

**Министерство высшего и среднего специального образования
Республики Узбекистан**

**Ташкентский Государственный технический университет
имени Ислама Каримова**

Солнечная энергетика

Методические указания



Ташкент-2022

УДК620.321

**Солнечная энергетика. Методические указания
Юлдошев И.А., Жураева З.И.Ташкент-2022. 69 с.**

В данных методических указаниях рассмотрены вопросы использования солнечной энергии в солнечных системах и установках для автономного электроснабжения, горячего водоснабжения и теплоснабжения. Рассматриваются общие положения и методики расчета солнечных фотоэлектрических станций и солнечных станций башенного типа, солнечных систем горячего водоснабжения и теплоснабжения, а также рассмотрены классификация и выбор коллекторов солнечной энергии. Методические указания будут полезны для студентов при выполнении курсовых проектов и работ по дисциплине «Солнечная энергетика».

Печатаются по решению научно-методического совета ТашГТУ.
Протокол №7 от 30 марта 2022г.

Рецензенты: Зав.лаб.с.н.с. Собиров Ю.Б. (БСУ)
зам декана,доц.Саитов.Э. (ТашГТУ)

© Ташкентский государственный технический университет,2022

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время промышленное производство и жилищно-коммунальное хозяйство нашей страны нуждаются в проведении решительных мероприятий, направленных на снижение энергоемкости. Современные специалисты-энергетики должны обладать глубокими теоретическими знаниями и прочными практическими навыками для того чтобы уметь находить оптимальные решения в области энергосбережения и оценивать их эффективность.

Курсовая работа (проект) посвящена освещению теоретических и практических материалов по солнечной энергетике, одной из важнейших видов нетрадиционных и возобновляемых источников энергии а также, методике расчета автономных солнечных фотоэлектрических станций, солнечных станций башенного типа, оценке и расчетам основных параметров солнечных систем горячего водоснабжения и теплоснабжения. Солнечное теплоснабжение, т.е. использование солнечной энергии для горячего водоснабжения и отопления в жилищно-коммунальной и производственной сферах, получило в мировой практике важное место. В данных методических указаниях уделено внимание на выполнение расчетов и методики, солнечных энергетических систем.

Данная работа будет руководящим материалом для выполнения курсовых проектов и работ студентами энергетических специальностей по дисциплине «Солнечная энергетика».

1. РАСЧЕТ АВТОНОМНОЙ СОЛНЕЧНОЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Проблема использования солнечной энергии, сегодня привлекает пристальное внимание всех исследователей и общественности. Выработка электроэнергии при помощи электростанций на солнечных батареях используется сегодня практически во всем мире и масштабы использования электроэнергии солнечных батарей все время растут. Этому способствуют множество факторов, основными из которых являются использование альтернативных (возобновляемых) источников энергии, которые в последнее время приобретают все большую актуальность и полное отсутствие каких-либо движущихся частей, благодаря чему срок их службы практически не ограничен. Электростанции на солнечных элементах постоянно совершенствуются. Сегодня они могут использоваться как дополнительные источники электроснабжения, работающие совместно с другими или полностью автономные.

Для расчета автономной солнечной фотоэлектрической станции (СФЭС) требуется определение номинальной мощности солнечных модулей, их количества, ёмкости аккумуляторных батарей, мощностей инвертора и контроллера заряда-разряда. При этом необходимыми данными для расчета мощности автономной солнечной фотоэлектростанции являются: географическое расположение, суммарная мощность и примерное время работы каждого электро потребителя.

Для проектирования СФЭС, нужно проводить расчет мощности станции и ее элементов.

Основные понятия:

Автономная солнечная фотоэлектрическая станция (АСФЭС) (рис.1.1) - совокупность устройств, служащих для преобразования солнечной энергии в электрическую.

Основными комплектующими АСФЭС являются:(рис.1.1)

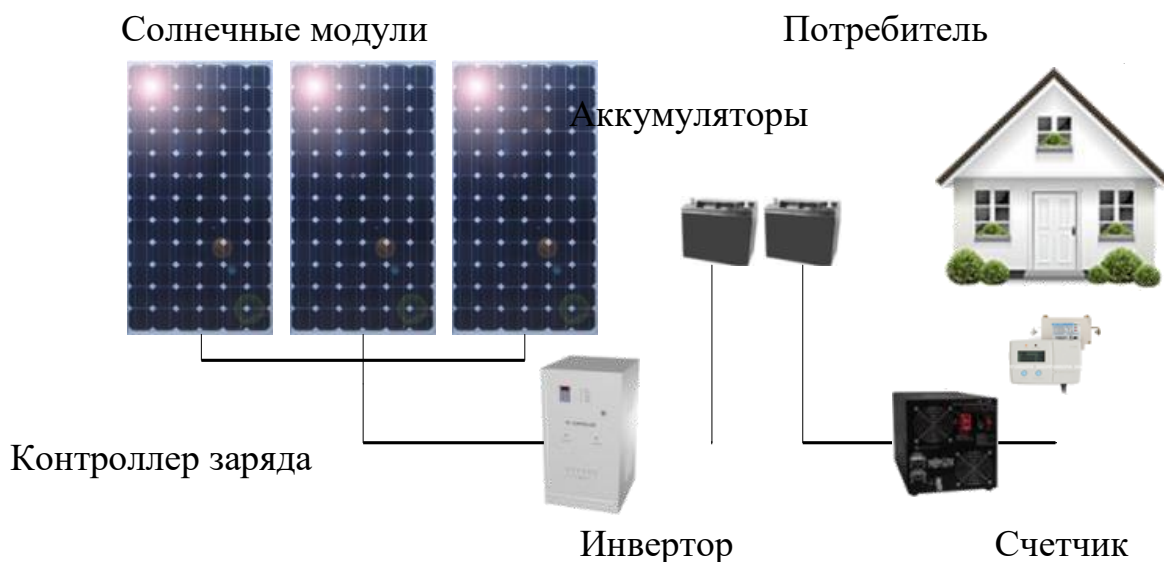


Рис 1.1.Схема автономной солнечной ФЭС

1) солнечная батарея (СБ) - несколько объединённых фотоэлектрических преобразователей (фотоэлементов) - полупроводниковых устройств, прямо преобразующих солнечную энергию в постоянный электрический ток;

2) контроллер заряда - устройство, являющееся промежуточным звеном между СБ и аккумуляторной батареей (АКБ), основная задача которого осуществлять контролируемый заряд-разряд АКБ;

3) аккумуляторная батарея - составной элемент СЭС, служит для накопления и отдачи электрической мощности;

4) инвертор напряжения - устройство, позволяющее трансформировать постоянное напряжение в переменное 220 В с частотой 50 Гц;

Рассмотрим методику расчета мощности автономной солнечной фотоэлектрической станции для нужд освещения лаборатории энергосбережения и энергоэффективности.

Рассмотрим подробнее методику расчета АСФЭС поэтапно.

Необходимые технические параметры светильника сведены в табл1.1

Таблица1.1.Технические параметры светильника

№	Тип светильника	Потребляемое напряжение (В)	Мощность светильника (кВт)
	Светодиодный «Е-ССП-Страда-А»	220В (+/-10%) / 50Гц	0,48

Расчет осветительной нагрузки

При проектировании АСЭС рассчитывается активная суммарная мощность ΣP осветительной нагрузки по формуле:

$$\Sigma P = N \cdot P_c, \quad (1.1)$$

Где n- количество светильников;

P_c - мощность светилника,кВт

$$\Sigma P = 12 \cdot 48 = 0,576 \text{ кВт.}$$

Количество электроэнергии \bar{W} необходимое для осветительных устройств в сутки,находится по формуле:

$$W = \Sigma P \cdot t, \quad (1.2)$$

$$W = 576 \cdot 9 = 5,184 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

где t - время работы осветительных устройств.

Выбор величины напряжения постоянного тока системы

Величина напряжения системы подбирается исходя из мощности потребителей переменного тока. Если мощность

потребителей переменного тока не превышает 1 кВт, то выбирается напряжение системы 12 В. В том случае если мощность потребителей превышает мощность 1 кВт, выбирается напряжение системы 24 В. При мощности потребителей больше 3,5 кВт выбирается напряжение системы 48 В.

В целях уменьшения потерь электроэнергии выбираем напряжение АКБ 48 В.

Выбор автономного инвертора напряжения

Выбор инвертора напряжения производится по суммарной пиковой мощности осветительной нагрузки.

Технические параметры инвертора напряжения приведены в таблице 1.2

Таблица 1.2. Технические параметры инвертора напряжения

Тип инвертора напряжения	Входное постоянное напряжение (В)	Выходное переменное напряжение	Мощность (кВт)
NS-1200-S	24	220	1,2

Выбор и расчет солнечных батарей

Для расчета автономной солнечной электростанции выбираются поликристаллические СБ. Технические параметры СБ приведены в таблице 1.3

Таблица 1.3 Технические параметры СБ

Тип СБ	Мощность СБ (Вт)	Напряжение СБ (В)	Количество СБ(шт)
Ехmork ФСМ-200П	200	24	4

Количество электроэнергии, вырабатываемой одной солнечной батареей в сутки, находится по формуле:

$$W_{\text{СБ}} = K \cdot P_{\text{СБ}} \cdot n, \quad (1.3)$$

$$W_{\text{СБ}} = 1,5 \cdot 200 \cdot 5 = 1,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сутки},$$

где K - коэффициент солнечной инсоляции характеризующий дневную сумму солнечной радиации, кВт*ч/м² при горизонтальной площадке;

n - среднее время работы СБ в сутки;

$P_{\text{СБ}}$ - мощность одной СБ.

Расчет необходимого количества солнечных батарей для работы солнечной электростанции находится по формуле:

$$N_{\text{СБ}} = \frac{W}{W_{\text{СБ}}}, \quad (1.4)$$

$$N_{\text{СБ}} = \frac{5,184}{1,5} = 3,456 \text{ шт.}$$

Округляем значение до целого в большую сторону и уточняем мощность вырабатываемой системой солнечных батарей по формуле;

$$W = W_{\text{СБ}} \cdot N_{\text{СБ}}, \quad (1.5)$$

$$W = W_{\text{СБ}} \cdot N_{\text{СБ}} = 1,5 \cdot 4 = 6 \text{ кВт} \cdot \text{ч/сутки}$$

Расчет емкости и выбор аккумуляторных батарей

Требуемое значение емкости АКБ находится по формуле:

$$C = \frac{W}{U} + C_1, \quad (1.6)$$

где C_1 - значение, учитывающее потери на заряд - разряд аккумуляторов находится по формуле;

$$C_1 = \frac{W}{U} \cdot K_1, \quad (1.7)$$

где U - постоянное напряжение АКБ;
 $k_1 = 0,3$ - коэффициент потерь на заряд - разряд аккумуляторов;

$$C = \frac{6 \cdot 10^3}{48} + 37,5 = 162,5 \text{ А} \cdot \text{ч.}$$

Округляем значение емкости АКБ в большую сторону и принимаем стандартное значение $C = 200 \text{ А} \cdot \text{ч}$.

Данные АКБ сведены в таблицу 1.4

Таблица 1.4. Данные АКБ

Тип АКБ	Емкость АКБ (А · ч)	Количество(шт)
<u>GX12-100</u>	100	2

Расчет контроллера заряда

АКБ типа GX12-100 заряжается током 10% от номинальной емкости. Ток заряда АКБ находится по формуле:

$$I_3 = 0,1 \cdot C, \quad (1.8)$$

$$I_3 = 200 \cdot 0,1 = 20 \text{ А.}$$

Выбираем два контроллера заряда АКБ типа TS-MPPT-20 А. Данные контроллера СБ сведены в таблица 1.5

Таблица 1.5. Данные контроллера СБ

Тип контроллера СБ	Ток заряда АКБ (А)	Рабочее напряжение (В)
<u>TS-MPPT-20</u>	20	24

Таким образом, данная методика расчета АСФЭС включает в себе следующие этапы:

- расчет осветительной нагрузки, количество электроэнергии, потребляемое в сутки;
- выбор оптимального постоянного напряжения системы;
- выбор инвертора переменного напряжения;
- выбор и расчет необходимой мощности СБ;
- выбор и расчет емкости АКБ;
- выбор и расчет контроллера СБ.

2. РАСЧЕТ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ БАШЕННОГО ТИПА

Задача №1

На солнечной электростанции башенного типа установлено n гелиостатов, каждый из которых имеет поверхность F_{Γ} м². Коэффициент отражения гелиостата $R_{отр}$. Максимальная облученность зеркала гелиостата E_{Γ} .

Гелиостаты отражают солнечные лучи на приемник, на поверхности которого зарегистрирована максимальная энергетическая освещенность $E_{пр}$. Коэффициент поглощения приемника $A_{погл}$. Степень черноты приемника $\varepsilon_{пр}$.

В приемнике нагревается и испаряется рабочее тело (вода) до температуры t_0 . Давление рабочего тела составляет p_0 . Полученный перегретый пар направляется в турбину мощностью $N_э$, работающую по циклу Ренкина. Давление пара за турбиной составляет $p_к$. Относительный внутренний КПД турбины η_{oi} . Механический КПД $\eta_m=0,975$. КПД электрогенератора $\eta_э=0,985$. Работой насоса, потерями тепла при его транспортировке, собственными нуждами – пренебречь.

Определить:

- расход пара на турбину D_0 , кг/с;
- площадь поверхности приемника $F_{пр}$ и тепловые потери в нем $Q_{пот}$, вызванные излучением и конвекцией. Принять, что конвективные потери вдвое меньше потерь от излучения;
- энергию, полученную приемником от солнца через гелиостаты (кВт).

Исходные данные взять из табл 2.1 по вариантам.

Таблица 2.1. Исходные данные для задачи № 1

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поверхность гелиостата, F_{Γ} , м ²	64	61	58	55	52	49	46	43	40	37

Продолжение таблица №1

Коэффициент отражения гелиостата, $R_{отр}$	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78
Максимальная облученность зеркала гелиостата, E_T , Вт/м ²	550	575	580	585	590	600	610	620	615	605
Максимальная энергетическая освещенность приемника, $E_{пр}$, МВт/м ²	2,5	2,1	2,2	2,3	2,6	2,5	2,0	1,9	2,1	1,9
Коэффициент поглощения приемника, $A_{погл}$	0,95	0,96	0,94	0,94	0,93	0,95	0,96	0,97	0,95	0,95
Степень черноты приемника, $\epsilon_{пр}$	0,96	0,95	0,94	0,95	0,97	0,94	0,94	0,93	0,95	0,94
Начальная температура пара, t_0 , °С	590	580	570	600	545	550	555	535	565	585
Начальное давление пара, p_0 , МПа	10	11	12	13	14	13,5	13,7	12,5	11,2	10,6
Мощность СЭС, N_3 , МВт	1,05	3	1,1	5	2	1,2	4,0	1,0	5,5	4,0
Конечное давление пара, p_k , кПа	4,5	5	5,5	6	6,5	3	3,5	4,2	4,3	4,4
Относительный внутренний КПД турбины, η_{oi}	0,85	0,84	0,83	0,88	0,84	0,86	0,87	0,82	0,83	0,84
Относительный внутренний КПД турбины, η_{oi}	0,85	0,84	0,83	0,88	0,84	0,86	0,87	0,82	0,83	0,84
Величина	Номер варианта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Поверхность гелиостата, F_T , м ²	54	51	68	65	62	69	66	63	60	67

Продолжение таблица №1

Коэффициент отражения гелиостата, $R_{отр}$	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82
Максимальная облученность зеркала гелиостата, E_T , Вт/м ²	595	580	605	600	610	595	580	605	600	610
Максимальная энергетическая освещенность приемника, $E_{пр}$, МВт/м ²	2,44	2,14	2,24	2,34	2,64	2,54	2,04	1,94	2,14	1,94
Коэффициент поглощения приемника, $A_{погл}$	0,95	0,96	0,94	0,94	0,93	0,93	0,95	0,96	0,94	0,95
Степень черноты приемника, $\epsilon_{пр}$	0,96	0,95	0,94	0,95	0,96	0,93	0,94	0,95	0,95	0,94
Начальная температура пара, t_0 , °С	450	480	470	400	445	450	455	435	465	485
Начальное давление пара, p_0 , МПа	10	11	12	13	14	13,5	13,7	12,5	11,2	10,6
Мощность СЭС, N_3 , МВт	2,05	3,5	1,5	5,5	2,5	1,4	3,4	2,0	4,5	4,2
Конечное давление пара, p_k , кПа	6	6,5	3	3,5	4,2	6	6,5	3	3,5	4,2
Относительный внутренний КПД турбины, η_{oi}	0,85	0,84	0,83	0,88	0,84	0,86	0,87	0,82	0,83	0,84

- количество гелиостатов – n , шт;
- как изменится мощность СЭС, если вместо паротурбинной установки применить кремниевые преобразователи с КПД $\eta_{фэ} = 0,141$, занимающие ту же площадь, что и зеркала гелиостатов?

Методические указания к задаче № 1

1. Изобразим схематично солнечную электростанцию башенного типа (рис.2.1). Состав и типовая технологическая схема солнечной электростанции башенного типа приведены в Приложении 6

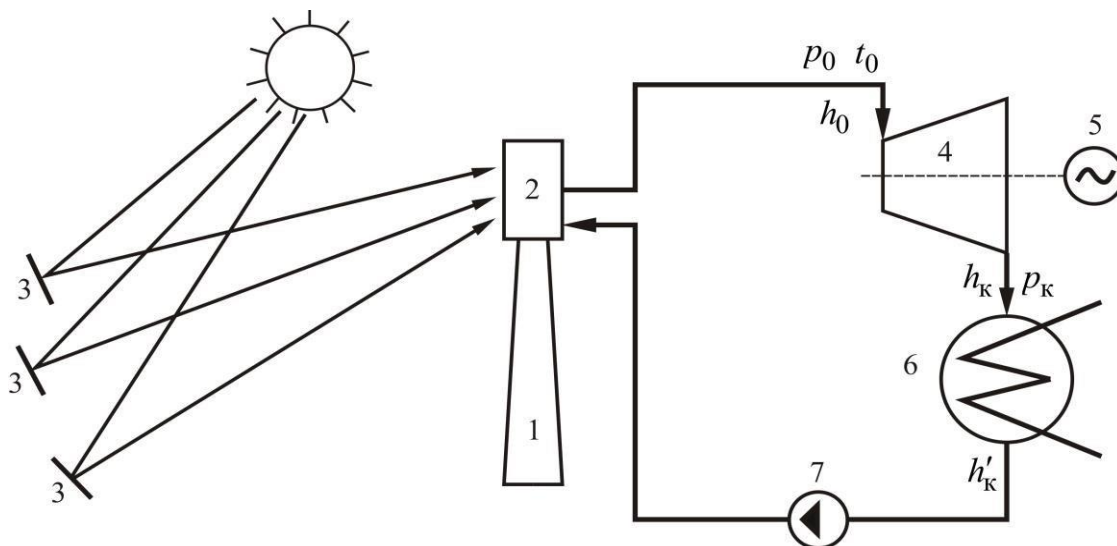


Рис. 2.1. Схема солнечной электростанции башенного типа:
 1 – солнечная башня; 2 – приемник; 3 – гелиостаты; 4 – паровая турбина; 5 – электрогенератор; 6 – конденсатор; 7 – насос

2. Построим процесс расширения пара в турбине $h=s$ диаграмме(рис. 2.2).

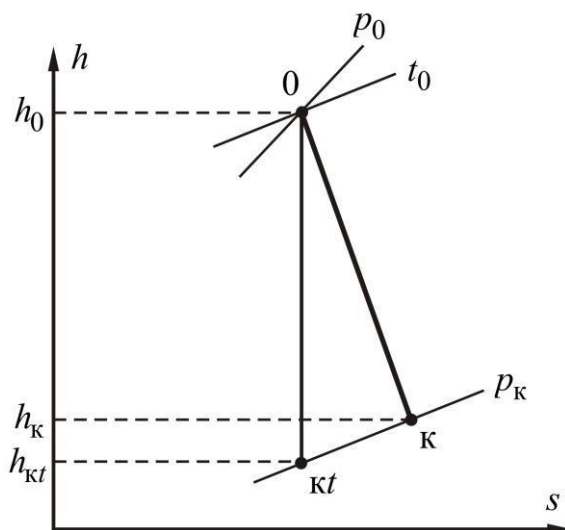


Рис. 2.2. Процесс расширения пара в турбине в $h-s$ диаграмме:
 $0-kt$ – теоретический процесс; $0-k$ – действительный

3. Теоретический (располагаемый) теплоперепад турбины:

$$H_0 = h_0 - h_{kt}, \text{ кДж/кг}, \quad (2.1)$$

где h_0 – энтальпия пара на входе в турбину – точка 0 (рис. 2).
 Определяется из таблиц свойств воды и водяного пара по p_0 и t_0 . h_{kt} – энтальпия пара на выходе из турбины в теоретическом процессе – точка kt . Определяется из таблиц свойств воды и водяного пара по p_k и s_0 (т.к. процесс $0-kt$ происходит при $s = const$).

4. Действительный теплоперепад турбины:

$$H_i = H_0 - \eta_{oi}, \text{ кДж/кг}. \quad (2.2)$$

где

η_{oi} – относительный внутренний КПД турбины, известен по заданию.

5. Энтальпия пара на выходе из турбины в действительном процессе: $h_k = h_0 - H_i$, кДж/кг.

6. По давлению p_k из таблиц свойств воды и водяного пара находим значение энтальпии конденсата h'_k .

7. Расход пара на турбину определяется из основного энергетического уравнения турбины:

$$D_0 = \frac{1000 \cdot N_{\Sigma}}{H_i \cdot \eta_m \cdot \eta_{\Sigma}}, \text{ кг/с}. \quad (2.3)$$

8. Расход тепла на турбоустановку:

$$Q_{\text{ТУ}} = D_0 (h_0 - h'_k), \text{ кВт}. \quad (2.4)$$

9. Удельные потери тепла с поверхности приемника солнечной энергии за счет излучения:

$$q_{\text{изл}} = c_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}} \cdot \left(\frac{T_0}{100} \right)^4, \text{ Вт/м}^2, \quad (2.5)$$

где

$c_0 = 5,67 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}^4$ – степень излучения абсолютно черного тела (постоянная Стефана – Больцмана).

10. Из условия известно, что:

$$q_{\text{конв}} = 0,5 \cdot q_{\text{изл}}$$

Тогда:

$$\Delta q_{\text{пот}} = q_{\text{изл}} + q_{\text{конв}} = 1,5 \cdot q_{\text{изл}}. \quad (2.6)$$

11. Полная величина тепловых потерь приемника определяется по формуле:

$$\Delta Q_{\text{пот}} = \Delta q_{\text{пот}} \cdot F_{\text{пр}}, \quad (2.7)$$

где

$F_{\text{пр}}$ – площадь поверхности приемника. Задаемся этой величиной в диапазоне $1 \div 7 \text{ м}^2$.

12. Количество тепла, полученное приемником от солнца через гелиостаты, определяется по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = Q_{\text{ГУ}} + \Delta Q_{\text{пот}}, \quad (2.8)$$

13. Площадь поверхности приемника:

$$F'_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{E_{\text{пр}}}, \text{ м}^2, \quad (2.9)$$

где

$E_{\text{пр}}$ – максимальная энергетическая освещенность приемника, известна по заданию.

14. Погрешность вычислений:

$$\varepsilon = \left| \frac{F'_{\text{пр}} - F_{\text{пр}}}{F'_{\text{пр}}} \right| \cdot 100 \leq 1\%. \quad (2.10)$$

Если расхождение между заданной и полученной величиной площади находится в допустимых пределах, то расчет считаем законченным. Если нет, то возвращаемся к п. 11, приняв $F_{\text{пр}} = F'_{\text{пр}}$.

15. Количество тепла, получаемое приемником от солнца через гелиостаты, можно рассчитать по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = E_{\text{г}} \cdot n \cdot F_{\text{г}} \cdot R_{\text{отр}} \cdot A_{\text{погл}} \cdot \quad (2.11)$$

Тогда количество гелиостатов:

$$n = \frac{Q_{\text{пр}}}{E_{\text{г}} \cdot F_{\text{г}} \cdot R_{\text{отр}} \cdot A_{\text{погл}}} \cdot \quad (2.12)$$

16. Мощность солнечной электростанции в случае, если вместо ПТУ применить кремниевые фотоэлементы, занимающие ту же площадь, что и зеркала гелиостатов:

$$N_{\text{э}}^{\Phi} = E_{\text{г}} \cdot n \cdot F_{\text{г}} \cdot \eta_{\text{фэ}} \cdot \quad (2.13)$$

3. Расчет системы солнечного теплоснабжения здания

Проточный коллектор – солнечный коллектор, в котором нагрев теплоносителя осуществляется при движении его через коллектор (рисунок 3.1). Проточный солнечный коллектор представляет собой систему, в которой вода протекает по параллельным трубкам, закрепленным на поглощающей панели.

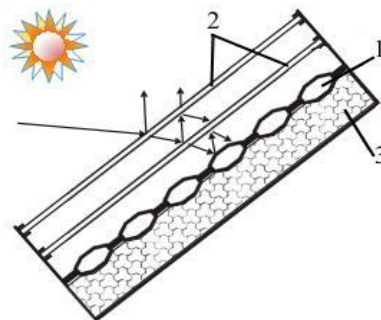


Рис 3.1. Схема строения проточного гелиоколлектора

1 – поглощающая панель; 2 – прозрачная теплоизоляция; 3 – непрозрачная теплоизоляция

Основными элементами плоского проточного солнечного коллектора являются: корпус, где расположена поглощающая панель 1 с каналами для теплоносителя; прозрачная теплоизоляция 2, снижающая потери в окружающую среду через верхнюю поверхность коллектора; непрозрачная тепловая изоляция 3, снижающая потери в окружающую среду через днище коллектора и

его боковые грани

Задача №2

На крыше здания установлен пластинчатый приемник солнечной энергии проточного типа, который имеет поверхность F , м^2 . Коэффициент использования солнечной энергии $\eta_{\text{пр}}$. Облученность приемника E . Приемник освещается солнцем в течение суток $\tau_{\text{осв}}$.

В приемнике нагревается рабочее тело (вода) от температуры $t_{\text{в1}}$ до температуры $t_{\text{в2}}$. Вода направляется в систему теплоснабжения здания, тепловой мощностью $Q_{\text{т.сн}}$ и в аккумулятор тепловой энергии. **Определить:**

- расход воды через приемник $G_{\text{в}}$, кг/с
- расходы воды в систему теплоснабжения $G_{\text{т.сн}}$ и в аккумулятор $G_{\text{акк}}$, кг/с
- площадь поверхности приемника F , м^2
- емкость аккумулятора V , м^3

Исходные данные взять из таблица.3.1 по вариантам.

Таблица 3.1 Исходные данные для задачи № 3.1

Величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент использования солнечной энергии $\eta_{\text{пр}}$	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78	0,8	0,81	0,82	0,79	0,78
Максимальная облученность приемника, $E, \text{Вт/м}^2$.	550	575	580	585	590	600	610	620	615	605
Температура воды на входе, $t_{\text{в1}}, ^\circ\text{C}$	32	45	27	40	30	45	37	25	30	19
Температура воды на выходе, $t_{\text{в2}}, ^\circ\text{C}$	45	53	45	55	54	56	49	55	50	36
Тепловая мощность системы теплоснабжения, $Q_{\text{т.сн}}, \text{кВт}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5

Период освещения приемника, $\tau_{осв}$, час	5	6	4	6	7	5	6	7	5	4
Величина	Номер варианта									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Коэффициент использования солнечной энергии $\eta_{пр}$	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76	0,8	0,79	0,78	0,77	0,76
Максимальная облученность приемника, E , Вт/м ² .	450	475	480	485	490	400	410	420	515	505
Температура воды на входе, $t_{в1}$, °С	35	44	24	41	34	41	38	21	19	18
Температура воды на выходе, $t_{в2}$, °С	48	58	47	56	55	58	52	53	45	36
Тепловая мощность системы теплоснабжения, $Q_{т.сн}$, кВт	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6	1,1	1,6	2,1	2,6	3,1
Период освещения приемника, $\tau_{осв}$, час	7	6	4	6	7	5	6	7	5	4

Методические указания к задаче № 2

1. Изобразим схему системы солнечного теплоснабжения здания (рис. 3.2).

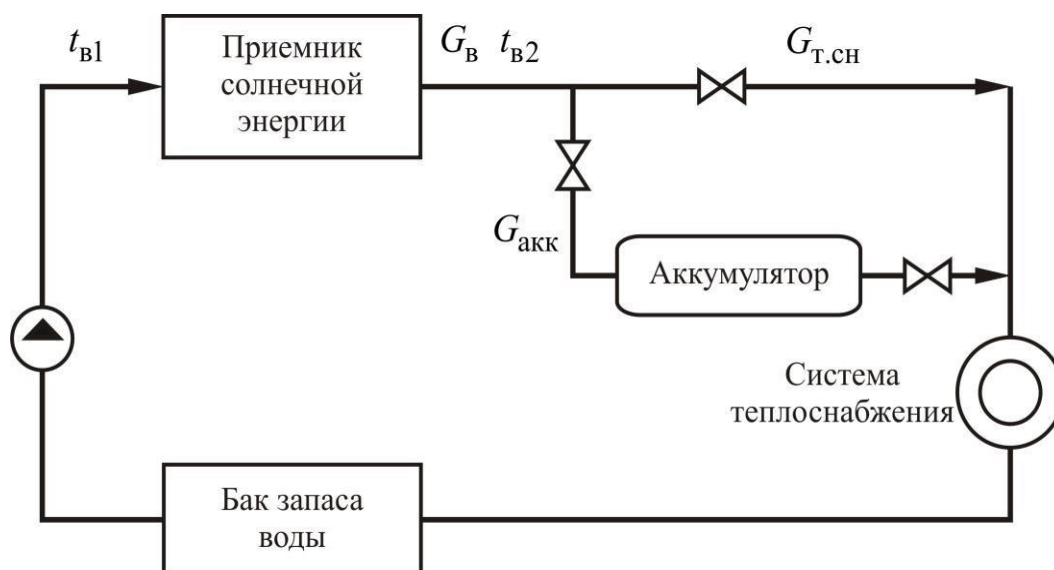


Рис.3.2. Принципиальная схема системы солнечного теплоснабжения здания

2. Суточное потребление тепла системой теплоснабжения определяется по формуле:

$$Q_{\text{сут}} = 24 \cdot 3600 \cdot Q_{\text{т.сн}}, \text{ Дж}, \quad (3.1)$$

где,

24 – количество часов в сутках;

3600 – число секунд в 1 часе;

$Q_{\text{т.сн}}$ – мощность системы теплоснабжения рассматриваемого здания.

3. Тепло, воспринимаемое приемником солнечной энергии в течение периода освещенности, рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{пр}} = E \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot F \cdot \tau_{\text{осв}} \cdot 3600, \text{ Дж}, \quad (3.2)$$

где

E – облученность приемника,

$\eta_{\text{пр}}$ – коэффициент использования солнечной энергии приемником,

F – площадь поверхности приемника,

$\tau_{\text{осв}}$ – период освещения приемника солнцем в течение суток.

4. Тогда уравнение теплового баланса приемника солнечной энергии можно записать в виде:

$$Q_{\text{сут}} = Q_{\text{пр}},$$

или

$$24 \cdot Q_{\text{т.сн}} = E \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot F \cdot \tau_{\text{осв}}. \quad (3.3)$$

5. Из этого уравнения можно определить площадь поверхности пластинчатого приемника солнечной энергии проточного типа F :

$$F = \frac{24 \cdot Q_{\text{т.сн}}}{E \cdot \eta_{\text{пр}} \cdot \tau_{\text{осв}}}, \text{ м}^2 \quad (3.4)$$

6. Расход воды через приемник солнечной энергии определяется по формуле:

$$G_B = \frac{Q_{\text{сут}}}{c_p \cdot (t_{B2} - t_{B1}) \cdot \tau_{\text{осв}} \cdot 3600} = \frac{24 \cdot Q_{\text{т.сн}}}{c_p \cdot (t_{B2} - t_{B1}) \cdot \tau_{\text{осв}}}, \text{ кг/с}, \quad (3.5)$$

где

$$c_p = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} - \text{теплоемкость воды};$$

t_{B1} , t_{B2} – начальная и конечная температура рабочего тела (воды) соответственно.

7. Расход воды в систему теплоснабжения здания рассчитывается по формуле:

$$G_{\text{т.сн}} = \frac{Q_{\text{т.сн}}}{c_p \cdot (t_{B2} - t_{B1})}, \text{ кг/с}. \quad (3.6)$$

8. Расход воды в аккумулятор тепловой энергии накопительного типа рассчитывается по формуле:

$$G_{\text{акк}} = G_B - G_{\text{т.сн}}, \text{ кг/с}. \quad (3.7)$$

9. Емкость аккумулятора можно определить по формуле:

$$V = G_{\text{акк}} \cdot \tau_{\text{осв}} \cdot \frac{1}{\rho}, \text{ м}^3, \quad (3.8)$$

где $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ – плотность воды.

4. Расчет солнечного горячего водоснабжения

Солнечная энергия – практически неисчерпаемый и экологически чистый источник энергии. Мощность потока солнечной энергии у верхней границы атмосферы равна $1,7 \cdot 10^{14}$ кВт, а на поверхности Земли – $1,2 \cdot 10^{14}$ кВт. Общее годовое количество поступающей на Землю солнечной энергии составляет $1,05 \cdot 10^{18}$ кВт · ч, в том числе на поверхность суши приходится $2 \cdot 10^{17}$ кВт · ч. Это в 320 раз больше энергии, которую потребляют люди на Земле. Поэтому без ущерба для экологической среды может быть использовано в производственных целях до 1,5% всей поступающей солнечной энергии.

Курсовая работа данной тематике посвящена расчету и оценке основных параметров солнечных систем горячего водоснабжения. Использование солнечной энергии для горячего водоснабжения и отопления в жилищно-коммунальной и производственной сферах получило в мировой практике наибольшее распространение по сравнению с другими направлениями применения возобновляемых источников энергии. Существующие методы расчета таких систем позволяют на основе применения климатической информации и с учетом характеристик используемого оборудования определять их основные параметры: коэффициент замещения нагрузки (доля солнечной энергии в покрытии нагрузки) за некоторый рассматриваемый период (месяц, сезон, год), полезную теплопроизводительность установки за этот период, площадь солнечных коллекторов в установке.

Студентам предлагается в зависимости от варианта определить количество энергии, поступающей на поверхность коллектора солнечной энергии; вычислить полный коэффициент тепловых потерь и теплопроизводительность гелиоколлектора; установить сезонную экономию топлива, обеспечиваемую использованием солнечной энергии.

4.1. Классификация солнечных систем горячего водоснабжения

Характерным отличием солнечных систем горячего водоснабжения (ССГВ) является применение специального элемента – гелиоколлектора, предназначенного для улавливания солнечной радиации и преобразования ее в тепловую энергию.

Гелиоколлекторы делятся на плоские и фокусирующие. Наиболее распространенные – плоские приемники, которые собирают как прямое, так и рассеянное излучение, и нагревают теплоноситель до 60–80°C.

Плоские гелиоколлекторы делятся на простые, содержащие весь объем жидкости, которую необходимо нагреть, и проточные, нагревающие за определенное время только небольшое количество жидкости, которая затем, как правило, накапливается в отдельном резервуаре – баке-аккумуляторе.

По способу транспортировки теплоносителя ССГВ бывают с естественной (рис. 4.1, а и 4.2, б) и принудительной (рис. 4.1, б и 4.2, а) циркуляцией.

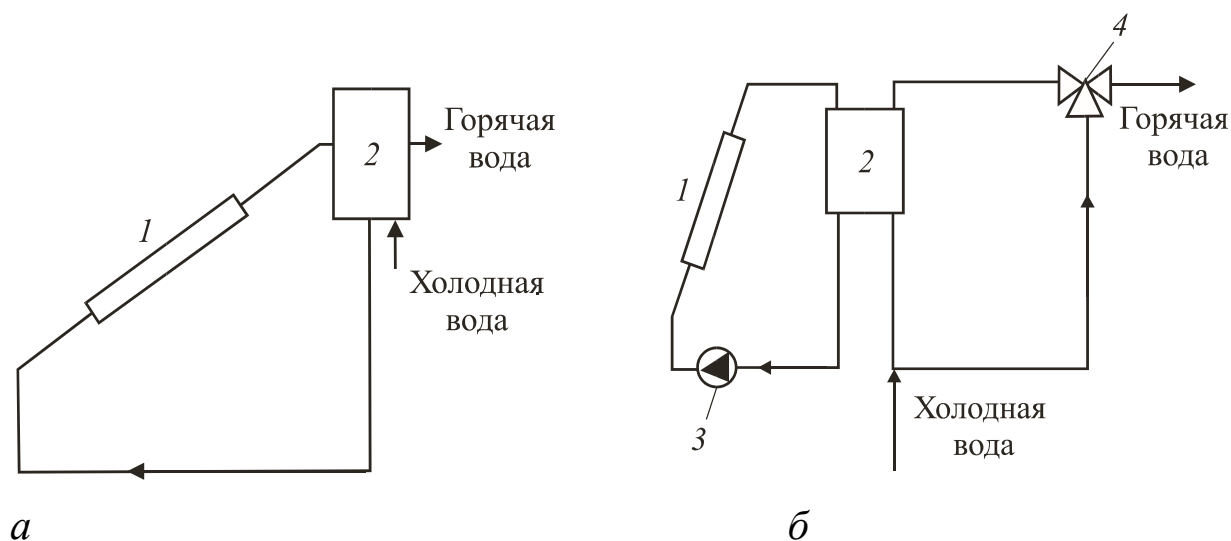


Рис. 4.1. Принципиальная схема солнечной водонагревательной установки:

а – с естественной циркуляцией теплоносителя; *б* – принудительной циркуляцией теплоносителя; *1* – коллектор солнечной энергии (гелиоколлектор);

2 – бак-аккумулятор горячей воды; *3* – насос; *4* – смесительный вентиль

Солнечные системы горячего водоснабжения с естественной циркуляцией обычно используются для небольших потребителей, а для крупных потребителей горячей воды для циркуляции теплоносителя требуется насос 3 (рис. 4.1, б).

Если в контуре коллектора солнечной энергии и в баке-аккумуляторе теплоты используется вода, то ССГВ выполняется по одноконтурной схеме (рис. 4.1).

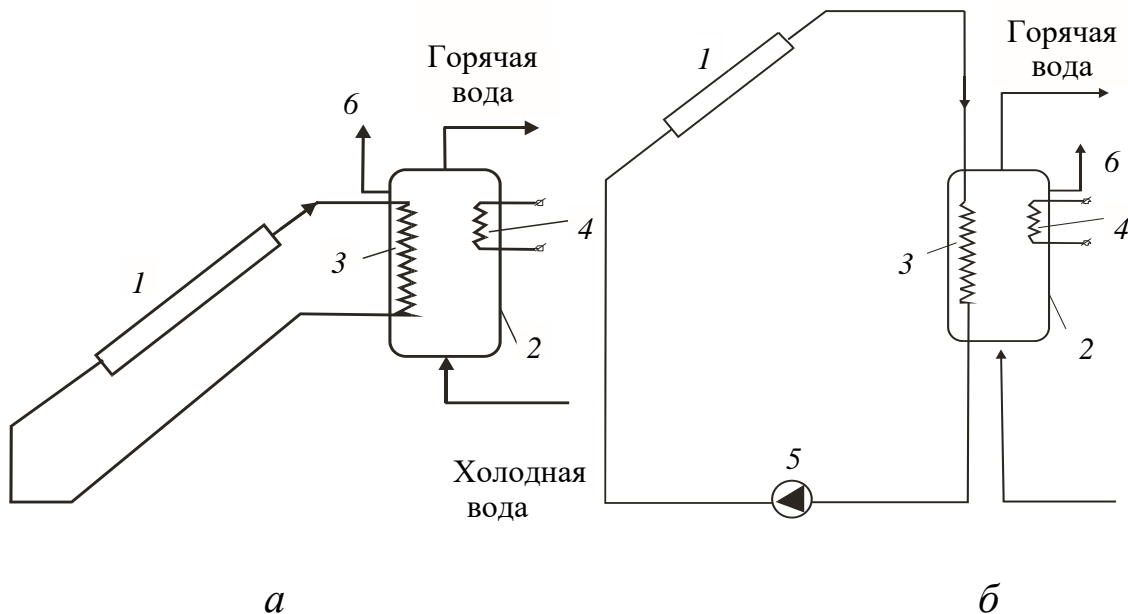


Рис. 4.2. Двухконтурная схема солнечной водонагревательной установки:

а – с естественной циркуляцией теплоносителя;

б – с принудительной циркуляцией теплоносителя;

1 – коллектор солнечной энергии (гелиоколлектор);

2 – аккумулятор тепла; *3* – теплообменник;

4 – резервный (дополнительный) источник энергии; *5* – насос;

6 – предохранительный клапан;

Для предотвращения замерзания теплоносителя в контуре гелиоколлектора может применяться антифриз, при этом ССГВ выполняется по двухконтурной схеме (рис. 4.2), а теплота от антифриза к воде передается с помощью теплообменника 3.

5. Расчет прихода солнечного излучения на наклонную поверхность

Плотность потока солнечной радиации у верхней границы атмосферы на поверхность, расположенную перпендикулярно направлению солнечных лучей, имеет вид $E_{0\perp} = 1,353 \text{ кВт/м}^2$ (солнечная постоянная), а среднее количество энергии, поступающей за 1 ч на 1 м^2 этой поверхности – $H_{0\perp} = 4,871 \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{ч)}$.

В процессе прохождения солнечного излучения через атмосферу имеют место различные виды взаимодействия: отражение, рассеяние (изменение направления распространения в зависимости от длины волны), поглощение (переход энергии солнечного излучения в тепло с последующим излучением света большей длины волны).

В ССГВ обычно используются плоские гелиоколлекторы, устанавливаемые в наклонном положении. Среднемесячное дневное количество суммарной солнечной энергии, $\text{МДж/(м}^2 \cdot \text{день)}$, поступающей на наклонную поверхность гелиоколлектора, имеет вид:

$$E_{\text{н}} = RE, \quad (5.1)$$

где E – среднемесячное дневное количество суммарного солнечного излучения, которое поступает на горизонтальную поверхность, $\text{МДж/(м}^2 \cdot \text{день)}$; R – отношение среднемесячных дневных количеств солнечной радиации, поступающих на наклонную и горизонтальную поверхности.

Для наклонной поверхности с южной ориентацией

$$R = \left(1 - \frac{E^{\text{p}}}{E}\right) R_{\text{пр}} + \frac{1 + \cos\beta}{2} \frac{E^{\text{p}}}{E} + \rho \frac{1 - \cos\beta}{2}, \quad (5.2)$$

где E^{p} – среднемесячное дневное количество диффузной (рассеянной) солнечной энергии, поступающей на горизонтальную поверхность, $\text{МДж/(м}^2 \cdot \text{день)}$; $R_{\text{пр}}$ – коэффициент пересчета прямого излучения с горизонтальной на наклонную поверхность; β – угол наклона гелиоколлектора к горизонту, град; ρ – коэффициент отражения для подстилающей поверхности Земли. Обычно летом $\rho = 0,2$, а зимой при наличии снежного покрова $\rho = 0,7$.

Первый, второй и третий члены этого уравнения представляют соответственно доли прямого излучения, диффузного излучения небосвода и излучения, отраженного от земли на поверхность коллектора. Среднемесячная величина коэффициента $R_{\text{пр}}$ имеет вид

$$R_{\text{пр}} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin \omega'_3 + \frac{\pi}{180} \omega'_3 \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_3 + \sin \varphi \sin \delta \frac{\pi}{180} \omega_3}, \quad (5.3)$$

где φ – ширина местности, град; δ – склонение Солнца, град; ω_3 и ω'_3 – часовой угол захода Солнца на горизонтальной и наклонной поверхностях, град.

Угол склонения Солнца в данный день n :

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284+n}{365} \right). \quad (5.4)$$

На рис. 5.1 показаны основные углы, используемые в приведенных формулах.

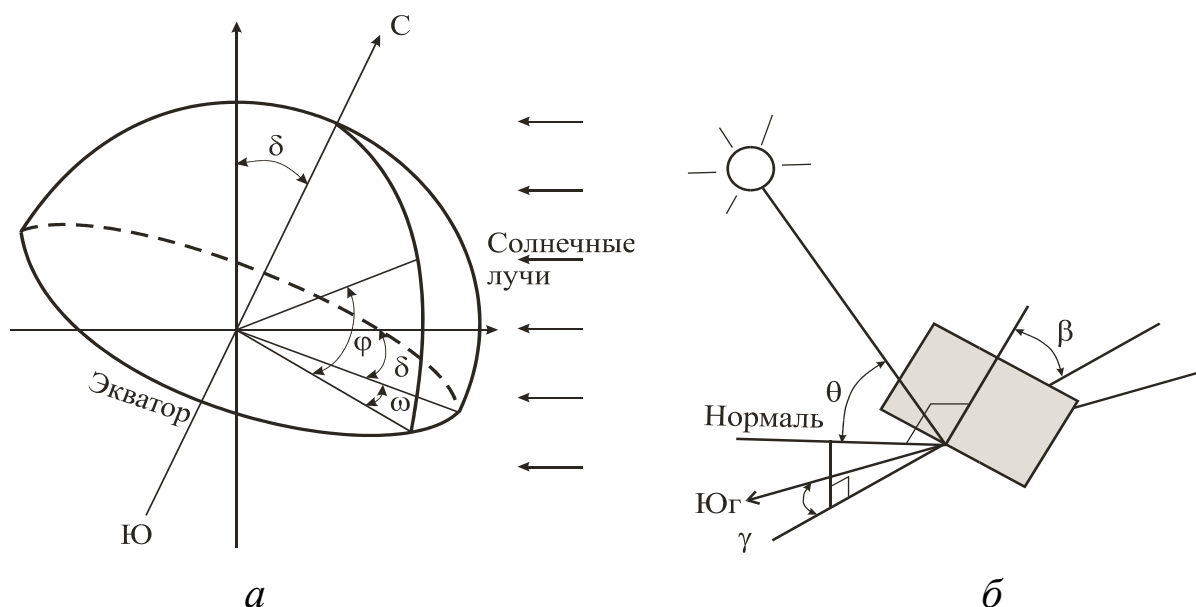


Рис. 5.1. Углы, характеризующие положение точки на земной поверхности (а) и наклонной поверхности коллектора солнечной энергии (б) относительно солнечных лучей: φ – широта местности; ω – часовой угол; δ – склонение Солнца; θ – угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность гелиоколлектора; γ – азимут наклонной поверхности. Для среднего дня I–XII месяцев величина δ имеет вид

Месяцы	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
δ , град	–	–	–	9,4	18,8	23,1	21,2	13,5	2,2	–	–	–
	20,9	13,0	2,4							9,6	18,9	23,0

Часовой угол захода (восхода) Солнца для поверхности:

а) горизонтальной:

$$\omega_3 = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta); \quad (5.5)$$

$$\omega'_3 = \min\{\omega_3, \arccos[-\operatorname{tg}(\varphi - \beta)\operatorname{tg}\delta]\}. \quad (5.6)$$

В качестве ω'_3 принимается меньшая из двух величин, указанных в фигурных скобках.

Значения среднемесячных величин E , E^p и температуры наружного воздуха t_b для различных географических пунктов приведены в приложении 1.

Оптимальная ориентация гелиоколлектора – южная. При отклонении до 30° к востоку или западу от южного направления годовое количество поступающей солнечной энергии уменьшается на 5–10%.

Оптимальный угол наклона гелиоколлектора β соответствует широте местности φ для систем круглогодичного действия, $\beta = \varphi + 15^\circ$ для систем, работающих только в отопительный сезон, и $\beta = \varphi - 15^\circ$ для систем, работающих только в летний период.

Гелиоколлектор можно размещать на наружных ограждениях здания (крыше, стенах, ограждениях балконов и т. п.) или отдельно от него. Теплопроизводительность гелиоколлектора снижается на 2–5% при затенении непрозрачными элементами конструкции и запылении.

6. Общие положения расчета систем солнечного горячего водоснабжения

Цель теплового расчета ССГВ состоит в определении: удельной суточной тепловой производительности системы q_c ; площади S_{Π} лучепоглощающей поверхности гелиоколлектора; объема теплового аккумулятора $V_{ак}$; удельного массового расхода теплоносителя в контуре гелиоколлектора m_k ; угла наклона β гелиоколлектора к горизонту; площади поверхностей нагрева теплообменников в контурах гелиоколлектора и потребителя; годовой степени замещения топлива $f_{год}$ и расхода дополнительной энергии Q_d .

Исходные данные для расчета ССГВ включают:

а) местоположение гелиосистемы – широта, долгота и высота местности над уровнем моря;

б) климатические данные; среднемесячное дневное количество суммарной E и диффузной E_d солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность; температура наружного воздуха $t_{o,c}$;

в) характеристики гелиоколлектора η_0 и k , геометрические размеры модуля гелиоколлектора, число слоев остекления, вид теплоносителя;

г) месячную тепловую нагрузку отопления Q_0 (или данные для ее расчета);

д) значения температур холодной $t_{x,v}$ и горячей $t_{г,v}$ воды;

е) суточное общее потребление горячей воды $V_{г,v}$.

В соответствии с п. 1.1 выбирают тип гелиоколлектора и схему ССГВ. Температура горячей воды в ССГВ должна быть в пределах $45-75^\circ$, кроме случаев, указанных в СНиП.

Системы ССГВ с естественной циркуляцией следует применять при площади гелиоколлектора до 20 м^2 для индивидуальных потребителей. В гелиосистемах ССГВ с большей площадью гелиоколлектора необходимо использовать принудительную циркуляцию теплоносителя.

При естественной циркуляции нагреватель должен находиться ниже накопителя нагретой воды (рис. 5.1), так как циркуляция осуществляется вследствие различия плотностей холодной (плотной) и горячей (менее плотной воды). Такое расположение устройств в системе солнечного теплоснабжения, как правило, затруднительно и поэтому системы с естественной циркуляцией теплоносителя применяют редко.

Перепад давления между столбом горячей и охлажденной воды можно определить по формуле

$$\Delta p = g \int \Delta \rho dz, \quad (6.1)$$

где $\Delta \rho$ – изменение плотности при изменении температуры для геометрической высоты z .

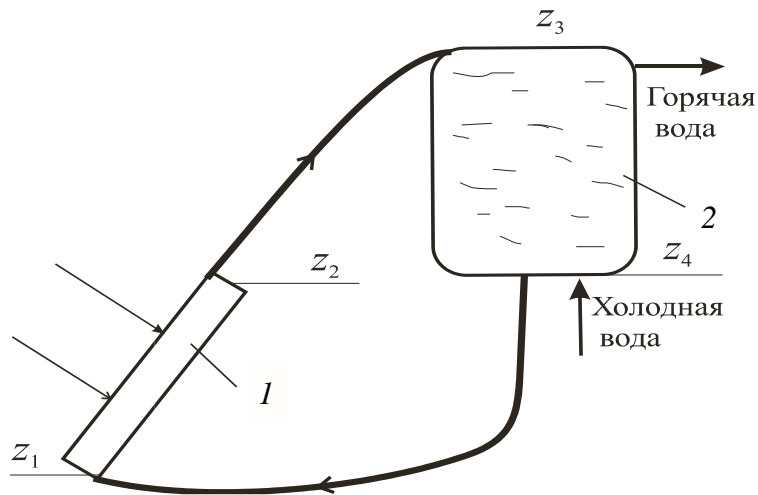


Рис.6.1 Одноконтурная гелиосистема с естественной циркуляцией:
 1 – гелиоприемник; 2 – тепловой аккумулятор

Зависимость изменения плотности $\Delta\rho$ от изменения температуры Δt имеет следующий вид:

$$\frac{\Delta\rho}{\Delta t} = -\beta\rho, \quad (6.2)$$

где β – коэффициент температурного расширения жидкости, который для воды при температурах от 0 до 100°C практически постоянен и равен $3,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/К}$.

Тогда перепад давления можно определить по формуле

$$\Delta = \rho g \beta \Delta \int t dz, \quad (6.3)$$

При условии, что температура в трубопроводах постоянна и равна соответственно t_{Γ} и $t_{\text{В}}$, имеем

$$\Delta p = \frac{\rho g \beta (z_3 - z_1 + z_4 - z_2)(t_{\Gamma} - t_{\text{В}})}{2}, \quad (6.4)$$

где z_3, z_4 – верхняя и нижняя геодезическая точка резервуара соответственно; z_2, z_1 – верхняя и нижняя геодезическая точка приемника соответственно.

Системы с принудительной циркуляцией выгодны, поскольку для их создания можно использовать существующие водонагревательные системы, вводя в них приемник солнечного излучения и насос.

Кроме того, в них нет необходимости располагать накопительную емкость выше приемника. Мощность, потребляемая насосом при принудительной циркуляции, можно определить по следующей формуле:

$$N = \frac{\eta_n G \Delta p}{\rho}, \quad (6.5)$$

где η_n – коэффициент полезного действия насоса; G – массовый расход теплоносителя, кг/с; Δp – потери давления в контуре на трение при прокачке теплоносителя, Па; ρ – средняя плотность теплоносителя, кг/м³.

Основные потери давления происходят в гелиоколлекторе и составляют 80% от потери давления в системе. Для того чтобы теплоноситель в гелиоколлекторе успевал нагреваться до необходимой температуры (примерно на 4°C), скорость прокачки обеспечивают небольшую (режим ламинарный). Тогда потеря давления в системе определяется по формуле Пуазеля:

$$\Delta p = 1,2 \frac{128 G v l}{d^4 \pi}, \quad (6.6)$$

где l и d – соответственно длина и диаметр канала в гелиоколлекторе, м; v – кинематическая вязкость теплоносителя, м²/с.

При проектировании ССГВ вначале выбирают решение и оборудование ССГВ, затем последовательно выполняют тепловой и гидравлический расчеты.

В отличие от традиционных систем теплоснабжения, при проектировании которых для выбора оборудования достаточно определить часовые расходы теплоты, при расчете ССГВ необходимо вычислять месячные расходы теплоты. Расход теплоты, кДж, на горячее водоснабжение в данном месяце выражается следующим образом:

$$Q_{г.в} = Q_{г.в}^{сут} N n_d = c_v V_{г.в} (t_{г.в} - t_{х.в}) N n_d, \quad (6.7)$$

где $V_{г.в}$ – суточный расход горячей воды на 1 человека по нормам, м³/(день · чел.); N – число жителей, чел.; n_d – число дней в данном месяце, дни; c_v – теплоемкость воды, Дж/(кг · °С); $t_{г.в}$ и $t_{х.в}$ – температуры горячей и холодной воды, °С (значения $t_{х.в}$ и n_d

изменяются по месяцам, а остальные величины постоянные); $Q_{Г.В.}^{сут}$ – суточный расход теплоты на горячее водоснабжение, Дж.

Средний график потребления горячей воды в течение суток показан на рис. 6.2.

При проектировании гелиосистем теплоснабжения необходимо исходить из того, что экономически целесообразно покрывать за счет солнечной энергии лишь определенную долю $f_{год}$ годовой тепловой нагрузки $Q_{Н}^{год}$ горячего водоснабжения, остальную часть тепловой нагрузки должен обеспечивать дополнительный источник энергии:

$$Q_{д} = (1 - f_{год}) Q_{Н}^{год}. \quad (6.8)$$

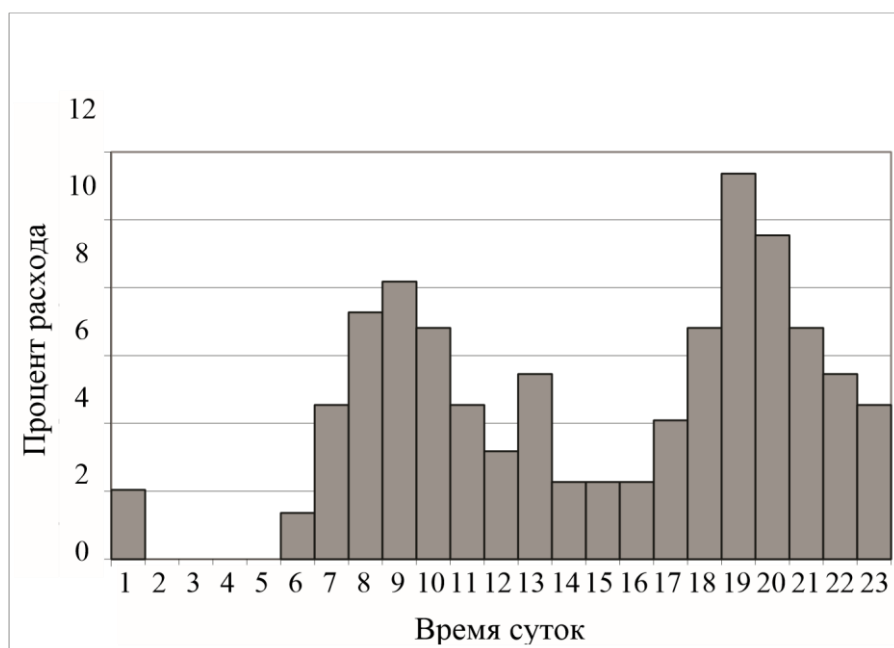


Рис. 6.2. Средний график потребления горячей воды в течение суток

Годовая доля солнечной энергии в покрытии тепловой нагрузки (или степень замещения топлива):

$$f_{год} = \frac{\sum Q_{к}^M}{\sum Q_{Н}^M} = \frac{\sum f Q_{Н}^M}{\sum Q_{Н}^M}. \quad (6.9)$$

Месячная степень замещения топлива

$$f = \frac{Q_{с}^M}{Q_{Н}^M} = \frac{Q_{Н}^M - Q_{д}^M}{Q_{Н}^M} = 1 - \frac{Q_{д}^M}{Q_{Н}^M}, \quad (6.10)$$

где Q_n^M , Q_c^M и Q_d^M – месячные величины тепловой нагрузки, теплоты, обеспечиваемой солнечной и дополнительной энергией, ГДж/мес.

Удельный объемный расход теплоносителя V_k для жидкостных гелиоколлекторов следует принимать как $V_k = 0,01–0,02$ л/(м² · с), удельный объем водяного аккумулятора теплоты $V_{ак} = (0,06–0,08) S_{п}$, м³.

Годовая экономия топлива, т.у.т., обеспечиваемая использованием солнечной энергии,

$$B = \frac{f_{год} Q_n^{год}}{Q_T \eta_{тг}}, \quad (6.11)$$

где $f_{год}$ – годовая степень замещения; $Q_n^{год}$ – годовая нагрузка теплоснабжения, ГДж/год; Q_T – теплота сгорания топлива, отнесенная к 1 т условного топлива, Дж/кг у.т.; $\eta_{тг}$ – КПД теплогенерирующей установки, равный 0,45 и 0,60 для индивидуальных теплогенераторов на твердом и жидком (газообразном) топливе и 0,6–0,7 и 0,7–0,8 для котельных производительностью 20–100 ГДж/ч и более на твердом и жидком (газообразном) топливе.

7. Осредненный тепловой расчет плоского гелиоколлектора

Проточный гелиоколлектор представляет собой систему, в которой вода протекает по параллельным каналам, охлаждая поверхность поглощающей солнечное излучение панели (рис. 7.1., а).

Основными элементами плоского проточного солнечного коллектора являются: корпус, где расположена лучепоглощающая панель (абсорбер) 1 с каналами для теплоносителя; прозрачная поверхность коллектора; непрозрачная тепловая изоляция 3, снижающая потери в окружающую среду через днище коллектора и его боковые грани.

Суммарный тепловой поток Q , поступающий к теплоносителю, определяется балансом

$$Q = Q_{погл} - Q_{пот}, \quad (7.1)$$

где $Q_{погл}$, $Q_{пот}$ – поглощенный поток и тепловые потери коллектора соответственно.

Поток солнечного излучения, поглощаемый панелью приемника, составляет прямой поток и поток отраженный и возвращенный лучепрозрачной панелью (рис. 7.1, а):

$$Q_{\text{погл}} = \eta_0 S E_{\text{п}} ; \quad (7.2)$$

$$\eta_0 = \tau_{\text{ст}}(1 - \rho_{\text{п}})(1 + (1 - \tau_{\text{ст}})\rho_{\text{п}}), \quad (7.3)$$

где η_0 – оптический КПД, учитывающий потери гелиоколлектором на отражение солнечного излучения и его поглощение прозрачным покрытием; $S_{\text{п}}$ – площадь освещенной поверхности, м²; E – плотность солнечного потока, Вт/м²; $\tau_{\text{ст}}$ – коэффициент пропускания лучепрозрачной панели (0,8–0,9); $\rho_{\text{п}}$ – коэффициент отражения теплопоглощающей панели.

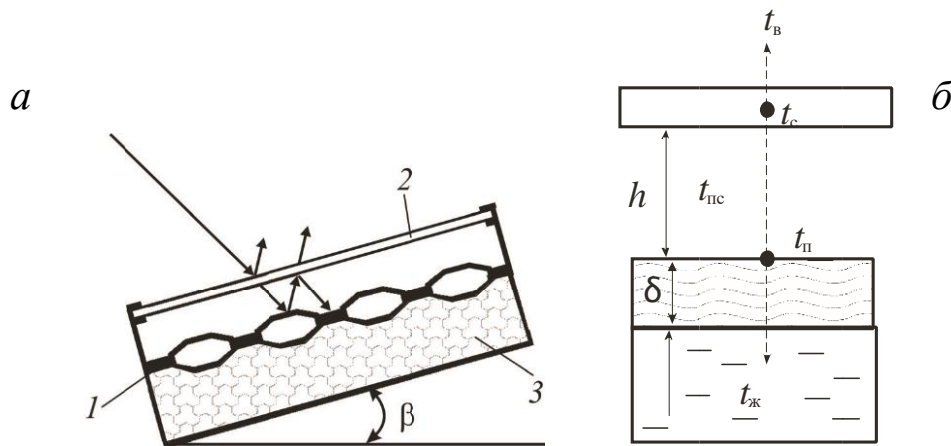


Рис.7.1. Конструкция и распределение солнечных лучей (а) и теплового потока (б) в плоском гелиоколлекторе:

1 – лучепоглощающая панель; 2 – остекление; 3 – теплоизоляция

В процессе поглощения температура приемной поверхности $t_{\text{п}}$ повышается (рис. 7.1, б). Превышение температуры поглощающей панели над температурой окружающей среды $t_{\text{в}}$ приводит к потере тепла от приемника

$$Q_{\text{пот}} = k_{\text{пот}} (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) S_{\text{п}} ;$$

$$k_{\text{пот}} = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{пс}}^{\text{к}} + \alpha_{\text{пс}}^{\text{р}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{в}}^{\text{к}} + \alpha_{\text{в}}^{\text{р}}} \right)^{-1}, \quad (7.4)$$

где $k_{\text{пот}}$ – эффективный коэффициент теплопотерь гелиоколлектора, Вт/(м²·К); $\alpha_{\text{пс}}^{\text{к}}$, $\alpha_{\text{пс}}^{\text{р}}$ – коэффициент конвективного теплообмена и теплообмена излучением между двумя наклонными параллельными поглощающей и прозрачной панелями, Вт/(м²·К); $\delta_{\text{ст}}$, $\lambda_{\text{ст}}$ – толщина и теплопроводность лучепрозрачной поверхности; $\alpha_{\text{в}}^{\text{к}}$, $\alpha_{\text{в}}^{\text{р}}$ – коэффициенты теплоотдачи от прозрачной панели к окружающей среде излучением и конвекцией, Вт/(м²·К).

Потери от верхней поглощающей поверхности коллектора обусловлены излучением и конвекцией между поглощающей и прозрачной пластинами. Потери энергии стеклянным покрытием в окружающую среду конвекцией равны количеству энергии, переносимой от пластины с температурой $t_{\text{п}}$ к стеклянному покрытию с температурой $t_{\text{с}}$:

$$\alpha_{\text{пс}}^{\text{к}} = \frac{\lambda}{h} (0,060 - 0,00019\beta) Gr^{0,333}, \quad (7.5)$$

где β – угол наклона гелиоприемника к горизонту, град;

$$Gr = \frac{1 / (273 + t_{\text{пс}}) g \Delta t h^3}{\nu_{\text{пс}}^2} \text{ – число Грасгофа; } t_{\text{пс}} = (t_{\text{п}} + t_{\text{с}}) / 2 \text{ – средняя}$$

температура среды в канале между поглощающей и прозрачной панелями, °С; h – расстояние между панелями, м; $\nu_{\text{пс}}$ – коэффициент кинематической вязкости среды при температуре $t_{\text{пс}}$, м²/с; $\Delta = t_{\text{п}} - t_{\text{с}}$ – разность средних температур поглощающей и прозрачной панели, °С.

После постановки зависимостей теплофизических свойств воздуха от температуры формула для определения коэффициента теплоотдачи от поглощающей к лучепрозрачной поверхности упрощается:

$$\alpha_{\text{пс}}^{\text{к}} = (0,060 - 0,00019\beta)(14,065 - 0,0248t_{\text{пс}})\Delta t^{0,333} \quad (7.6)$$

Радиационный коэффициент теплопередачи от пластины с температурой $t_{\text{п}}$ к стеклянному покрытию с температурой $t_{\text{с}}$ можно определить из уравнения:

$$\alpha_{\text{пс}}^{\text{р}} = \frac{\sigma}{(t_{\text{п}} - t_{\text{с}})(1/\epsilon_{\text{п}} + 1/\epsilon_{\text{с}} - 1)} \left(\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 \right), \quad (7.7)$$

где $\varepsilon_{\text{п}}$ и $\varepsilon_{\text{с}}$ – степень черноты пластины и стеклянного покрытия соответственно.

Коэффициент теплоотдачи для вынужденной конвекции от лучепрозрачной поверхности к окружающей среде:

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{к}} = 5,7 + 3,8\nu, \quad (7.8)$$

где ν – скорость наружного воздуха, обдувающего гелиоколлектор, м/с.

Коэффициент теплоотдачи для свободной конвекции от лучепрозрачной поверхности к окружающей среде:

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{к}} = (2,26 - 0,0067\beta)(t_{\text{с}} - t_{\text{в}})^{0,33} \quad (7.9)$$

Радиационный коэффициент теплопередачи стеклянного покрытия с температурой $t_{\text{с}}$ учитывает теплообмен излучением с небосводом при определенной температуре, которую будем считать температурой воздуха $t_{\text{в}}$. При этом выражение для коэффициента теплопередачи излучением имеет вид

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{р}} = \frac{\sigma\varepsilon_{\text{с}}}{(t_{\text{с}} - t_{\text{в}})} \left[\left(\frac{T_{\text{с}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{в}}}{100} \right)^4 \right]. \quad (7.10)$$

Полезный тепловой поток, поступающий к теплоносителю, определяется через уравнение теплопередачи

$$Q = k(t_{\text{п}} - t_{\text{ж}})S_{\text{п}}', \quad (7.11)$$

где k – коэффициент теплопередачи от внешней поверхности поглощающей панели к энергоносителю, Вт/(м²·°C); $t_{\text{ж}} = (t_{\text{ж}1} + t_{\text{ж}2})/2$ – средняя температура теплоносителя, °C; $t_{\text{ж}1}$, $t_{\text{ж}2}$ – температура вытекающей в приемник и вытекающей из него жидкости, °C; $S_{\text{п}}'$ – площадь внутренней поверхности поглощающей панели, м².

Коэффициент теплоотдачи от поглощающей панели к теплоносителю для ламинарного режима:

$$\alpha_{\text{п}} = \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d_{\text{экв}}} 0,15 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,33} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{п}}} \right)^{0,25}, \quad (7.12)$$

где $\lambda_{\text{ж}}$ – коэффициент теплопроводности теплоносителя, Вт/(м · К); $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр канала, по которому течет теплоноситель, м; $\text{Re}_{\text{ж}} = (d_{\text{экв}} \nu_{\text{ж}})^{\nu} \nu_{\text{ж}}$ – число Рейнольдса; $\text{Pr}_{\text{ж}}$, $\text{Pr}_{\text{п}}$ – число для теплоносителя, определяемое по средней температуре теплоносителя $t_{\text{ж}}$ и пластины $t_{\text{п}}$; $\nu_{\text{ж}}$ – средняя скорость движения

жидкости в канале, м/с; $\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости теплоносителя, м²/с.

Полезный тепловой поток Q можно также определить через тепло, поглощенное теплоносителем. При нагревании протекающей

$$Q = G c_{ж} (t_{ж2} - t_{ж1}), \quad (7.13)$$

жидкости

где G – расход протекающей жидкости, кг/с; $c_{ж}$ – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг · °С).

Максимальная температура теплоносителя, достигаемая в гелиоколлекторе, определяется из условия $Q_{\text{погл}} = Q_{\text{пот}}$.

Тогда

$$\eta_0 S_{\Pi} E = (t_{\text{max}} - t_{\text{в}}) k_{\text{пот}}^{\text{max}} S_{\Pi}. \quad (7.14)$$

Откуда находим максимальную температуру теплоносителя, °С:

$$t_{\text{max}} = \frac{\eta_0 E}{k_{\text{пот}}^{\text{max}}} + t_{\text{в}}. \quad (7.15)$$

КПД гелиоколлектора определяется по формуле

$$\eta = \frac{Q}{S_{\Pi} E} = \eta_0 - k_{\text{пот}} \frac{t_{\Pi} - t_{\text{в}}}{E}, \quad (7.16)$$

где η_0 – оптический КПД, учитывающий потери гелиоколлектором на отражение солнечного излучения и его поглощение прозрачным покрытием (0,78–0,85); $k_{\text{пот}}$ – коэффициент тепловых потерь, Вт/(м² · °С).

Выразим трудно-измеряемый параметр t_{Π} из теплового баланса гелиоколлектора:

$$\begin{aligned} \eta_0 S_{\Pi} E &= k_{\text{пот}} (t_{\Pi} - t_{\text{в}}) S_{\Pi} + k (t_{\Pi} - t_{ж}) S'_{\Pi}; \\ t_{\Pi} &= \frac{\eta_0 S_{\Pi} E + k_{\text{пот}} t_{\text{в}} S_{\Pi} + k t_{ж} S'_{\Pi}}{k_{\text{пот}} S_{\Pi} + k S'_{\Pi}}. \end{aligned} \quad (7.17)$$

Тогда формула для определения КПД гелиоколлектора примет следующий вид:

$$\eta = \frac{Q}{S_{\Pi} E} = \left(\eta_0 - k_{\text{пот}} \frac{(t_{ж} - t_{\text{в}})}{E} \right) A, \quad (7.18)$$

$$\text{где } A = \frac{k S'_{\Pi}}{k_{\text{пот}} S_{\Pi} + k S'_{\Pi}}.$$

A – коэффициент, характеризующий удельную величину коэффициента теплопередачи $k_{\text{пот}}$ от поглощающей поверхности к окружающей среде к коэффициенту теплопередачи k от поглощающей поверхности к теплоносителю. Для современных гелиоколлекторов $k \gg k_{\text{пот}}$ и если $S_{\text{п}} = S_{\text{п}}'$, то параметр $A \rightarrow 1$ и в формуле КПД может не учитываться.

Выразим неопределенный параметр $t_{\text{ж}2}$ из теплового баланса гелиоколлектора:

$$Gc_{\text{ж}}(t_{\text{ж}2} - t_{\text{ж}1}) = k \left(t_{\text{п}} - \frac{t_{\text{ж}2} + t_{\text{ж}1}}{2} \right) S_{\text{п}}'; \quad (7.19)$$

$$t_{\text{ж}2} = \frac{\eta_0 S_{\text{п}} EA + k_{\text{пот}} S_{\text{п}} A (t_{\text{в}} - t_{\text{ж}1} / 2) + Gc_{\text{ж}} t_{\text{нач}}}{k_{\text{пот}} S_{\text{п}} A / 2 + Gc_{\text{ж}}}. \quad (7.20)$$

Тогда формула для определения КПД гелиоколлектора примет следующий вид:

$$\eta = \frac{Q}{S_{\text{п}} E} = \left(\eta_0 - k_{\text{пот}} \frac{(t_{\text{ж}1} - t_{\text{в}})}{E} \right) \frac{A}{1 + k_{\text{пот}} AS_{\text{п}} / 2Gc_{\text{ж}}}. \quad (7.21)$$

Характеристика гелиоколлектора – зависимость η от $(t_{\text{ж}} - t_{\text{в}})/E$ – определяется при его испытании и изображается прямой с нулевой ординатой, равной оптическому КПД при нормальном падении лучей η_0 , а тангенс угла наклона прямой дает величину $k_{\text{пот}}$. Эффективный оптический КПД для гелиоколлектора с южной ориентацией $\eta_{\text{э}} = 0,95\eta_0$ при однослойном остеклении и $\eta_{\text{э}} = 0,93\eta_0$ при двухслойном остеклении.

КПД гелиоколлектора равен нулю в том случае, если плотность потока солнечной энергии E меньше критического значения:

$$E_{\text{кр}} = \frac{k_{\text{пот}}}{\eta_0} (t_{\text{ж}1} - t_{\text{в}}). \quad (7.22)$$

Средняя величина КПД гелиоколлектора за определенный период времени (день, месяц, год) имеет вид

$$\eta_{\text{ср}} = \frac{\sum(\eta E)}{E_{\text{ср}}}. \quad (7.23)$$

Суммирование производится только для тех отрезков времени, когда $E > E_{\text{кр}}$, где $E_{\text{ср}}$ – средняя плотность потока солнечной энергии для рассматриваемого периода, Вт/м².

В таблица.7.1 приведены значения максимальной температуры теплоносителей t_{\max} , оптического КПД η_0 , коэффициента теплотерь $k_{\text{пот}}$ основных типов гелиоколлекторов.

Таблица.7.1

Основные технические данные различных типов гелиоколлекторов

Тип гелиоколлектора	t_{\max} , °C	η_0	$k_{\text{пот}}$, Вт/(м ² · К)
Неселективный плоский: с однослойным остеклением с двухслойным остеклением без остекления	80	0,70–	7–10
		0,85	4–6
		0,65–	18–22
		0,80	
		0,90–	
		0,95	
Селективный плоский: с однослойным остеклением с двухслойным остеклением	100	0,65–	
		0,80	
		0,60–	4,5–6,0
		0,75	3–4
Фоклин (коэффициент концентрации 1,5)	120	0,60	0,7–0,8
Параболоцилиндрический концентратор	300	0,65– 0,85	0,6–0,9
Вакуумированный стеклянный трубчатый	120–	0,50–	1–2
	250	0,75	

Эффективность поглощающей поверхности определяется ее конструкцией. Поскольку поглощающая панель выполняет две функции: поглощает солнечное излучение и передает тепло теплоносителю, то конструкция поглощающей панели влияет на коэффициент тепловых потерь $k_{\text{пот}}$ и на коэффициент теплоотдачи тепла от панели к теплоносителю $\alpha_{\text{п}}$. Однако методика расчета коэффициента тепловых потерь $k_{\text{пот}}$ для различных конструкций поглощающих панелей принципиально не меняется – достаточно только правильно выразить следующие параметры k , $S_{\text{п}}$, $S_{\text{п}}'$, A , $d_{\text{экв}}$ и воспользоваться выше представленными формулами.

Рассмотрим тепловой расчет для коллекторов с двумя распространенными конструкциями поглощающих панелей типа «пластина» и «пластина – труба».

Для простейшей конструкции поглощающей панели в виде пластины (см. рис. 7.1., б)

$$\begin{aligned}
 k &= \left(\frac{\delta_{\text{п}}}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{п}}} \right)^{-1}; \\
 S_{\text{п}} &= S'_{\text{п}} = BL; \\
 A &= \frac{1/k_{\text{пот}}}{1/\alpha_{\text{п}} + \delta_{\text{п}}/\lambda_{\text{п}} + 1/k_{\text{пот}}}; \\
 d_{\text{экв}} &= 2h_{\text{ж}};
 \end{aligned} \tag{7.24}$$

для панели «пластина – труба» (рис. 7.2)

$$\begin{aligned}
 k &= \frac{Ln}{S'_{\text{п}}} \left(\frac{1}{\pi d_{\text{вн}} \alpha_{\text{п}}} + \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{тр}}} \ln \left(\frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} \right) \right)^{-1}; \\
 S_{\text{п}} &= Ln((s - d_{\text{н}})F + d_{\text{н}}); \\
 S'_{\text{п}} &= \frac{Ln\pi(d_{\text{н}} + d_{\text{вн}})}{2}; \\
 A &= \left(k_{\text{пот}} \left[\frac{1}{\pi d_{\text{вн}} \alpha_{\text{п}}} + \frac{1}{2\pi \lambda_{\text{тр}}} \ln \left(\frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{вн}}} \right) \right] [(s - d_{\text{н}})F + d_{\text{н}}] + 1 \right)^{-1}; \\
 F &= \frac{\text{th} \left(\sqrt{k_{\text{пот}} / (\delta \lambda_{\text{п}})} (s - d_{\text{н}}) / 2 \right)}{\sqrt{k_{\text{пот}} / (\delta \lambda_{\text{п}})} (s - d_{\text{н}}) / 2}; \\
 d_{\text{экв}} &= d_{\text{вн}},
 \end{aligned} \tag{7.26}$$

где L – длина панели и трубы, м; B – ширина панели, м; $d_{\text{вн}}$, $d_{\text{н}}$ – внутренний и наружный диаметры трубы соответственно, м; δ – толщина стенки пластины, м; $s = B / n$ – расстояние между осями труб, м; n – количество труб; $\lambda_{\text{тр}}$, $\lambda_{\text{п}}$ – коэффициенты теплопроводности материала трубы и пластины соответственно, Вт/(м · К); F – коэффициент энергетической эффективности прямого ребра прямоугольного профиля, толщиной δ .

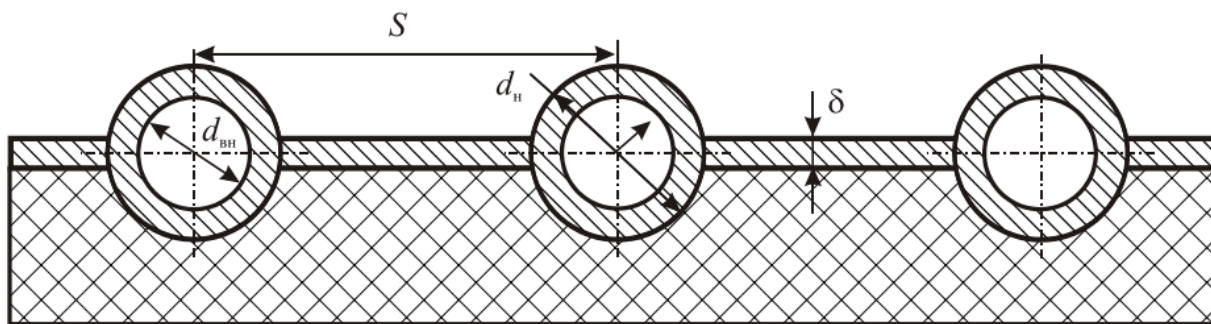


Рис.7.2. Конструкция плоского гелиоколлектора «пластина-труба»

Тогда

$$Q = Q_{\text{погл}} - Q_{\text{пот}} = \eta_0 S_{\text{п}} E - k_{\text{пот}} (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) S_{\text{п}} ;$$

$$Q = AS_{\text{п}} (\eta_0 E - k_{\text{пот}} (t_{\text{ж}} - t_{\text{в}})) . \quad (7.27)$$

Представленный осредненный тепловой расчет позволяет оценить влияние климатических условий и параметров конструкции гелиоколлектора на его энергетическую эффективность. Однако в данной методике не учитывается неравномерность потребления горячей воды жителями дома и взаимодействие гелиоколлектора с баком аккумулятором. Для точной оценки параметров ССГВ необходимо использовать другие более достоверные методы расчета.

8. Полуэмпирический тепловой расчет солнечной системы горячего водоснабжения

Точный тепловой расчет ССГВ затрудняется из-за влияния случайных колебаний климатических условий и сложного характера взаимодействия между элементами системы. Поэтому в инженерной практике обычно используются полуэмпирические методы, которые основаны на обобщении результатов подробного моделирования ССГВ с помощью ЭВМ и дают возможность получить долгосрочные характеристики ССГВ.

Энергетический баланс системы солнечного теплоснабжения за месячный период времени можно представить в виде

$$Q_{\text{к}} - Q_{\text{г.в}} + E = \Delta U, \quad (8.1)$$

где $Q_{\text{к}}$ – месячная теплопроизводительность солнечной установки, Дж/мес.; $Q_{\text{г.в}}$ – месячная нагрузка горячего водоснабжения, Дж/мес.; E – общее количество энергии, полученное в течение месяца от дублирующего источника, Дж/мес.; ΔU – изменение количества энергии в аккумулирующей установке, Дж/мес.

При размерах аккумуляторов, обычно применяемых в ССВГ, разность ΔU мала по сравнению с Q_k , $Q_{г.в}$ и E и может быть принята равной нулю. Тогда уравнение (8.1) можно переписать в виде

$$f = \frac{(Q_{г.в} - E)}{Q_{г.в}} = \frac{Q_k}{Q_{г.в}}, \quad (8.2)$$

где f – доля месячной тепловой нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии.

Непосредственно уравнение (8.2) нельзя использовать для расчета f , поскольку величина Q_k является сложной функцией падающего излучения, температуры окружающей среды и тепловых нагрузок. Однако рассмотрение параметров, от которых зависит Q_k , позволяет предположить, что коэффициент замещения f эмпирически можно связать с двумя безразмерными комплексами:

$$X = \frac{AS_{п} k_{пот} (t_A - t_B) T_d}{Q_{г.в}}; \quad (8.3)$$

$$Y = \frac{AS_{п} \eta_0 E_{н} n_d}{Q_{г.в}}, \quad (8.4)$$

где T_d – продолжительность месяца, с; t_A – базисная температура, принятая равной 100°C ; t_B – среднемесячная температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$; $E_{н}$ – среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность коллектора, $\text{Дж}/(\text{м}^2 \cdot \text{день})$; n_d – число дней в месяце.

Безразмерные комплексы X и Y имеют определенный физический смысл: Y можно трактовать как отношение количества энергии, поглощаемой пластиной коллектора в течение месяца, к полной тепловой нагрузке; X – отношение месячных тепловых потерь коллектора при базисной температуре к полной месячной тепловой нагрузке.

Рассмотрим метод расчета характеристик системы солнечного теплоснабжения для условий, когда нагрузка горячего водоснабжения является преобладающей или единственной. Как температура водопроводной воды $t_{х.в}$, так и минимально допустимая температура горячей воды $t_{г.в}$, влияют на характеристики системы. Поскольку средняя рабочая температура в системе, а следовательно, и потери тепла от коллектора зависят от $t_{х.в}$ и $t_{г.в}$, разумно предположить, что выражение комплекса X , характеризующего потери тепла от

коллектора, можно скорректировать таким образом, чтобы учесть влияние $t_{x.в}$ и $t_{г.в}$. Если месячные значения X умножить на поправочный коэффициент, определяемый ниже приведенным выражением, то f -метод расчета жидкостных систем солнечного отопления и горячего водоснабжения можно использовать для определения месячных значений f , достигаемых в системах солнечного горячего водоснабжения. Уточненное значение комплекса можно определить по формуле

$$X_c = X \frac{11,6 + 1,18t_{г.в} + 3,86t_{x.в} - 2,32t_{в}}{100 - t_{в}} \quad (8.5)$$

Рассматриваются системы солнечного горячего водоснабжения, в которых вместимость бака-аккумулятора составляет 75 л/м^2 . Предполагается, что потребление горячей воды осуществляется по графику, показанному на рис. 6.2. Оба этих условия являются базовыми в f -методе расчета. При вместимости аккумулятора 75 л/м^2 распределение тепловой нагрузки в течение дня не оказывает сильного влияния на характеристики системы солнечного нагрева воды. Однако фактическое распределение нагрузки горячего водоснабжения может сильно отличаться от среднего распределения. Если большая часть горячей воды ежедневно потребляется в течение короткого промежутка времени, то доля нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии, может быть ниже значений, получаемых при использовании рассмотренного здесь метода расчета. В этом случае увеличение размеров аккумулятора будет более эффективно, а уточненное значение комплекса при $37,5 < M < 300$ следует вычислить по формуле

$$X_c = X \left(\frac{M}{75} \right)^{-0,25}, \quad (8.6)$$

где M – удельное количество воды в аккумуляторе, л/м^2 .

Чтобы определить долю f полной месячной тепловой нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии, необходимо рассчитать комплексы X и Y для рассматриваемого коллектора и данной месячной тепловой нагрузки.

Зависимость между X , Y и f можно аппроксимировать следующим уравнением:

$$f = 1,029 Y - 0,065 X_c - 0,245 Y^2 + 0,0018 X_c^2 + 0,0215 Y^3,$$

где $0 < Y < 3$ и $0 < X < 18$.

Месячное количество солнечного тепла находится умножением f на месячную нагрузку $Q_{г.в}$. Доля годовой тепловой нагрузки, покрываемой за счет солнечной энергии, равна сумме месячных количеств солнечного тепла, деленной на полную годовую нагрузку.

9. Методика расчета курсовой работы

Бланк задания на проектирование (приложение 2) заполняется студентом согласно нижеследующим рекомендациям и представляется преподавателю для согласования. Система солнечного нагрева воды для бытовых нужд будет установлена на доме, расположенном на широте φ° с.ш. Коллектор для нагрева жидкости используют в системе солнечного теплоснабжения дома, причем система должна обеспечить нагрев воды для семьи из N человек, каждый из которых ежедневно расходует $V_{г.в} = 20$ л воды в сутки при температуре $t_{г.в} = 55^\circ\text{C}$. Температура водопроводной воды в данном городе составляет $t_{х.в}$, $^\circ\text{C}$. Коллекторы устанавливаются под углом $\beta = \varphi - 15^\circ$ к горизонту и ориентируются строго на юг. Объем воды в баке-аккумуляторе равен 75 л/м^2 . Рассчитать долю тепловой нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии, при площади коллектора, приходящейся на одного члена семьи, 1 и 2 м^2 .

Для среднего дня каждого месяца рассчитывают количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность гелиоколлектора, для чего определяют угол склонения Солнца δ по формуле (1.4), часовые углы захода Солнца для горизонтальной ω_3 и наклонной ω'_3 поверхностей по формулам (1.5) и (1.6), среднемесячные коэффициенты пересчета солнечной радиации $R_{пр}$ и R по формулам (1.2) и (1.3), среднемесячное количество солнечной энергии E_k , поступающей на поверхность гелиоколлектора, по формуле $E_k = RE$, результаты расчетов представляются в виде таблица. 9.1

Параметры солнечного излучения, поступающего на наклонную поверхность гелиоколлектора

Таблица 9.1

Месяц	E	E_d	δ	ω_3	ω'_3	$R_{пр}$	R	E_k
	МДж/ (м^2 мес.)	МДж/ (м^2 мес.)	град	град	град			МДж/ (м^2 мес.)

Апрель								
Май								
Июнь								
Июль								
Август								
Сентябрь								

Далее следует рассчитать теплопроизводительность гелиоколлектора (1.16–1.30) для каждого месяца, задав определенное значение КПД гелиоколлектора.

Тепловой расчет гелиоколлектора:

1. Задаем КПД гелиоколлектора, например $\eta = 0,6$.
2. Рассчитываем полезную мощность гелиоколлектора, Вт:

$$Q = \eta S_{\text{п}} \bar{E}, \quad (9.1)$$

где $\bar{E} = \frac{E_{\text{к}}}{T n_{\text{д}} 3600}$ – удельная плотность солнечного излучения, Вт/м²;

$E_{\text{к}}$ – месячное количество суммарной солнечной энергии, Дж/(м² · мес.), поступающей на наклонную поверхность гелиоколлектора; T – среднемесячная продолжительность солнечного дня в данном месяце, ч; $n_{\text{д}}$ – количество дней в данном месяце.

$$T = \frac{2}{15} \arccos(-\text{tg}\varphi \text{tg}\delta). \quad (9.2)$$

3. Расход жидкости через гелиоколлектор, кг/с:

$$G = \frac{Q}{c_{\text{ж}}(t_{\text{ж}2} - t_{\text{ж}1})}. \quad (9.3)$$

4. Скорость теплоносителя в канале, м/с

$$v = \frac{G}{(Bh\rho)}, \quad (9.4)$$

где $B = S_{\text{п}} / L$.

5. Определяем коэффициент теплопередачи от поглощающей панели к теплоносителю, Вт/(м² · °С):

$$k = \left(\frac{\delta_{\text{п}}}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{п}}} \right)^{-1}, \quad (9.5)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ определяется по формуле (1.27), $Re = \frac{d_{\text{ЭКВ}} v}{\nu_{\text{ВОДЫ}}}$, $d_{\text{ЭКВ}} = 2h_{\text{ж}}$.

6. Находим температуру поглощающей панели, °С:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{ж}} + \frac{Q}{kS_{\text{п}}}. \quad (9.6)$$

7. Задаемся температурой стекла, между температурой панели $t_{\text{п}}$ и температурой окружающей воздуха $t_{\text{в}}$, например $t_{\text{с}} = 25^{\circ}\text{С}$.

8. Определяем эффективный коэффициент теплопотерь гелиоколлектора $k_{\text{ПОТ}}$ по формуле (1.19).

9. Рассчитываем действительную температуру остекления по следующей формуле, °С:

$$t_{\text{с}} = t_{\text{в}} + (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) \frac{k_{\text{ПОТ}}}{\alpha_{\text{в}}^{\text{к}} + \alpha_{\text{в}}^{\text{п}}}. \quad (9.7)$$

Если разбежка между принятой и рассчитанной температурой составляет более 1%, то возвращаемся к п. 8, иначе – продолжаем расчет.

10. Определяем коэффициент эффективности:

$$A = \frac{1/k_{\text{ПОТ}}}{1/k + 1/k_{\text{ПОТ}}}. \quad (9.8)$$

Рассчитываем действительный КПД гелиоколлектора:

$$\eta = \left(\eta_0 - k_{\text{ПОТ}} \frac{(t_{\text{ж}} - t_{\text{в}})}{\bar{E}} \right) A. \quad (9.9)$$

Если разница между принятым и рассчитанным КПД составляет более 1%, то возвращаемся к п. 1, иначе – расчет закончен.

11. Определяем месячную теплопроизводительность гелиоколлектора, Дж/мес.:

$$Q_{\text{к}} = \eta S_{\text{п}} E_{\text{н}}. \quad (9.10)$$

Заносим данные в таблица. 9.2

Таблица 9.2 Параметры гелиоколлектора

Месяц	Q	T	v	k	$k_{\text{ПОТ}}$	A	η	$Q_{\text{к}}$
	Вт	ч	м/с	Вт/(м ² · °С)	Вт/(м ² · °С)			Дж/мес.
Площадь гелиоколлектора $S_{\text{п}} = 1 \text{ м}^2/\text{чел.}$								

Продолжение таблица №9.2

Апрель								
Май								
Июнь								
Июль								
Август								
Сентябрь								
Площадь гелиоколлектора $S_{\Pi} = 2 \text{ м}^2/\text{чел.}$								
Апрель								
Май								
Июнь								
Июль								
Август								
Сентябрь								

Затем необходимо выполнить полуэмпирический расчет гелиоколлектора. Для этого определяем месячные тепловые нагрузки горячего водоснабжения (расчет по формуле (1.10) для соответствующих месяцев года). Доля месячной тепловой нагрузки f , обеспечиваемой за счет солнечной энергии, есть функция безразмерных комплексов X и Y , определяемых выражениями (1.37) и (1.38). Эти комплексы должны рассчитываться для соответствующих месяцев года при каждом заданном значении площади коллектора. Среднемесячный дневной приход радиации на наклонную поверхность $E_{\Pi} = E_{\kappa} / n_{\text{д}}$, где E_{κ} приведен в табл. 1.2.

Для системы горячего водоснабжения значения X / S_{Π} необходимо умножить на поправочный коэффициент, рассчитываемый из выражения (1.39). Заметим, что этот коэффициент зависит от $t_{\text{в}}$ и изменяется от месяца к месяцу. Скорректированные значения X_c / S_{Π} представлены в табл. 9.3

Табл 9.3 Параметры полуэмпирического
расчета гелиоколлектора

Месяц	<i>n</i> _д	$T_{д,с},$ 106	$Q_{г.в.},$ Дж	$100 - t_{в},$ °С	$X_c/S_{п},$ M^{-2}	$E_{н},$ МДж/ ($M^2 \cdot \text{день}$)	$Y/S_{п},$ M^{-2}
Апрель							
Май							
Июнь							
Июль							
Август							
Сентябрь							

Умножая $X_c / S_{п}$ и $Y / S_{п}$ на площадь коллектора, получаем X_c и Y (табл. 9.4). Значения этих комплексов при различной площади коллектора приведены для соответствующих месяцев года. Доля месячной нагрузки f , обеспечиваемой за счет солнечной энергии, определяется в зависимости от X_c и Y с помощью уравнения (9.4). Месячное количество солнечного тепла определяется умножением f на месячную нагрузку горячего водоснабжения. Заносим данные в таблица.9.4

Таблица 9.4 Основные данные солнечной системы горячего водоснабжения

Месяц	Площадь, $M^2/\text{чел.}$									$Q_{г.в.},$ Дж	
	1,0					2,0					
	X_c	Y	f	$f Q_{г.в.},$ $10^9,$ Дж	$Q_{к.},$ $10^9,$ Дж	X_c	Y	f	$f Q_{г.в.},$ $10^9,$ Дж		$Q_{к.},$ $10^9,$ Дж
Апрель											
Май											
Июнь											
Июль											
Август											

Продолжение таблица 9.4

Сентябрь										
Сумма						Сумма				
$f_{\text{год}}$						$f_{\text{год}}$				
B , кг у.т.						B , кг у.т.				

Доля годовой нагрузки $f_{\text{год}}$, обеспечиваемой за счет солнечной энергии, равна отношению сезонного количества солнечного тепла к сезонной тепловой нагрузке (1.12). Результаты расчетов должны быть представлены графически в виде зависимости доли сезонной нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии, от площади коллектора. Затем следует рассчитать сезонную экономию топлива B , кг у.т., обусловленную использованием солнечной энергии, по соотношению.

Средние месячные поступления суммарной E и диффузной E_d солнечной радиации на горизонтальную поверхность, МДж/(м² · мес.), средняя температура наружного воздуха t_b , °С

Параметр	Месяц					
	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
1.Брест, $\varphi = 52,2$						
E	410,3	586,2	653,2	628,1	498,3	360,1
E_d	217,7	297,3	288,9	297,3	242,8	175,9
t_b	7,3	14,2	17,0	18,8	17,6	13,4
2.Гомель, $\varphi = 52,5$						
E	410,3	569,4	628,1	619,7	510,8	339,1
E_d	221,9	280,5	288,9	293,1	242,8	171,7
t_b	6,3	13,7	16,9	18,6	17,4	12,5
3.Минск, $\varphi = 54$						
E	392,3	566,5	629,3	603,3	474,4	311,9
E_d	214,4	278,4	291,0	288,5	236,6	166,2
t_b	5,3	12,6	16,0	17,8	16,2	11,6
4.Витебск, $\varphi = 54,8$						
E	385	548	620	595	461	293
E_d	218	276	293	281	235	163
t_b	5,0	12,6	16,0	18,0	16,3	11,2
5.Гродно, $\varphi = 53,6$						
E	385	540	603	590	469	318
E_d	222	301	314	314	247	176
t_b	6,3	13,0	16,2	18,0	16,8	12,6
6.Могилев, $\varphi = 53,8$						
E	402	553	628	615	494	306
E_d	209	281	293	293	234	164
t_b	5,4	12,9	16,4	18,2	16,6	11,6
7.Слуцк, $\varphi = 53$						
E	396	574	594	579	495	305
E_d	225	288	294	295	249	171
t_b	6,2	13,1	16,1	17,8	16,6	12,1

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет Электроэнергия

Кафедра Альтернативные источники энергии

Специальность 5312400 – Альтернативные источники энергии (по видам)

Специализация Солнечная энергетика

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой «АИЭ»

ТашГТУ

_____ Юлдошев И.А.

« » _____ 2022 г.

З А Д А Н И Е №1
на курсовой проект (работу)

студенту(ке) _____

1. Тема «Расчет системы солнечного теплоснабжения»

2. Срок защиты _____

3. Исходные данные:

- место расположения коллектора солнечной энергии (варианты с 1 по 7, Приложение 1);
- угол наклона коллектора к горизонту $\beta = \varphi - 15^\circ$ для летнего периода (φ -из Приложение 1);
 - суточный расход горячей воды $V_{г.в} = 80$ л/(день · чел.);
 - температура горячей воды $t_{г.в} = 55^\circ\text{C}$;
 - температура холодной воды $t_{х.в} = 18^\circ\text{C}$;

Параметры неселективного плоского с однослойным остеклением гелиоколлектора (эффективный оптический КПД $\eta_{0э} = 0,75$; длина панели и трубы $L = 1,2$ м; высота канала теплоносителя $h_{ж} = 12$ мм; внутренний и наружный диаметры трубы соответственно $d_{вн} = 12$ мм, $d_{н} = 16$ мм; толщина стенки пластины $\delta = 5$ мм; расстояние между осями труб $s = 8$ мм; коэффициенты теплопроводности материала трубы и пластины соответственно $\lambda_{тр} = \lambda_{п} = 220$ Вт/(м² · °С); толщина и теплопроводность лучепрозрачной поверхности $\delta_{ст} = 4$ мм, $\lambda_{ст} = 50$ Вт/(м² · °С); расстояние между лучепрозрачной и поглощающей

панелями $h = 18$ мм; степень черноты пластины и стеклянного покрытия $\varepsilon_n = 0,9$ и $\varepsilon_c = 0,4$).

4. Содержание пояснительной записки курсовой работы (проекта) (перечень вопросов, подлежащих разработке): рассчитать среднемесячное дневное количество солнечной энергии, поступающей на поверхность коллектора; вычислить месячные тепловые нагрузки горячего водоснабжения для потребителя и полный коэффициент тепловых потерь коллектора; определить доли месячной и сезонной нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии при площади коллектора 1 и 2 м²/чел.; установить необходимую площадь коллектора для покрытия всей нагрузки горячего водоснабжения; привести схему системы солнечного теплоснабжения и дать описание ее работы при всех положениях распределительного устройства.

5. Перечень графического (иллюстрационного) материала (с точным указанием обязательных чертежей, графиков и др.): схема системы солнечного теплоснабжения

6. Консультанты (с указанием разделов)

7. Календарный график выполнения работы

8. Дата выдачи задания _____

Руководитель Жураева З.И. _____

Задание принял(а) к исполнению _____

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТФакультет ЭлектроэнергияКафедра Альтернативные источники энергииСпециальность 5312400–Альтернативные источники энергии(по
видами)Специализация Солнечная энергетика

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой «АИЭ»

ТашГТУ

Юлдошев И.А.

« » _____ 2022 г.

З А Д А Н И Е №2
на курсовой проект (работу)

студенту(ке) _____

1. Тема «Расчет солнечной электростанции башенного типа»
2. Срок защиты _____
3. Исходные данные параметров в задании взять из таблицы по вариантам методического указания.

На солнечной электростанции башенного типа установлено n гелиостатов, каждый из которых имеет поверхность F_r м². Коэффициент отражения гелиостата $R_{отр}$. Максимальная облученность зеркала гелиостата E_r . Гелиостаты отражают солнечные лучи на приемник, на поверхности которого зарегистрирована максимальная энергетическая освещенность $E_{пр}$. Коэффициент поглощения приемника $A_{погл}$. Степень черноты приемника $\epsilon_{пр}$. В приемнике нагревается и испаряется рабочее тело (вода) до температуры t_0 . Давление рабочего тела составляет p_0 . Полученный перегретый пар направляется в турбину мощностью $N_э$, работающую по циклу Ренкина. Давление пара за турбиной составляет p_k . Относительный внутренний КПД турбины η_{oi} . Механический КПД $\eta_m=0,975$. КПД электрогенератора $\eta_э=0,985$. Работой насоса, потерями тепла при его транспортировке, собственными нуждами – пренебречь.

4. Содержание пояснительной записки курсовой работы (проекта) (перечень вопросов, подлежащих разработке): нужно определить:

- расход пара на турбину D_0 , кг/с;
- площадь поверхности приемника $F_{пр}$ и тепловые потери в нем $Q_{пот}$, вызванные излучением и конвекцией. Принять, что конвективные потери вдвое меньше потерь от излучения;
- энергию, полученную приемником от солнца через гелиостаты (кВт).

5. Перечень графического (иллюстрационного) материала (с точным указанием обязательных чертежей, графиков и др.): схема солнечной электростанции башенного типа.

6. Консультанты (с указанием разделов)

7. Календарный график выполнения работы _____

8. Дата выдачи задания _____

Руководитель Жураева З.И. _____

Задание принял(а) к исполнению _____

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет Электроэнергия

Кафедра Альтернативные источники энергии

Специальность 5312400–Альтернативные источники энергии(по видам)

Специализация Солнечная энергетика

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой «АИЭ»

ТашГТУ

Юлдошев И.А.

« » _____ 2022 г.

З А Д А Н И Е №3
на курсовой проект
(работу)

студенту(ке) _____

1. Тема «Расчет системы солнечного теплоснабжения здания»
2. Срок защиты _____
3. Исходные данные параметров в задании взять из таблицы по вариантам методического указания.

На крыше здания установлен пластинчатый приемник солнечной энергии проточного типа, который имеет поверхность F , м². Коэффициент использования солнечной энергии $\eta_{пр}$. Облученность приемника E . Приемник освещается солнцем в течение суток $\tau_{осв}$. В приемнике нагревается рабочее тело (вода) от температуры $t_{в1}$ до температуры $t_{в2}$. Вода направляется в систему теплоснабжения здания, тепловой мощностью $Q_{Т.СН}$ и в аккумулятор тепловой энергии.

4. Содержание пояснительной записки курсовой работы (проекта) (перечень вопросов, подлежащих разработке): нужно определить:

- расход воды через приемник $G_{в}$, кг/с
- расходы воды в систему теплоснабжения $G_{Т.СН}$ и в аккумулятор $G_{акк}$, кг/с
- площадь поверхности приемника F , м²
- емкость аккумулятора V , м³

5. Перечень графического (иллюстрационного) материала (с точным указанием обязательных чертежей, графиков и др.):
схема солнечной электростанции башенного типа.

6. Консультанты (с указанием разделов)

7. Календарный график выполнения работы _____

8. Дата выдачи задания _____

Руководитель Жураева З.И. _____

Задание принял(а) к исполнению _____

ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Факультет Электроэнергия

Кафедра Альтернативные источники энергии

Специальность 5312400 – Альтернативные источники энергии (по видам)

Специализация Солнечная энергетика

«УТВЕРЖДАЮ»

Заведующий кафедрой «АИЭ»

ТашГТУ

Юлдошев И.А.

« » _____ 2022 г.

З А Д А Н И Е №4
на курсовой проект
(работу)

студенту(ке) _____

1. Тема «Тепловой расчет системы солнечного горячего водоснабжения (ССГВ)».
2. Срок защиты _____
3. Исходные данные параметров в задании взять из таблицы по вариантам методического указания.

Исходные данные для расчета ССГВ включают:

- а) местоположение гелиосистемы – широта, долгота и высота местности над уровнем моря;
- б) климатические данные; среднемесячное дневное количество суммарной E и диффузной E_d солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность; температура наружного воздуха $t_{o,c}$;
- в) характеристики гелиоколлектора η_0 и k , геометрические размеры модуля гелиоколлектора, число слоев остекления, вид теплоносителя;
- г) месячную тепловую нагрузку отопления Q_0 (или данные для ее расчета);
- д) значения температур холодной $t_{x,v}$ и горячей $t_{г,v}$ воды;
- е) суточное общее потребление горячей воды $V_{г,v}$.

В соответствии с п. 1.1 выбирают тип гелиоколлектора и схему ССГВ. Температура горячей воды в ССГВ должна быть в пределах $45-75^{\circ}$

4. Содержание пояснительной записки курсовой работы (проекта) (перечень вопросов, подлежащих разработке):

Цель теплового расчета ССГВ *в определении следующих параметров:*

удельной суточной тепловой производительности системы q_c ; площади S_{Π} лучепоглощающей поверхности гелиоколлектора; объема теплового аккумулятора $V_{ак}$; удельного массового расхода теплоносителя в контуре гелиоколлектора m_k ; угла наклона β гелиоколлектора к горизонту; площади поверхностей нагрева теплообменников в контурах гелиоколлектора и потребителя; годовой степени замещения топлива $f_{год}$ и расхода дополнительной энергии Q_d .

5. Перечень графического (иллюстрационного) материала (с точным указанием обязательных чертежей, графиков и др.): схема солнечной электростанции башенного типа.

6. Консультанты _____ (с _____ указанием _____ разделов)

7. Календарный график выполнения работы _____

8. Дата выдачи задания _____

Руководитель Жураева З.И. _____
Задание принял(а) к исполнению _____

**Состав и технологическая схема солнечных электростанции
башенного типа**

В состав СЭС входят: оптическая система, осуществляющая предварительную концентрацию потока солнечного излучения; приемник излучения, в котором энергия излучения преобразуется в тепловую и передается теплоносителю, и теплосиловая система, осуществляющая преобразование тепловой энергии в электрическую.

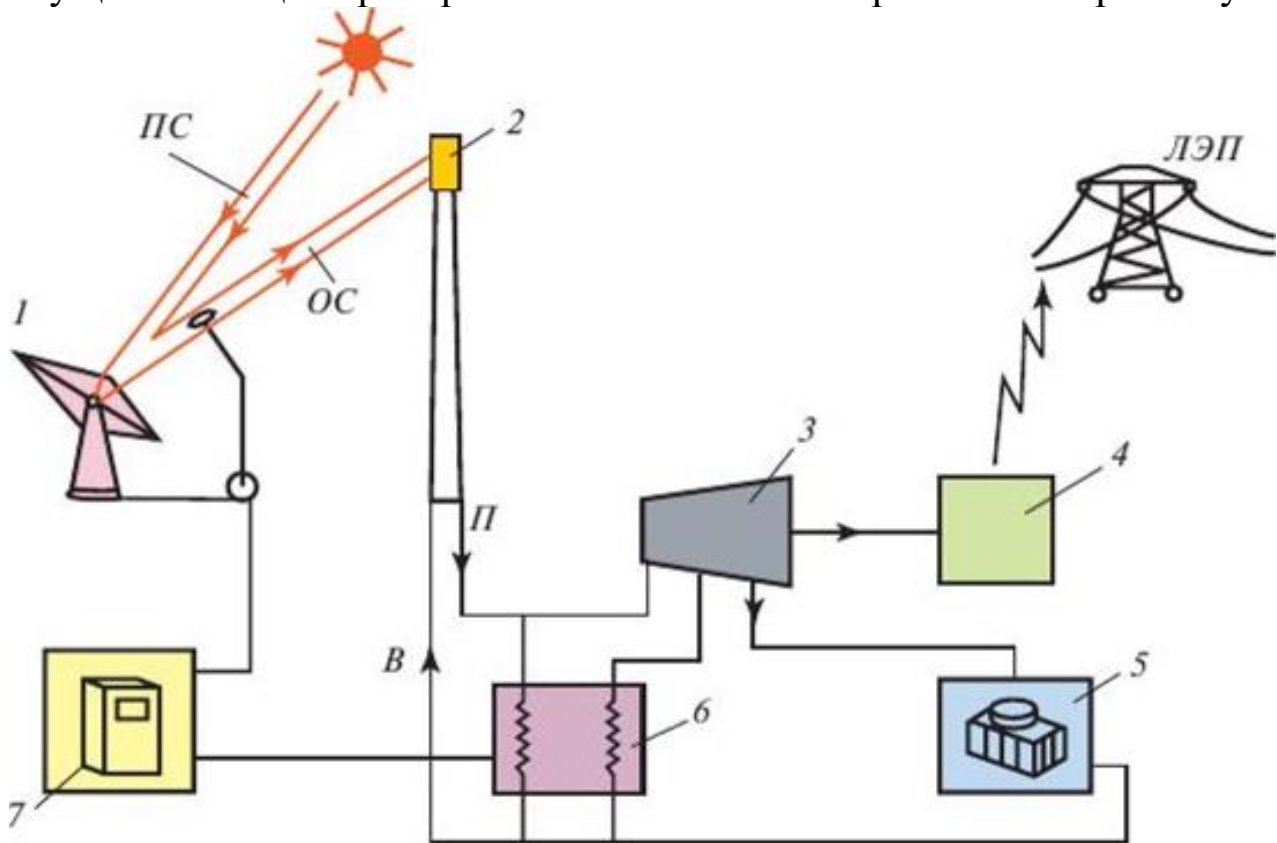


Рис. 2.1.1. Технологическая схема солнечной электростанции башенного типа:

1 — гелиостаты с системой слежения за Солнцем; 2 — приемник излучения (парогенератор); 3 — паровая турбина; 4 — генератор; 5 — градирня; 6 — аккумулятор пара; 7 — блок управления; В — вода; П — пар; ЛЭП — линия электропередачи; ПС — прямые солнечные лучи; ОС — отраженные солнечные лучи.

Литература

1. Митрофанов С.В. Переносная солнечная электростанция с автономной системой слежения за солнцем// С.В. Митрофанов, А.Ю. Немальцев. Труды VII всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: состояние, проблемы, перспективы» Оренбург, 21-23 октября 2014. с. 40-44.
2. Методика расчета солнечных электростанций [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://cyberleninka.ru/article/n/metodika-raschetamoschnosti-solnechnyh-elektrostantsiy>.
3. Helios-house [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.helioshouse.ru/kak-raschitat-solnechnuyu-elektrostantsiyu.html.
4. Mos-invertor [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.mosinvertor.ru/spr5.html.
5. Возобновляемые источники энергии: учеб.-метод. пособие по выполнению курсовых работ для студентов специальности 1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент» / сост. А. Б. Сухоцкий. – Минск : БГТУ, 2018. – 74 с
6. Аvezов, Р. Р. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения / Р. Р. Аvezов, А. Ю. Орлов. – Ташкент: Фан, 1991. – 285 с.
7. Бекман, У. Расчет систем солнечного теплоснабжения / У. Бекман, С. Клейн, Дж. Даффи. – М.: Энергоиздат, 1982. – 80 с.
8. Валов, М. И. Системы солнечного теплоснабжения / М. И. Валов, Б. И. Казанджан. – М.: Изд. МЭИ, 1991. – 140 с.
9. Внутренние санитарно-технические устройства. В 3 ч. Ч. 1. Отопление / В. Н. Богословский [и др.]; под ред. И. Г. Староверова, Ю. И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1990. – 344 с.
10. Даффи, Дж. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Дж. Даффи, У. А. Бекман. – М.: Мир, 1977. – 420 с.
11. Методические указания к курсовой работе по дисциплине «Энергоэффективные технологии на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии» / сост.: Ю. К. Кривошеев, Н. Г. Хутская. – Минск: БНТУ, 2004. – 24 с.
12. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / под ред. Э. В. Сарнацкого, С. А. Чистовича. – М.: Стройиздат, 1990. – 325 с.
13. Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки / Н. В. Харченко. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1.Расчет автономной солнечной фотоэлектрической станции.....	4
2.Расчет солнечной электростанции башенного типа.....	11
3.Расчет системы солнечного теплоснабжения здания.....	18
4.Расчет системы солнечного горячего водоснабжения.....	24
5.Расчет прихода солнечного излучения на наклонную поверхность.....	27
6.Общие положения расчета систем солнечного горячего водоснабжения.....	30
7.Осредненный тепловой расчет плоского гелиоколлектора.....	36
8.Полуэмпирический тепловой расчет солнечной системы горячего водоснабжения.....	46
9.Методика расч курсовой работы.....	49
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	56
ПРИЛОЖЕНИЕ2.....	58
ПРИЛОЖЕНИЕ3.....	60
ПРИЛОЖЕНИЕ4.....	62
ПРИЛОЖЕНИЕ5.....	64
ПРИЛОЖЕНИЕ6.....	66
Литература.....	67

Редактор: Ахметжанова Г.М

