеют номинальное значение при солнечной освещенности 1000 Вт/м^2 .

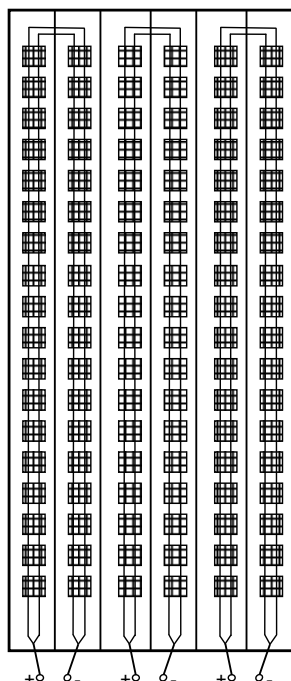


Рис. 3.7. Фотоэлектрический блок комбинированной солнечной установки (с тремя парами выходных контактов)

Таким образом при нормальных условиях: освещённость: 1000 Вт/м^2 , атмосферная масса (АМ) 1,5, температура 25°C , выходная мощность одного фотоэлектрического модуля будет составлять максимальные значения. Фотоэлектрический КПД солнечных элементов будет зависеть от температуры их рабочей поверхности. Солнечные батареи могут вырабатывать более высокий ток при увеличении освещенности и при уменьшении температуры. Поэтому при использовании концентраторов и при уменьшении атмосферной температуры мощностные характеристики ТФУ увеличиваются. Так как поглощающая поверхность профиля и теплопроводящая паста имеют высокое омическое сопротивление, это препятствует электрическим потерям на тыльных контактах фотоэлементов.

Тема 4. Возможности использования концентраторов для повышения выработки фотоэлектрическими установками

Цель: Изучение основных типов фотоэлектрических систем

Перечень рассматриваемых вопросов:

4.1 Солнечные концентраторы для фотоэлектрических установок

4.2. Теоретический расчет низкопотенциального солнечного концентратора графоаналитическим методом

4.3. Расчет низкопотенциального концентратора для солнечных установок

4.4. Плоский концентратор для фотоэлектрической установки на основе боковых отражающих поверхностей

4.5. Повышение мощностных характеристик солнечных установок при использовании низкопотенциального концентратора

4.6 Повышение эффективности работы солнечных установок при использовании различных видов прозрачных защитных покрытий

4.1 Солнечные концентраторы для фотоэлектрических установок

При использовании солнечных батарей требуется получать максимальную мощность с единичной площади фотоактивной поверхности. Эта цель может быть достигнута увеличением плотности светового потока на фотоэлектрические преобразователи. Одним из средств, применяемых для решения данной задачи, является плоский концентратор, устанавливаемый на панель солнечной батареи. Этот концентратор равномерно распределяет лучи по приемной поверхности и имеет малый коэффициент концентрации. Предлагаемый плоский концентратор применяется в различных областях солнечной энергетики, и может быть использован для повышения мощностных характеристик серийных фотоэлектрических модулей. Применение концентраторов позволяет не только поднять энергетическую эффективность солнечных установок, но также улучшить их энергоэкономические и эксплуатационные показатели за счет уменьшения расхода дефицитных полупроводниковых материалов, снижения стоимости и массы, повышения устойчивости к действию внешних факторов. При этом, однако, возникает необходимость оптимального согласования параметров концентраторов и фотопреобразователей, в связи с чем, повышаются требования к точности расчетных оценок характеристик концентрирующих систем.

В настоящее время известно значительное число математических моделей и методов для расчета энергетических характеристик систем концентрированного солнечного излучения (КСИ), которые могут использоваться на различных этапах разработки.

Концентрирование солнечного излучения представляет собой частный случай лучистого переноса в системе тел, разделенных диатермичной средой. Специфика данного процесса определяется свойствами первичного

Глобальные искажения формы могут быть отражены в уравнении отражающей поверхности, которое при наличии деформаций примет вид:

$$F_k(x, y, z) + f_o(x, y, z) = 0, \quad (4.3)$$

где $f_o(x, y, z)$ – функция, описывающая деформации.

Потери энергии при отражении учитываются коэффициентом отражения R_C , который зависит от спектральной отражательной способности зеркального покрытия в диапазоне длин волн солнечного излучения и угла падения на отражающую поверхность.

Выражение для коэффициента отражения в общем виде имеет вид:

$$R_C = \frac{\Phi_{omp}}{\Phi_{nao}} = \frac{\int_{\lambda=0}^{\infty} \int_{S_k} R(\lambda, x, y, z) E_C(\lambda) d\lambda dS_k}{S_k \int_{\lambda=0}^{\infty} E_C(\lambda) d\lambda}, \quad (4.4)$$

где $R(\lambda, x, y, z)$ – локальное значение спектрального коэффициента отражения; $E_C(\lambda)$ – спектральная плотность падающего потока излучения; S_k – элементарная площадка концентратора; Φ_{nao} – падающий поток; Φ_{omp} – отраженный поток.

Значения R_C определяют экспериментальным путем.

Как видно из (4.4), интегральный коэффициент отражения является функцией координат точки отражающей поверхности, что связано с его зависимостью от угла падения солнечного излучения на эту поверхность.

Приемник, в отличие от концентратора, рассматривается в данном случае не как физический объект, а как абстрактная геометрическая поверхность S_a , определенным образом ориентированная в поле отраженного излучения, которая может быть задана в системе координат, связанной с концентратором уравнением вида:

$$\begin{aligned} F_{\Pi}(x, y, z) &= 0 \\ (x, y, z) &\in C \end{aligned} \quad (4.5)$$

где C – заданная пространственная область определения координат точек лучевоспринимающей поверхности приемника.

Основное функциональное назначение концентрирующей системы в общем случае – повышение плотности потока солнечного излучения до уровня, обеспечивающего его эффективное и экономичное преобразование в энергию требуемого вида.

Интегральным показателем, характеризующим эту функцию системы, является средний коэффициент концентрации K_C , который определяется как отношение среднего значения плотности сконцентрированного лучистого потока на приемнике E_{cp} к поверхностной плотности солнечного излучения в плоскости, перпендикулярной направлению его распространения, E_C :

$$K_c = \frac{E_{cp}}{E_c}. \quad (4.6)$$

Характерные для солнечных установок (СУ) оптимальные значения K_c лежат в диапазоне от единиц до сотен крат. При концентрировании солнечного излучения не только повышается его плотность, но и изменяется распределение в пространстве, а следовательно, и на лучевоспринимающих поверхностях элементов преобразователя. Поверхностная облученность E_c в общем случае характеризуется функцией вида $E_c = E_c(x_n, y_n, z_n)$, где x_n, y_n, z_n – координаты точки приемника, либо соответствующим распределением значений локального коэффициента концентрации солнечного излучения $K_c = E_c/E_{cp} = K_c(x_n, y_n, z_n)$. Это распределение является основной энергетической характеристикой концентрирующей системы.

Требования к распределению плотности сконцентрированного излучения существенно зависят от типа преобразователя, особенностей организации рабочих процессов в его элементах и их конструкции. В фотоэлектрических батареях, содержащих множество последовательно и параллельно соединенных солнечных элементов, которые должны работать в одинаковых условиях, с целью уменьшения схемных потерь необходимо обеспечивать равномерное облучение всех элементов, т.е. должно выполняться условие $K_c(x_n, y_n, z_n) \approx \text{const}$.

В научных работах приводятся выражения для определения локального коэффициента концентрации при заданных условиях однозначности. Анализ полученных для K_c выражений позволяет с определенностью утверждать, что решения задач концентрирования излучения в принципе не требуют использования таких фотометрических величин, как яркость или сила света, и сводятся фактически к вычислению безразмерных величин R_c и K_c .

При разработке плоского концентратора для фотоэлектрического модуля рассматривается частный случай однолучевого приближения. В этом случае выражение для определения локального коэффициента концентрации запишется в виде:

$$K_c = \iint_{S_k} \frac{R_c \cos \theta_k dS_k}{dS_{\Pi}}, \quad (4.7)$$

где θ_k – угол падения лучей; dS_k – элемент площади отражателя; dS_{Π} – элемент площади приемника.

Для решения задачи необходимо выразить элементы поверхностей dS_k и dS_{Π} через одни и те же параметры системы и произвести интегрирование с учетом заданных условий однозначности. Результаты решения позволяют выяснить предельные по концентрированию возможности систем выбранной конфигурации и в «чистом» виде оценить влияние их геометрических параметров на распределение облученности.

В различных работах в однолучевом приближении исследовано влияние статистически заданных меридиональных угловых ошибок отражающей поверхности параболоида на распределение энергии в плоскостях,

перпендикулярных его оптической оси. Однолучевое приближение широко используется также при расчетах слабоконцентрирующих систем с идеальными отражающими поверхностями.

В случае плоского концентратора задача концентрирования солнечного излучения ставится и решается в предположении, что угловой размер отраженного пучка равен угловому размеру падающего, а распределение силы излучения в пучке по направлениям является равномерным т.е.:

$$\varphi_o = \varphi_c, f_o(\varphi) = 1, \quad (4.8)$$

где f_o – функция, описывающая индикатрису силы излучения.

Такая модель наиболее близка к реальной физической картине отражения солнечного излучения зеркальными плоскими концентраторами. В натурных условиях при больших размерах концентраторов шероховатости поверхностей можно не учитывать, а при высоком оптическом классе чистоты отражающих поверхностей и наклонном падении на них солнечных лучей отражение падающего пучка должно быть практически полностью зеркальным, т. е. должно выполняться условие $\varphi_o = \varphi_c$.

Решение задач анализа в общем случае сводится к вычислению интеграла в уравнении (4.7) при заданных условиях однозначности. Именно эти условия, соответствующие различным схемам и параметрам концентрирующих систем и принятым при их описании допущениям, определяют вид подынтегральной функции и влияют на выбор метода решения. Для решения задач анализа используется три группы методов: графоаналитические, аналитические и численные. Для данной работы наиболее подходящим является графоаналитический метод. При использовании этого метода можно рассчитать все необходимые параметры плоского концентратора, а также два основных параметра R_c и K_c .

4.2. Теоретический расчет низкопотенциального солнечного концентратора графоаналитическим методом

Рассмотрим ход параллельного пучка лучей при многократном отражении в двугранном плоском концентраторе (рис.4.1). Геометрический анализ позволяет определить размер линейного отображения пучка на приемнике в виде:

$$dl_{\Pi} = \frac{dl_k \cos \theta_k}{\cos 4\theta_k}, \quad (4.9)$$

где θ_k – заданный угол наклона граней фокулина.

В общем случае концентрирование солнечного излучения в односекционных плоских системах может осуществляться в результате его

многократного отражения от зеркальных поверхностей, что позволяет достичь более высоких значений K_c , чем при однократном отражении. Ход луча между противоположащими отражающими поверхностями в такой системе показан на рис. 4.2.

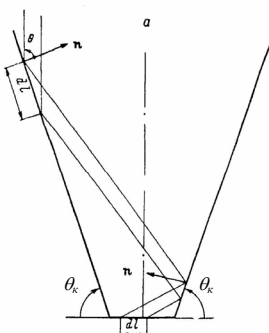


Рис. 4.1. Графоаналитический метод определения энергетических характеристик слабоконцентрирующих систем

При условиях симметрии системы, перпендикулярном расположении приемника по отношению к плоскости или оси симметрии, точной ориентации системы на Солнце и равномерной облученности приемника в работе графоаналитическим методом получено следующее выражение для угла наклона отражающих поверхностей, начиная с которого солнечное излучение после n_k отражений попадает на приемник (формула 4.10).

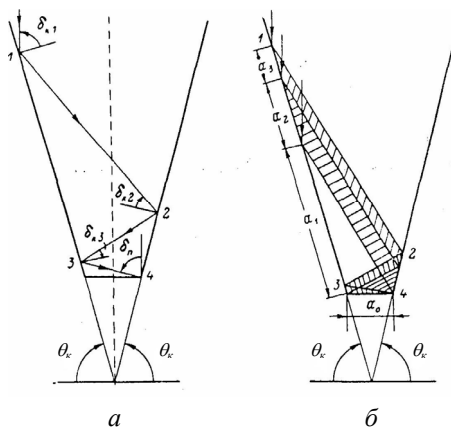


Рис. 4.2. Схема распространения излучения в односекционных плоских концентраторах (*а* – ход луча при многократном отражении; *б* – к определению размера отражающей поверхности): δ_k , δ_n – углы падения лучей на концентратор и приемник соответственно.

$$\theta_{\kappa_{\min}} = \frac{\pi n_{\kappa} - \pi/2}{2n_{\kappa}}. \quad (4.10)$$

При $\theta_{\kappa} \leq \theta_{\kappa_{\min}}$ излучение после n_{κ} отражений выходит из концентрирующей системы обратно, а при $\theta_{\kappa} > \theta_{\kappa_{\min}}$ освещает приемник. Следует заметить, что при любом значении числа отражений, например при $n_{\kappa} = 2$, $\theta_{\kappa_{\min}}^{\text{II}}$ характеризует не только минимальный угол начиная с которого на приемник может попадать двукратно отраженное излучение, но и тот максимальный угол, до которого приемник можно облучать лишь однократно отраженным солнечным светом т. е. фактически $\theta_{\kappa_{\min}}^{\text{II}} = \theta_{\kappa_{\max}}^{\text{I}}$. Это не означает, однако, что при $\theta_{\kappa} > \theta_{\kappa_{\max}}^{\text{I}}$ нельзя концентрировать излучение на приемнике только за счет однократного отражения, просто в этом случае обычно выгодно «подключить» второе отражение, затем третье (при $\theta_{\kappa_{\min}}^{\text{III}}$) и т.д. Соответствующие значения углов $\theta_{\kappa_{\min}(\max)}$ для различного числа отражений получены в работе и представлены в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Характеристики односекционных плоских концентраторов

n_{κ}	θ_{κ} , град		a/a_o , при $\theta_{\kappa_{\max}}$	N=2		N=4	
	min	max		K_r	K_c	K_r	K_c
1	45.0	67.5	1.85	2.42	2.28	3.84	3.50
2	67.5	75.0	5.3	3.74	3.38	6.48	5.76
3	75.0	78.8	10.3	5.02	4.36	9.04	7.72
4	78.8	81.0	17.0	6.32	5.30	11.64	9.60

Прим. K_c определено при коэффициенте отражения $R_c = 0,9$.

При условии равномерного облучения приемника каждой из n_{κ} составляющих отраженного потока ширина участка отражающей поверхности, соответствующая n -й составляющей (рис.4.2, б), определяется соотношением:

$$a_n = a_o (-1)^n \cos 2n\theta_{\kappa} / \cos \theta_{\kappa}, \quad (4.11)$$

из которого следует, что ширина всей отражающей грани концентратора:

$$a = a_o \left[\sum_{n=1}^{n_{\kappa}} (-1)^n \cos 2n\theta_{\kappa} \right] / \cos \theta_{\kappa}, \quad (4.12)$$

где a_o – характерный размер приемника, равный ширине входного отверстия фоклина (см. рис. 4.2, б); n – количество отражений от стенки концентратора; θ_{κ} – угол наклона отражающих граней (рис. 4.1, 4.2).

Высота или глубина концентратора H соответственно определяется как:

$$H = a \sin \theta_k = a_o \left[\sum_{n=1}^{n_k} (-1)^n \cos 2n\theta_k \right] \cos \theta_k. \quad (4.13)$$

Выражение для среднего (а в данном случае и локального) коэффициента концентрации имеет вид:

$$K_C = 1 + N \sum_{n=1}^{n_k} (-1)^n R_C^n \cos 2n\theta_k, \quad (4.14)$$

где N – число граней концентратора; R_C^n – коэффициент отражения от n -й грани.

Из выражений (4.12) и (4.14) следует, что при $R_C=1$ геометрический коэффициент концентрации равен:

$$K_r = 1 + N \frac{a}{a_o} \cos \theta_k. \quad (4.15)$$

Геометрический коэффициент концентрации плоского фоклина изменяется при возрастании угла θ_k , и числа отражений. Увеличение числа отражений приводит к заметному росту коэффициента концентрации. Однако это может приводить к неравномерности распределения освещенности по приемной поверхности, а главное к увеличению отношения, a/a_o и, как следствие, увеличению ширины концентратора, что неэффективно при натурной работе установок. Кроме того, увеличение числа отражений в реальных системах ($R_C < 1$) ведет к росту потерь энергии, связанных с поглощением солнечного излучения зеркалами. Как видно из таблицы 4.1 при угле $67,5^\circ$ отношение ширины концентратора к приемнику достигает величины 1,85. В реальных условиях для уменьшения ветровых нагрузок более эффективно уменьшение ширины концентратора. Увеличение числа отражающих граней позволяет уменьшить высоту (глубину) концентратора необходимую для обеспечения требуемого повышения плотности солнечного излучения. Однако в реальных условиях такой концентратор неэффективен из-за увеличения сложности конструкции и значительного увеличения ширины второй и последующих граней к ширине приемника.

4.3. Расчет низкопотенциального концентратора для солнечных установок

В данном пособии все расчеты, полученные с использованием уравнений (4.11) - (4.15) для плоского фоклина, сводятся к определению углов установки боковых отражающих граней концентратора при заданной ширине приемника и отражателя.

Для расчета угла установки модели низкопотенциального концентратора воспользуемся формулой (4.12): $a = a_o \left[\sum_{n=1}^{n_k} (-1)^n \cos 2n\theta_k \right] / \cos \theta_k$, где a_o – ширина приемника излучения, а a_n – ширина концентратора (п. 1.1.3).

При однократном отражении эта формула приобретает вид:

$$a = a_o \left(-\frac{\cos 2\theta_k}{\cos \theta_k} \right). \quad (4.16)$$

В общем случае, используя приемную панель и отражающую грань не совпадающих фиксированных размеров, для нахождения оптимального угла необходимо решить уравнение (4.16), где угол установки зависит от отношения ширины отражателя и приёмника.

Т.к. $\cos 2\theta = 2\cos^2 \theta - 1$, то

$$2\cos^2 \theta - 1 = -\frac{l_{\text{отраж}}}{l_{\text{приём}}}(\cos \theta) \text{ или } 2\cos \theta - \frac{1}{\cos \theta} = -\frac{l_{\text{отраж}}}{l_{\text{приём}}}. \quad (4.17)$$

Если выбрать ширину боковой грани отражателя и приёмника одинаковыми уравнение (4.17), приходит к виду:

$$2\cos^2 \theta + \cos \theta - 1 = 0 \text{ или } 2\cos \theta - \frac{1}{\cos \theta} = -1. \quad (4.18)$$

При решении этого уравнения получаем значения: -1 и 1/2. Т.е. при равенстве ширины поверхностей концентратора и приёмника, углы установки соответствуют трем значениям: 60°, 180°, 300°. При значении угла 180° все лучи будут попадать на заднюю стенку концентратора, а при значении угла 300° все лучи будут попадать на заднюю стенку приемной поверхности модуля. Только при значениях угла $\theta = 60^\circ$, все лучи будут попадать на приемную поверхность, следовательно, искомый угол соответствует значению 60°.

Формула (4.14) используется для определения коэффициента концентрации: $K_c = 1 + N \sum_{n=1}^{n_k} (-1)^n R_c^n \cos 2n\theta_k$, где R_c^n – коэффициент отражения, а N – число граней концентратора.

При $R_c^n = 1$, геометрический коэффициент концентрации будет:

$K_\Gamma = 1 + N \sum_{n=1}^{n_k} (-1)^n \cos 2n\theta_k$, при однократном отражении:

$$K_\Gamma = 1 + N \frac{a}{a_o} \cos \theta_k. \quad (4.19)$$

Для двухгранного концентратора (если R_c^n не определено) коэффициент концентрации будет:

$$K_c = 1 + 2 \frac{a}{a_o} R_c^n \cos \theta_\kappa. \quad (4.20)$$

При равной ширине приемной панели и боковой грани отражателя коэффициент концентрации в нашем случае (при однократном отражении):

$$K_c = 1 + 2 R_c \cos \theta_\kappa, \quad (4.21)$$

где R_c – коэффициент отражения используемой поверхности.

Зная, что оптимальный угол установки, который соответствует 60° , можно окончательно записать выражение для коэффициента концентрации:

$$K_c = 1 + 2 R_c \frac{1}{2} = 1 + R_c. \quad (4.22)$$

Локальный коэффициент концентрации K_c , как указано в работах определяется экспериментальным путем.

Учитывая, что $K_c = 1 + R_c$, по полученным экспериментальным данным коэффициента концентрации можно определить коэффициент отражения для материалов, используемым для покрытий отражающих граней:

$$R_c = K_c - 1. \quad (4.23)$$

4.4. Плоский концентратор для фотоэлектрической установки на основе боковых отражающих поверхностей

Основным элементом плоского концентратора, представляющего собой линейную конструкцию (фоклин), являются плоские зеркала с селективным или не селективным покрытием, расположенные под определенным углом к нормали (рис.4.3). Предел концентрации светового потока для этого концентратора составляет 2,42 (табл. 4.2). Увеличение освещенности в 2-3 раза не требует дополнительного отвода тепла от рабочей поверхности модуля.

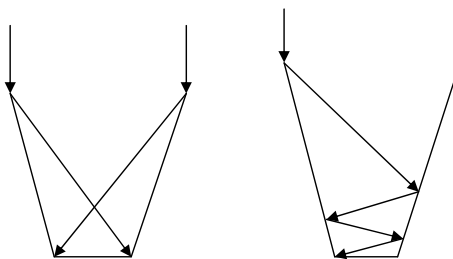


Рис. 4.3. Схема распространения лучей в плоском концентраторе с однократным и многократным отражением

Освещенность панели фотоэлектрического модуля, и, как следствие, значение его выходной мощности, прямо пропорциональны косинусу угла падения солнечных лучей на приемную поверхность. Следовательно, освещенность отражающих поверхностей и, соответственно, поток отраженных лучей на рабочую поверхность модуля напрямую зависят от интенсивности солнечного излучения и косинуса угла падения лучей на боковые панели концентратора.

Запишем формулу для освещенности боковой отражающей панели концентратора:

$$E_{\text{бок.панели}} = I_0 \cos \beta, \quad (4.24,а)$$

где I_0 – интенсивность солнечного излучения; β – угол падения лучей на боковую поверхность концентратора.

Формула для освещенности приемной рабочей панели фотоэлектрического модуля, полученной за счет солнечных лучей отраженных от боковой поверхности концентратора, запишется следующим образом:

$$E_{\text{раб.панели}} = \rho E_{\text{бок.панели}} \cos \beta_1, \quad (4.24,б)$$

где ρ – коэффициент отражения от боковой зеркальной панели; $E_{\text{бок.панели}}$ – освещенность боковой отражающей панели концентратора; β_1 – угол падения лучей, отраженных от боковой поверхности концентратора, на приемную поверхность фотоэлектрического модуля.

Рассмотрим ход лучей в плоском концентраторе для фотоэлектрического модуля (рис.4.4).

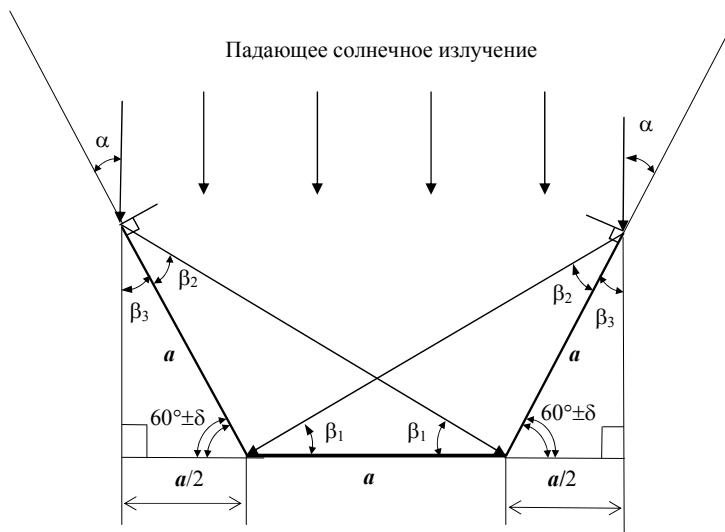


Рис. 4.4. Ход лучей в плоском концентраторе

При перпендикулярном падении лучей на рабочую поверхность модуля и оптимальном значении угла α , равном 60° , плоскости боковых отражающих и приемной поверхностей образуют прямоугольные треугольники со сторонами равными a и $a/2$. Углы падения β равны углам отражения β_2 , а углы β и β_3 , равны как вертикальные. При этом углы β_2 и β_3 равны, как углы, находящиеся в основании равнобедренного треугольника. Причем, так как оптимальный угол α составляет 60° , то угол β_3 , прямоугольного треугольника равен 30° . Отсюда справедливо равенство, что при $\alpha = 60^\circ$: $\beta = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = 30^\circ$, соответственно косинус α равен $1/2$, а косинусы всех углов β равны $\sqrt{3}/2$. Чтобы определить, какие возможные отклонения угла α , от оптимального значения 60° могут быть допущены при эксплуатации фотоэлектрического модуля с концентратором, надо допускать, что коэффициент отражения η (формула (4.24, б)), может иметь наиболее высокие значения, близкие к 1. Т.к. мощность, вырабатываемая фотоэлектрическим модулем, приблизительно прямо пропорциональна освещенности его приёмной поверхности, то формулам (4.24, а, б), зная отклонения угла падения β , можно определить изменения освещенности рабочей панели модуля и, соответственно, его мощностных характеристик. Т.к. угол α и угол β_3 находятся в одном прямоугольном треугольнике, то при изменении угла α на величину δ , на такую же величину меняется и угол β_3 . Учитывая, что $\beta_3 = \beta = \beta_1 = \beta_2$ можно предполагать, что значения освещенностей и, соответственно, значения мощностных характеристик модуля, будут меняться в пределах изменения косинусов углов α и β , т.е. в пределах изменения: косинусов углов $(60^\circ \pm \delta)$ и $(30^\circ \pm \delta)$. По формулам (4.24, а, б) видно, что за изменение освещенности отвечают углы падения лучей β и β_1 , соответственно, зная изменения значений косинуса угла β и β_1 вблизи значений 30° , можно определять и значения δ .

Значение косинуса угла 30° , составляет $\sqrt{3}/2$, или 0,866, при изменении значения угла на 1° , значение освещенности и, соответственно, выходной мощности модуля изменяется около 1%. Для фотоэлектрических модулей точность более 1% практически не используется. Современный допуск по мощностным характеристикам при производстве фотоэлектрических модулей составляет около 5 %. Соответственно допуская, что коэффициент отражения от поверхностей концентратора максимальный (близкий к единице), значения косинуса должны находиться в пределах: $0,823 < \alpha < 0,909$ или $25^\circ < \alpha < 35^\circ$, т.е. приблизительно 5° , от отдельно взятой боковой поверхности концентратора. При более точных допусках, при производстве модулей, значения изменения угла установки для каждой боковой отражающей поверхности концентратора, приблизительно соответствуют 1° изменения угла α , на 1% изменения мощности модуля.

Обобщая всё выше изложенное можно записать, при условии установки оптимального значения угла α для одной отражающей поверхности концентратора, угол установки для второй отражающей поверхности может

меняться не более чем на 5° , что может привести к изменению мощности фотоэлектрического модуля не более чем 5%.

Т.е. справедливо условие:

$$\alpha = 60^\circ \pm 5^\circ. \quad (4.25, \text{ а})$$

При условии изменения на равную величину угла установки обоих боковых поверхностей концентратора, угол установки может меняться не более чем на $2,5^\circ$, что суммарно приведет к изменению мощности фотоэлектрического модуля не более чем 5 %.

Т.е. справедливо условие:

$$\alpha = 60^\circ \pm 2,5^\circ. \quad (4.25, \text{ б})$$

4.5. Повышение мощностных характеристик солнечных установок при использовании низкопотенциального концентратора

Концентратор, описанный в п. 4.4, представляет собой плоский фоклин состоящий из двух отражающих поверхностей. Для создания концентратора отражающие поверхности были покрыты самоклеящейся светоотражающей пленкой с серебряно-металлизированной поверхностью марки Oracal, производитель пленки фирма ORAFOL. По результатам экспериментов было установлено, что солнечные модули с концентратором из таких поверхностей имели более высокие электрические характеристики, чем с поверхностями из других высококачественных отражающих материалов, например из зеркал. Геометрический коэффициент концентрации предложенного концентратора составлял 2. Локальный коэффициент концентрации зависит от коэффициента отражения покрытия и в нашем случае составляет: $K_c = 1 + R_c$. Весь концентратор представляет собой фоклин с однократным отражением лучей (рис. 4.5).

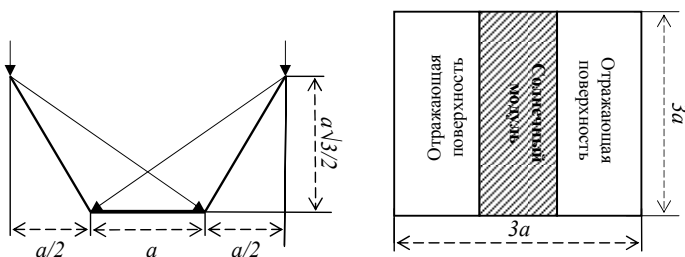


Рис. 4.5. Плоский концентратор для фотомодуля (справа вид раскрытого концентратора)

На рис.4.6. показаны габаритные размеры отражающих поверхностей плоского концентратора и расположение приемной поверхности абсорбера комбинированной солнечной установки.

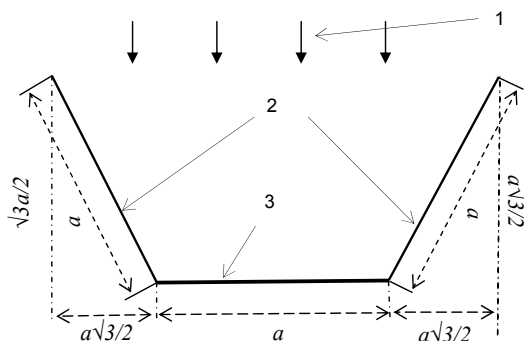


Рис. 4.6. Габаритные размеры концентратора для фотомодуля:

1 – падающее солнечное излучение; 2 – поверхности, покрытые светоотражающей; 3 – приемная поверхность абсорбера комбинированного гелиоколлектора пленкой.

На рис.4.7. показана исследовательская термофотозлектрическая установка с плоскими концентраторами. Как видно из рисунка, отражающие поверхности могут иметь небольшие зазоры при состыковке с приемной поверхностью, которые должны составлять не более 5 см.

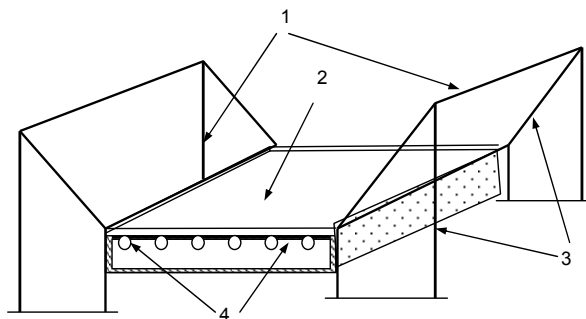


Рис. 4.7. Термофотозлектрическая установка с концентраторами: 1 – каркасы для боковых отражающих поверхностей; 2 – приемная поверхность комбинированного абсорбера; 3 – стойки для боковых концентраторов; 4 – комбинированный абсорбер термофотоколлектора.

В таблице 4.2 приведены результаты исследований фотоэлектрических блоков установки при наличии концентрированного излучения. Как видно из данных, увеличение значений мощностных электрических характеристик блока термофотоэлектрической установки сопри наличии концентратора составляют 35 %. При этом температура поверхности солнечных элементов не превышала значений температуры теплоносителя, которая составляла на входе 40 °С, а на выходе 50 °С. При нагреве теплоносителя до температуры 70 °С, температурные показатели для модуля не превышали допустимых значений, при этом нагрев модуля без теплоносителя превышал эти показатели.

Таблица 4.2

Данные нагрузочных характеристик отдельной солнечной батареи термофотоэлектрической установки

Характеристики фотоэлектрической батареи без концентратора											
I (A)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,3	3,25	3,2	3,2	3	2,2	0
U (B)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	19
P (Вт)	0	7	14	21	26,4	32,5	38,4	44,8	46	39,6	0
Характеристики фотоэлектрической батареи с плоским концентратором с отражающими поверхностями из зеркальной фольги											
I (A)	5	4,95	4,9	4,85	4,8	4,75	4,7	4,57	3,75	2,5	0
U (B)	0	2,02	3,67	5,77	7,7	10,1	12,1	14	16	18	19
P (Вт)	0	10	18	28	37	48	57	62	60	45	0
Освещенность 900 Вт/м ² , T _{воздуха} =30°С, температуры теплоносителя: T _{вх.} =40°С, T _{вых.} =50°С											

На графиках на рис.4.8 приводятся полученные данные по вольт-амперным и мощностным характеристикам фотогелиопрфиля.

Из графика на рис. 4.8 видно увеличение мощности при наличии концентратора для данных измерений на 35 % (с 46 до 62 Вт).

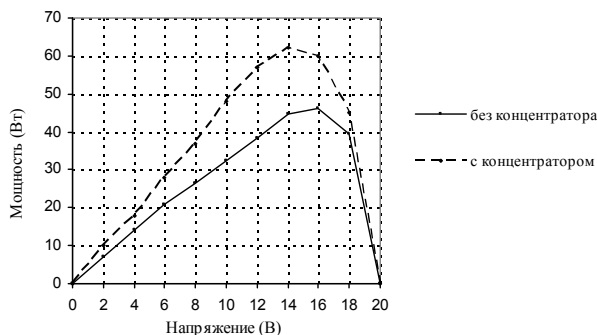


Рис. 4.8. Мощностная характеристика фотоэлектрического блока комбинированного термофотоколлектора при наличии концентратора

Экспериментальные данные по тепловой выработке теплового и комбинированного солнечного коллектора при использовании и без использования плоских концентраторов показали увеличение тепловой мощности солнечной установки при использовании концентратора, которая составляла от 50 % в начале работы (при режиме разогрева) гелиоколлектора и до 30 % при выходе гелиоколлектора на номинальный режим работы (рис.4.9).

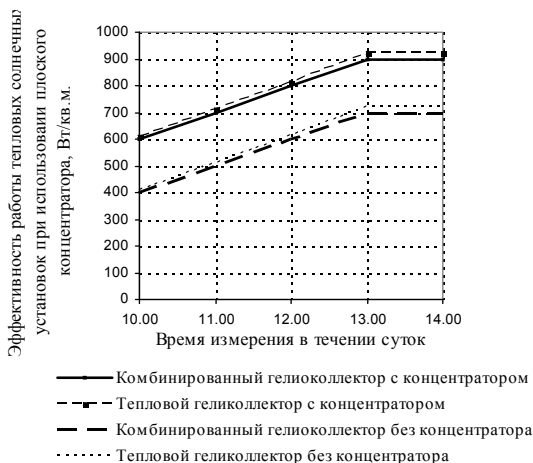


Рис. 4.9. Сравнительная мощностная тепловая выработка солнечных установок

Экспериментальные данные, полученные при сравнении работы тепловой и комбинированной установок (рис. 4.9), подтверждают полученные теоретические расчеты по увеличению суммарного КПД

установки. Результаты исследований показали, что при использовании солнечного концентратора можно увеличить удельную тепловую мощность на 30%, что составляет 900 Вт/м² и на 35 % электрическую. Суммарный коэффициент преобразования солнечной энергии установки увеличивался до 85 %. Притом, что тепловой КПД гелиопрофиля может составлять до 70 %, а электрический КПД солнечных элементов составляет 15%.

По результатам экспериментов можно сделать заключение об эффективности работы солнечных установок с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии.

4.6 Повышение эффективности работы солнечных установок при использовании различных видов прозрачных защитных покрытий

Одним из путей повышения эффективности работы солнечных установок, как тепловых, так и фотоэлектрических, является правильный выбор защитных покрытий, являющихся составной частью любой установки. На стекольном покрытии гелиоколлектора может теряться до 25% солнечной энергии, при этом его установка необходима для предотвращения тепловых потерь. Соответственно на защитном покрытии фотоэлектрического модуля также неизбежны потери. Задачей исследования является нахождение эффективного покрытия, которое удовлетворяло бы требованиям безопасности приёмных элементов, а так же требованиям достаточной прозрачности для пропускания солнечной радиации. Особенно эти исследования важны для комбинированных установок, в которых необходимы покрытия для предотвращения тепловых потерь и при этом имеющие достаточно большой коэффициент пропускания достаточный для нормальной работы фотоэлектрических модулей.

Задачей исследования было определение пропускной способности солнечного света различными веществами, именно определение оптического КПД, коэффициента поглощения солнечного излучения в инфракрасном, видимом и частично ультрафиолетовом диапазоне. Согласно проведенным в работах исследованиям, можно утверждать, что фотоэлектрические преобразователи на основе кремния, в отличие от других солнечных элементов (арсенид-галлиевых и др.), могут преобразовывать в электрический ток большую часть солнечного спектра, т.е. излучение с длиной волны 1,1 мкм и короче. Следовательно, измерительные приборы, на основе кремния, являются наиболее эффективными. Кремниевые солнечные элементы, предназначенные для энергетических целей и используемые как эталонные в обычных условиях, отличаются наиболее стабильными характеристиками из всех фотоэлектрических преобразователей. Эти солнечные элементы обладают также линейной зависимостью тока короткого замыкания в довольно широком диапазоне изменения плотности потока излучения, их чувствительность охватывает видимую и ближнюю инфракрасную области спектра, а также ближнюю ультрафиолетовую область.

Измерительный прибор представляет собой фотоэлектрическую пластинку размером $0,5 \text{ см}^2$, тыльный и лицевой контакты которой были подсоединены к миллиамперметру DT 830B (рис.4.10).

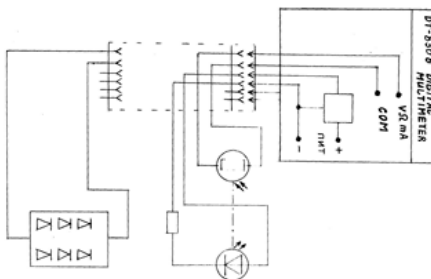


Рис. 4.10. Электрическая схема измерительного прибора

Для исследований были взяты образцы стекла толщиной 3 мм, 4 мм, 6 мм, оргстекло толщиной 1 мм и 4 мм, полистирол однослойный и двухслойный (толщина 0,5 мм), поликарбонат прозрачный (толщина 1 мм), которые поочередно клались на рабочую панель фотоэлемента. Исследования были проведены как с помощью измерительного прибора, так и при помощи фотоэлектрического модуля AXR-12, подключенного по такой же схеме (рис.4.10). Результаты исследований приводятся в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Пропускная способность различных материалов

Материал	Показания миллиамперметра (мА), изм. прибор	Показания амперметра (мА), модуль ARX-12	Соответствующие значения освещенности (Вт/м^2)	Пропускная способность материала (%)
1. Стекло (6 мм)	8,77	487	677	75
2. Стекло(4 мм)	9,48	526	731	81
3. Стекло (3мм)	9,95	552	768	85
4. Полистирол (3-х слойный)	9,95	552	768	85
5. Полистирол (2-х слойный)	10,18	565	786	87
6. Поликарбонат (2-х слойный)	10,3	572	795	88
7. Стекло (2мм)	10,53	585	813	90
8. Полистирол (однослойный)	10,88	605	840	93
9. Поликарбонат (однослойный)	11	611	849	94
10. Оргстекло(4мм)	11	611	849	94
11. Оргстекло(1мм)	11,11	617	858	95
12. Без материала	11,7	650	903	100

По результатам исследований видно, что наибольшей пропускной способностью обладают однослойные материалы поликарбонат, полистирол и тонкое оргстекло. Также оргстекло толщиной 4 мм обладает почти такой же пропускной способностью. Согласно результатам можно говорить, что наиболее эффективными защитными покрытиями для термофотоэлектрических установок могут являться: оргстекло, поликарбонат, а также различные типы обычных стекол, толщиной 3-4 мм. Эти материалы хорошо сохраняют тепловую энергию и пропускают солнечную радиацию, необходимую для работы фотоэлементов и абсорбера.

Получены экспериментальные данные по исследованию прозрачных защитных покрытий из различных материалов, определены наиболее эффективные материалы, используемые в защитных покрытиях в фотоэлектрических модулях и тепловых солнечных установках.

Вопросы для проверки теоретической и практической подготовки по разделу 4

1. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии в электрическую (физические основы, характеристики, устройство, область применения).

2. Кремниевые солнечные элементы, их основные характеристики.

3. Процесс сборки фотоэлектрических модулей.

4. Типы фотоэлектрических модулей.

5. Конструкция фотоэлектрических модулей.

6. Теоретические основы фотоэлектрического эффекта

7. Использование плоских низкопотенциальных концентраторов в фотоэлектрических установках

8. Использование фотоэлектрических систем

9. Фотоэлектрические системы для обеспечения автономного потребителя

10. Фотоэлектрические системы электропитания постоянного тока

11. Фотоэлектрические системы электропитания переменного тока

12. Методики расчетов фотоэлектрических систем

13. Тепловой абсорбер с кремниевыми фотоэлементами.

14. Комбинированные термофотоэлектрические установки, принцип работы.

15. Принцип работы актинометрических приборов (для измерения интенсивности солнечного излучения на поверхности Земли).

16. Концентраторы солнечной энергии для фотоэлектрических установок.

17. Комбинированные фотоэлектрические тепловые установки

18. Теоретический расчет низкопотенциального солнечного концентратора графоаналитическим методом

19. Плоский концентратор для фотоэлектрической установки на основе боковых отражающих поверхностей

20. Повышение мощностных характеристик солнечных установок при использовании низкопотенциального концентратора

21. Повышение эффективности работы солнечных установок при использовании различных видов прозрачных защитных покрытий

Литература, используемая в разделе 4

1. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии / Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. – Л: Наука, 1989. – 310 с.
2. Арбузов Ю. Д. Основы фотоэлектричества / Ю. Д. Арбузов, В. М. Евдокимов – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
3. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. – Л: Наука, 1989. – 405 с.
4. Стребков Д. С. Концентраторы солнечного излучения / Д. С. Стребков, Э. В. Тверьянович; под ред. академика РАСХН Д. С. Стребкова. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 316 с.
5. Даффи Дж. А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. А. Даффи, У. А. Бекман. – М: Мир, 1988. – 413 с.
6. Захидов Р. А. Теория и расчет гелиотехнических концентрирующих систем / Захидов Р. А., Умеров М. Р. – Ташкент: ФАН, 1977. – 144 с.
7. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов / Колтун М. М. – М.: Наука, 1985. – 300 с.
8. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.
9. Тимашев С.В. Фотоэлектрические преобразователи солнечной энергии. М. Энергия. 1985.
10. Аут И. Фотоэлектрические явления. М. Мир. 1980.
11. Фаренбрух А. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / А. Фаренбрух, Р. Бьюб; пер. с англ. под ред. М. М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
12. Грилихес В. А. Солнечные космические энергостанции / Грилихес В. А. – Л.: Наука, 1989. – 182 с.

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

КТФУ – комбинированная теплофотоэлектрическая установка;
 КП – коэффициент преобразования;
 СУ – солнечная установка;
 ВАХ – вольтамперная характеристика солнечной батареи;
 КСУ – комбинированная солнечная установка;
 СЭ – солнечный элемент;
 КСИ – концентрированное солнечное излучение;
 СФЕУ – солнечная фотоэлектрическая установка;
 К – коэффициент ослабления светового потока;
 I – плотность тока солнечной батареи;
 $I_{\max}$ – сила тока солнечной батареи в рабочей точке;
 $I_{\text{к.з.}}$ – ток короткого замыкания солнечной батареи;
 U – напряжение солнечной батареи;
 $U_{\max}$ – напряжение солнечной батареи в рабочей точке;
 $U_{\text{хх}}$ – напряжение холостого хода солнечной батареи;
 P – мощность солнечной батареи;
 $P_{\max}$ – мощность солнечной батареи в рабочей точке;
 $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагрузки;
 СБ – солнечная батарея;
 $S_{\text{бат.}}$ – площадь солнечной батареи;
 ФЭМ – фотоэлектрический модуль;
 $S_{\text{эл.}}$ – площадь солнечного элемента;
 $I_{\text{ф}}$ – интенсивность фототока;
 $\eta_{\text{сэ}}$ – коэффициент полезного действия солнечного элемента;
 $\eta_{\text{бат.}}$ – коэффициент полезного действия солнечной батареи;
 $\eta_{\text{КСУ}}$ – коэффициент полезного действия комбинированной солнечной установки;
 КПТЭ – коэффициент преобразования тепловой энергии;
 К – постоянная Больцмана;
 T – температура;
 $T_{\text{вх.}}$ – температура теплоносителя на входе;
 $T_{\text{вых.}}$ – температура теплоносителя на выходе.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
РАЗДЕЛ 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ.....	5
Тема 1. Основные характеристики Солнца	5
1.1. Солнце – как источник энергии	5
1.2. Строение и состав Солнца.....	7
1.3. Характеристика Солнца и солнечного излучения	8
1.4. Спектральное распределение внеземного излучения Солнца.....	9
1.4.1. Энергетическая характеристика солнечного излучения. Солнечная постоянная.....	9
1.4.2. Солнечное излучение за пределами атмосферы Земли. Спектральное распределение внеземного излучения.....	11
1.4.3. Временные изменения внеземного излучения	14
Тема 2. Прямое и диффузное излучение Солнца. Угловые коэффициенты ...	15
2.1. Изменение и ослабление прямого солнечного излучения.....	15
2.2. Основные факторы ослабления прямого солнечного излучения.....	16
2.3. Атмосферное поглощение солнечного излучения	18
2.4. Направление распространения прямого солнечного излучения.....	19
2.5. Диффузное излучение. Суммарная солнечная радиация.....	21
2.6. Примеры расчетов угловых коэффициентов.....	23
Тема 3. Солнечное излучение у поверхности Земли	26
3.1. Диффузное излучение на поверхности Земли	26
3.2. Плотность потока солнечной радиации на горизонтальную и наклонную поверхность.....	27
3.3. Методы измерения плотности потока солнечной радиации	30
3.3.1. Измерения плотности потока солнечной радиации	31
3.3.2. Приборы для измерения плотности потока солнечной радиации .	33
Вопросы проверки теоретической и практической подготовки по разделу 1	39
Литература, используемая в разделе 1	40
РАЗДЕЛ 2. УСТАНОВКИ ДЛЯ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОТОКА СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ В ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ	41
Тема 1. Оптические характеристики плоского солнечного коллектора.....	41
1.1. Основные элементы плоского солнечного коллектора.....	41
1.2. Пропускательная способность прозрачного покрытия.....	42
1.3. Поглощение излучения в частично прозрачной среде. Приведённая или поглощательная способность.....	44
1.4. Пример расчёта пропускательной способности	46
Тема 2. Оптические характеристики приемников солнечной энергии.....	47
2.1. Радиационные характеристики непрозрачных конструкционных материалов	47
2.2. Селективность. Селективные поверхности	51
2.3. Способы реализации селективных поверхностей	53
2.4. Пропускание излучения частично прозрачными средами.....	55

2.4.1. Отражение на границах раздела сред.....	56
2.4.2. Пропускательная способность без учёта поглощения	56
2.4.3. Поглощение излучения в частично прозрачной среде.....	57
2.4.4. Приведённая поглощательная способность	58
Тема 3. Конструкция и типы солнечных коллекторов	60
3.1 Устройство солнечных коллекторов	60
3.2. Классификация и основные элементы плоских солнечных коллекторов (ПСК).....	62
3.3. Конструкционные материалы в гелиотехнике	66
3.4. Основные требования, предъявляемые к конструкциям плоских солнечных коллекторов	70
Тема 4. Методика расчета плоских солнечных коллекторов	72
4.1. Уравнение баланса энергии плоского солнечного коллектора	72
4.2. Тепловые потери коллектора в окружающую среду (Q_L)	73
4.3. Полный коэффициент тепловых потерь солнечного коллектора	75
4.4. Определение температуры стеклянного покрытия	80
4.5. Полезная тепловая мощность коллектора (Q_U)	82
4.6. Расчёт параметров эффективности коллектора	85
4.6.1. Эффективность ребра коллектора (F)	85
4.6.2. Коэффициент эффективности коллектора.....	86
4.6.3. Коэффициент отвода теплоты из коллектора	89
4.6.4. Расчет полезной мощности и производительности ПСК	90
4.6.5. Конструкторский расчёт ПСК	90
Глава 5. Методика расчета активных систем солнечного горячего водообеспечения и отопления.....	92
5.1. Классификация и состав систем солнечного теплоснабжения	92
5.2. Основные конструктивные схемы активных установок солнечного теплоснабжения	93
5.3. Методика расчёта установок солнечного теплоснабжения с естественной циркуляцией теплоносителя.....	98
5.4. Методика расчёта установок солнечного теплоснабжения с принудительной циркуляцией теплоносителя	101
5.5. Методические рекомендации по расчетам установок солнечного горячего теплоснабжения и водообеспечения	110
Вопросы проверки теоретической и практической подготовки раздел 2	119
Литература, используемая в разделе 2	121
РАЗДЕЛ 3. СОЛНЕЧНЫЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ	122
Тема 1. Фотоэлектрическое преобразование потока солнечной радиации... ..	122
1.1. Теоретические основы фотоэлектрического эффекта.....	122
1.2. Основные характеристики кремниевого фотоэлектрического преобразователя (солнечного элемента).....	124
1.3. Конструкция фотоэлектрических модулей	128
1.4. Возможности увеличения мощности фотоэлектрических модулей	130

1.5 Использование плоских низкопотенциальных концентраторов в фотоэлектрических установках.....	134
Тема 2. Фотоэлектрические системы	137
2.1. Использование фотоэлектрических систем.....	137
2.2. Фотоэлектрические системы для обеспечения автономного потребителя.....	139
2.3. Фотоэлектрические системы электропитания постоянного тока ...	140
2.4. Фотоэлектрические системы электропитания переменного тока...	142
2.5. Методики расчетов фотоэлектрических систем	147
Тема 3. Термофотоэлектрические солнечные установки.....	158
3.1 Комбинированные фотоэлектрические тепловые установки.....	158
3.2 Увеличение эффективности работы термофотоэлектрической установки при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии.....	163
3.3 Конструкция термофотоэлектрической установки	166
Тема 4. Возможности использования концентраторов для повышения выработки фотоэлектрическими установками.....	168
4.1 Солнечные концентраторы для фотоэлектрических установок.....	168
4.2. Теоретический расчет низкопотенциального солнечного концентратора графоаналитическим методом.....	172
4.3. Расчет низкопотенциального концентратора для солнечных установок.....	175
4.4. Плоский концентратор для фотоэлектрической установки на основе боковых отражающих поверхностей.....	177
4.5. Повышение мощностных характеристик солнечных установок при использовании низкопотенциального концентратора.....	180
4.6 Повышение эффективности работы солнечных установок при использовании различных видов прозрачных защитных покрытий	184
Перечень контрольных вопросов теоретической и практической подготовки к разделу 3	187
Список использованной литературы в разделе 3	188
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ	189



Уважаемые читатели!

**Издательство «Спутник+»
предлагает:**

- 📖 **ИЗДАНИЕ И ПЕЧАТЬ МОНОГРАФИЙ, КНИГ** любыми тиражами (от 50 экз.).
 - ✓ Срок - от 3-х дней в полноцветной и простой обложке или твердом переплете.
 - ✓ Присвоение ISBN, рассылка по библиотекам и регистрация в Книжной палате.
 - ✓ Оказываем помощь в реализации книжной продукции.
- 📖 **ПУБЛИКАЦИЯ НАУЧНЫХ СТАТЕЙ** для защиты диссертаций в журналах по гуманитарным, естественным и техническим наукам.
 - ✓ Журнал «Естественные и технические науки» входит в перечень ВАК.
- 📖 **ПРОВЕДЕНИЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАОЧНЫХ КОНФЕРЕНЦИЙ** по всем научным направлениям для аспирантов, соискателей, докторантов и научных работников.
- 📖 **ПУБЛИКАЦИЯ СТИХОВ И ПРОЗЫ** в журналах «Российская литература», «Литературный альманах «Спутник» и «Литературная столица».
- + **Набор, верстка, корректура и редакция текстов.**
- + **Печать авторефератов, переплет диссертаций (от 1 часа).**
- **Переплетные работы, тиснение, полноцветная цифровая печать.**

Наш адрес: Москва, 109428, Рязанский проспект, д. 8А
тел. (495) 730-47-74, 778-45-60, 730-48-71 с 9 до 18 (обед с 14 до 15)
<http://www.sputnikplus.ru> e-mail: print@sputnikplus.ru

Учебное издание

**Кувшинов Владимир Владиславович,
Морозова Наталья Владиславовна**

СОЛНЕЧНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Учебное пособие

Издательство «Спутник +»
109428, Москва, Рязанский проспект, д. 8А.
Тел.: (495) 730-47-74, 778-45-60 (с 9.00 до 18.00)
Подписано в печать 09.04.2018. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 12,06. Тираж 40 экз. Заказ 1740.
Отпечатано в ООО «Издательство «Спутник +»