

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые  
источники энергии»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к курсовой работе по дисциплине  
«Энергоэффективные технологии на основе нетрадиционных  
и возобновляемых источников энергии»  
для студентов специальности 1-43 01 06  
«Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент»

Минск 2004

УДК [620.9004.18 + 620.97] (075.8)  
ББК 31.15я7

В методические указания включены вопросы, связанные с использованием солнечных систем горячего водоснабжения. Рассматриваются классификация и выбор коллекторов солнечной энергии, общие положения расчета солнечных систем горячего водоснабжения. Особое внимание уделяется методике расчета коэффициента замещения солнечной энергии.

Составители:  
Ю.К. Кривошеев, Н.Г. Хутская

Рецензенты:  
А.И. Шнип, В.И. Назаров

© Кривошеев Ю.К., Хутская Н.Г.,  
составление, 2004

## **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 неожиданные решения в области энергосбережения и оценивать их эффективность.

Курсовая работа посвящена одной из важнейших тем в области энергетики на нетрадиционных и возобновляемых источниках энергии – оценке основных параметров солнечных систем горячего водоснабжения. Солнечное теплоснабжение, т.е. 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 нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Существующие методы расчета таких систем позволяют на основе использования климатической информации и учета характеристик применяемого 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; рассчитать долю нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии; построить график зависимости коэффициента замещения от площади солнечного коллектора; определить сезонную экономию топлива, обеспечиваемую использованием солнечной энергии.

### **1. КЛАССИФИКАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

Солнечная радиация – 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. Без ущерба для экологической среды может быть использовано до 1,5% всей поступающей солнечной энергии.

Гелиосистемы теплоснабжения рекомендуется применять при соответствующем технико-экономическом обосновании:

1) при сезонном теплоснабжении или при режиме теплопотребления с максимальными нагрузками в летний период;

2) при высокой себестоимости тепловой энергии, отпускаемой традиционным источником теплоты;

3) при высоких среднегодовых значениях интенсивности поступающей солнечной радиации и большом количестве солнечных дней;

4) при наличии площадей для размещения коллектора солнечной энергии (КСЭ), отсутствии его затенения ограждающими конструкциями зданий;

5) при повышенных требованиях к чистоте окружающей среды;

6) с целью экономии топливно-энергетических ресурсов.

Существует два основных типа солнечных систем горячего водоснабжения (ССГВ): *с естественной* (рис. 1.1) и *с принудительной* (рис. 1.2) *циркуляцией теплоносителя*. Если в контуре коллектора солнечной энергии и в баке-аккумуляторе теплоты используется вода, ССГВ выполняется по одноконтурной схеме. Для предотвращения замерзания теплоносителя в контуре КСЭ может использоваться антифриз, при этом теплота передается от антифриза к воде с помощью теплообменника, и ССГВ выполняется по двухконтурной схеме (рис. 1.3, 1.4).

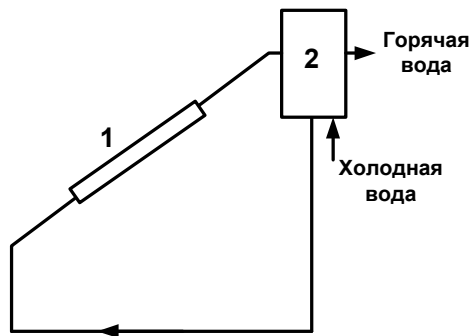


Рис. 1.1. Принципиальная схема солнечной водонагревательной установки с естественной циркуляцией теплоносителя:

1 – коллектор солнечной энергии (КСЭ); 2 – бак-аккумулятор горячей воды

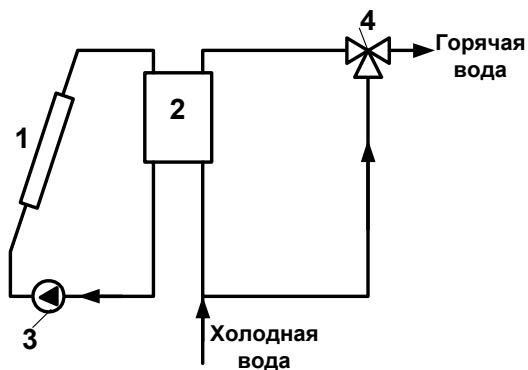


Рис. 1.2. Принципиальная схема солнечной водонагревательной установки с принудительной циркуляцией теплоносителя:  
 1 – коллектор солнечной энергии (КСЭ); 2 – бак-аккумулятор горячей воды;  
 3 – насос; 4 – смесительный вентиль

ССГВ первого типа обычно используются для небольших потребителей, при этом бак-аккумулятор теплоты должен быть установлен выше КСЭ. Для крупных потребителей горячей воды для циркуляции теплоносителя требуется насос (рис. 1.4).

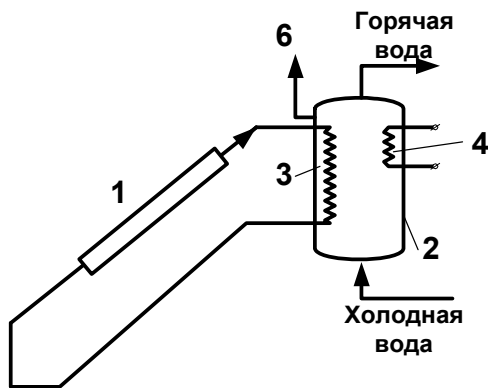


Рис. 1.3. Двухконтурная схема солнечной водонагревательной установки с естественной циркуляцией теплоносителя:  
 1 – коллектор солнечной энергии (КСЭ); 2 – аккумулятор тепла;  
 3 – теплообменник; 4 – резервный (дополнительный) источник энергии;  
 5 – предохранительный клапан

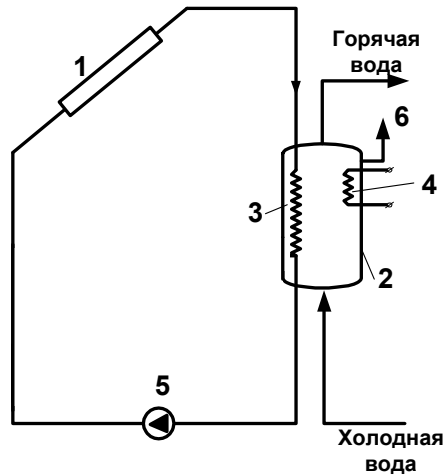


Рис. 1.4. Двухконтурная схема солнечной водонагревательной установки с принудительной циркуляцией теплоносителя:

- 1 – коллектор солнечной энергии (КСЭ); 2 – аккумулятор тепла;
- 3 – теплообменник; 4 – резервный (дополнительный) источник энергии;
- 5 – насос; 6 – предохранительный клапан

## 2. РАСЧЕТ ПРИХОДА РАДИАЦИИ НА НАКЛОННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

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

В системе солнечного теплоснабжения (ССТ) обычно используются плоские КСЭ, устанавливаемые в наклонном положении. Среднемесячное дневное количество суммарной солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность КСЭ, равно

$$\bar{E}_k = \bar{R}\bar{E}, \text{ МДж/(м}^2 \cdot \text{день)}, \quad (2.1)$$

где  $E$  – среднемесячное дневное количество суммарного солнечного излучения, поступающего 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

$$R = \left(1 - \frac{\bar{E}_d}{\bar{E}}\right) \bar{R}_n + \frac{1 + \cos \beta}{2} \cdot \frac{\bar{E}_d}{\bar{E}} + \rho \frac{1 - \cos \beta}{2}, \quad (2.2)$$

где  $E_d$  – среднемесячное дневное количество диффузной (рассеянной) солнечной энергии, поступающей на горизонтальную поверхность, МДж/(м<sup>2</sup>·день);

$\bar{R}_n$  – коэффициент пересчета прямого излучения с горизонтальной на наклонную поверхность;

$\beta$  – угол наклона КСЭ к горизонту, град;

$\rho$  – коэффициент отражения для подстилающей поверхности Земли; обычно летом  $\rho = 0,2$ , зимой при наличии снежного покрова  $\rho = 0,7$ .

Первый, второй и третий члены этого уравнения представляют собой соответственно доли прямого излучения, диффузного излучения небосвода и излучения, отраженного от земли на поверхность коллектора. Среднемесячная величина коэффициента  $\bar{R}_n$

$$\bar{R}_n = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \cdot \sin \omega'_3 + \frac{\pi}{180} \omega'_3 \cdot \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_3 + \sin \varphi \cdot \sin \delta \cdot \frac{\pi}{180} \omega_3}, \quad (2.3)$$

где  $\varphi$  – ширина местности, град;

$\delta$  – склонение Солнца, град;

$\omega_3, \omega'_3$  – часовой угол захода Солнца на горизонтальной и наклонной поверхностях, град.

Угол склонения Солнца в данный день  $n$  равен

$$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(360 \cdot \frac{284 + n}{365}\right). \quad (2.4)$$

На рис. 2.1 показаны основные углы, используемые в приведенных формулах.

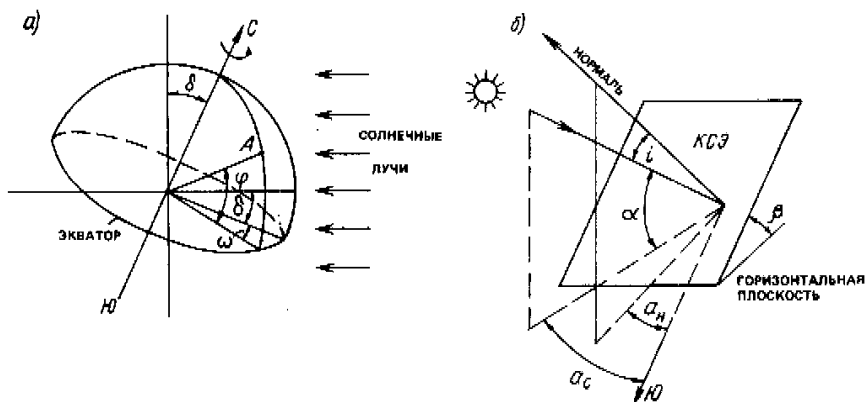


Рис. 2.1. Углы, характеризующие положение точки на земной поверхности (а) и наклонной поверхности коллектора солнечной энергии (б) относительно солнечных лучей:

$\varphi$  – широта местности;  $\omega$  – часовой угол;  $\delta$  – склонение Солнца;  $i$  – угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность КСЭ;  $\alpha$  – угол высоты Солнца;  $a_c$  – азимут Солнца;  $a_n$  – азимут наклонной поверхности

Таблица 2.1

Величина  $\delta$  для среднего дня 1-12-го месяцев

| Месяцы          | 1     | 2   | 3    | 4   | 5    | 6    | 7    | 8    | 9   | 10   | 11    | 12    |
|-----------------|-------|-----|------|-----|------|------|------|------|-----|------|-------|-------|
| $\delta$ , град | -20,9 | -13 | -2,4 | 9,4 | 18,8 | 23,1 | 21,2 | 13,5 | 2,2 | -9,6 | -18,9 | -23,0 |

Таблица 2.2

Среднемесячное суточное поступление суммарной  $E$  и диффузной  $E_d$  солнечной радиации, МДж/(м<sup>2</sup>·день), на горизонтальную поверхность, коэффициент ясности атмосферы  $K_y$  и температура наружного воздуха  $T_{в}$ , °С, для Беларуси

| Параметры | 1     | 2    | 3    | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9    | 10   | 11   | 12   |
|-----------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| $E$       | 1,89  | 4,47 | 9,31 | 13,34 | 18,63 | 19,74 | 19,17 | 15,12 | 10,0 | 4,86 | 2,22 | 1,35 |
| $E_d$     | 1,75  | 3,28 | 5,94 | 7,51  | 8,31  | 9,73  | 10,26 | 8,1   | 6,12 | 3,24 | 1,53 | 1,08 |
| $K_y$     | 0,33  | 0,40 | 0,49 | 0,46  | 0,50  | 0,48  | 0,49  | 0,47  | 0,42 | 0,37 | 0,33 | 0,31 |
| $T_{в}$   | -10,5 | -9,7 | -4,7 | 4,0   | 11,7  | 16,0  | 18,3  | 16,3  | 10,7 | 4,1  | -2,5 | -7,8 |



Часовой угол захода (восхода) Солнца для поверхности:

1) горизонтальной

$$\omega_3 = \arccos(-\operatorname{tg}\varphi \operatorname{tg}\delta); \quad (2.5)$$

2) наклонной

$$\omega'_3 = \min \left\{ \omega_3 \cdot \arccos \left[ -\operatorname{tg}(\varphi - \beta) \operatorname{tg}\delta \right] \right\}; \quad (2.6)$$

В качестве  $\omega'_3$  принимается меньшая из двух величин, указанных в фигурных скобках.

Значения среднемесячных величин  $E$ ,  $E_d$ , коэффициента ясности атмосферы  $K_y$  и температуры наружного воздуха  $T_b$  для географических условий Беларуси приведены в табл. 2.2.

### 3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВЫБОР КОЛЛЕКТОРОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ (КСЭ)

Различают *плоские коллекторы* без изменения плотности потока солнечной энергии и *фокусирующие коллекторы* с концентрированием солнечной энергии (параболоцилиндрические концентраторы, фоклины и т.п.). Для отопления и горячего водоснабжения наиболее пригодны плоские КСЭ, позволяющие нагревать теплоноситель до 60...80°C. При температурах теплоносителя 80°C и выше целесообразно применять фокусирующие или вакуумированные стеклянные трубчатые КСЭ.

Основным элементом КСЭ является *лучепоглощающая поверхность (абсорбер)* с каналами для теплоносителя.

Тепловая эффективность плоских КСЭ повышается путем оптических и тепловых потерь благодаря применению:

- 1) нескольких слоев прозрачной изоляции (остекления);
- 2) селективных покрытий;
- 3) вакуумирования пространства между лучепоглощающей поверхностью и прозрачной изоляцией и т.п.

Мгновенный коэффициент полезного действия КСЭ равен

$$\eta_k = \frac{q_k}{I_k} = \frac{m_k c_p (T_{\text{ТК}} - T_{\text{ТН}})}{I_k}, \quad (3.1)$$

где  $q_k$  – удельная теплопроизводительность КСЭ, т. е. количество полезной теплоты, получаемой с  $1 \text{ м}^2$  площади КСЭ за 1 с,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$I_k$  – плотность суммарного потока солнечной радиации, поступающей на поверхность КСЭ,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$m_k$  – удельный массовый расход теплоносителя в КСЭ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

$c_p$  – удельная изобарная теплоемкость теплоносителя,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ;

$T_{\text{TH}}$  и  $T_{\text{TK}}$  – температура теплоносителя на входе в КСЭ и выходе из него,  $^{\circ}\text{C}$ .

Мгновенный КПД плоского КСЭ равен

$$\eta_k = \eta_0 = \frac{K_k}{I_k} (T_{\text{TH}} - T_{\text{B}}), \quad (3.2)$$

где  $K_k$  – эффективный коэффициент теплопотерь КСЭ,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$T_{\text{B}}$  – температура наружного воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\eta_0$  – эффективный оптический КПД КСЭ.

Характеристика КСЭ – зависимость  $\eta_k$  от  $(T_{\text{TH}} - T_{\text{B}})/I_k$  – определяется при его испытании и изображается прямой с нулевой ординатой, равной оптическому КПД при нормальном падении лучей  $\eta_0^0$ , а тангенс угла наклона прямой дает величину  $K_k$ . Эффективный оптический КПД для КСЭ с южной ориентацией  $\eta_0 = 0,95 \eta_0^0$  при однослойном остеклении и  $\eta_0 = 0,93 \eta_0^0$  при двухслойном остеклении. При наличии теплообменника в контуре КСЭ величины  $K_k$  и  $\eta_0$  необходимо умножить на 0,97.

КПД КСЭ равен нулю в том случае, если плотность потока солнечной энергии  $I_k$  не превышает критического значения:

$$I_{\text{кр}} = \frac{K_k}{\eta_0} (T_{\text{TH}} - T_{\text{B}}). \quad (3.3)$$

Следовательно,  $\eta_k > 0$  при  $I_k > I_{\text{кр}}$ . Средняя величина КПД КСЭ за определенный период времени (день, месяц, год) равна

$$\bar{\eta}_k = \sum (\eta_k I_k) / \bar{I}_k. \quad (3.4)$$

Суммирование производится только для тех отрезков времени, когда  $I_k > I_{кр}$ , при этом  $\bar{I}_k$  – средняя плотность потока солнечной энергии для рассматриваемого периода, Вт/м<sup>2</sup>.

В табл. 3.1 приведены значения максимальной температуры теплоносителей  $T_{макс т}$ , оптического КПД  $\eta_0$ , коэффициента теплопотерь  $K_k$  основных типов КСЭ.

**Теплопроизводительность КСЭ**, т. е. мгновенное количество полезной энергии, даваемой КСЭ, равна

$$Q_k = F_k [I_k \eta_0 - K_k (T_{тн} - T_{в})], \text{ Вт}, \quad (3.5)$$

где  $F_k$  – площадь поверхности КСЭ, м<sup>2</sup>.

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

**Оптимальный угол наклона** КСЭ  $\beta$  равен широте местности  $\varphi$  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.

Таблица 3.1

Основные технические данные КСЭ

| Тип коллектора                                      | Максимальное значение $T_t, ^\circ\text{C}$ , | Значение $\eta_0$ | Значение $K_k$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) |
|---|---|-------------------|---|
| Неселективный плоский КСЭ:                          |   |                   |   |
| с однослойным остеклением НПК-1                     | 80  | 0,7...0,85        | 7...10                                  |
| с двухслойным остеклением НПК-2                     | 80  | 0,65...0,8        | 4...6                                   |
| без остекления                                      | 80  | 0,9...0,95        | 18...22                                 |
| Селективный плоский КСЭ:                            |   |                   |   |
| с однослойным остеклением СПК-1                     | 100   | 0,65...0,8        | 4,5...6                                 |
| с двухслойным остеклением СПК-2                     | 100   | 0,6...0,75        | 3...4                                   |
| Фоклин (коэффициент концентрации 1,5)               | 120   | 0,6               | 0,7...0,8                               |
| Параболоцилиндрический концентратор ПЦК             | 300   | 0,65...0,85       | 0,6...0,9                               |
| Вакуумированный стеклянный трубчатый коллектор ВСТК | 120...250                                     | 0,5...0,75        | 1...2                                   |

КСЭ можно размещать на наружных ограждениях здания (крыше, стенах, ограждениях балконов и т.п.) или отдельно. Стоимость ССТ значительно снижается при совмещении КСЭ с крышей здания. Теплопроизводительность КСЭ снижается на 2...5 % при затенении непрозрачными элементами конструкции и запылении.

#### **4. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**

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

Цель теплового расчета ССТ состоит в определении: удельной суточной тепловой производительности системы  $q_c$ ; площади  $F_k$  лучепоглощающей поверхности КСЭ; объема теплового аккумулятора  $V_{ак}$ ; удельного массового расхода теплоносителя в контуре КСЭ  $m_k$ ; угла наклона  $\beta$  КСЭ к горизонту; площади поверхностей нагрева теплообменников в контурах КСЭ и потребителя; годовой степени замещения топлива  $f_{год}$  и расхода дополнительной энергии  $Q_{диз}$ .

Исходные данные для расчета ССТ включают:

1) местоположение гелиосистемы – широту, долготу и высоту местности над уровнем моря;

2) климатические данные; среднемесячное дневное количество суммарной  $E$  и диффузной  $E_d$  солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность; температуру наружного воздуха  $T_B$ ;

3) характеристики КСЭ  $\eta_0$  и  $K_k$ , геометрические размеры модуля КСЭ, число слоев остекления, вид теплоносителя;

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

5) среднемесячные значения температур холодной  $T_{хв}$  и горячей  $T_{гв}$  воды;

6) суточное общее потребление горячей воды  $V_{гв}$ .

Выбирают тип и схему ССТ, тип КСЭ и его характеристики. Системы ССГВ с естественной циркуляцией следует применять при площади КСЭ до 20 м<sup>2</sup> для индивидуальных потребителей. В гелиосистемах отопления и ССГВ с большей площадью КСЭ необходимо использовать принудительную циркуляцию теплоносителя.

Температура горячей воды в ССГВ должна быть в пределах 45...75°, кроме случаев, указанных в СНиП.

При проектировании ССТ вначале выбирают решение и оборудование ССТ, затем последовательно выполняют тепловой, гидравлический и технико-экономический расчеты ССТ с оптимизацией.

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

$$Q_{ГВ} = Q_{сут ГВ} \cdot n_{д} = 4,19 \cdot 10^3 \cdot V_{ГВ} \cdot (T_{ГВ} - T_{ХВ}) \cdot N \cdot n_{д}, \text{ кДж}, \quad (4.1)$$

где  $V_{ГВ}$  – суточный расход горячей воды на 1 человека по нормам, м<sup>3</sup>/(день·чел.);

$N$  – число жителей;

$n_{д}$  – число дней в данном месяце;

$T_{ГВ}$  и  $T_{ХВ}$  – температуры горячей и холодной воды, °С (значения  $T_{ХВ}$  и  $n_{д}$  изменяются по месяцам, а остальные величины – постоянные);

$Q_{сут ГВ}$  – суточный расход теплоты на горячее водоснабжение, кДж.

Вследствие нестабильности поступления солнечной энергии системы солнечного отопления должны работать с дополнительным (резервным) источником энергии (ДИЭ) (котельная, теплосеть и т.п.), обеспечивающим 100 % тепловой нагрузки. В то же время ССГВ сезонного действия могут быть запроектированы без дублера, если не предъявляются жесткие требования по бесперебойному горячему водоснабжению (летние душевые, пансионаты, пионерские лагеря и т.п.).

При проектировании гелиотопливных систем теплоснабжения необходимо исходить из того, что экономически целесообразно покрывать за счет солнечной энергии лишь определенную долю  $f_{год}$  годовой тепловой нагрузки  $Q_{год н}$  горячего водоснабжения, остальную ее часть должен обеспечивать ДИЭ:

$$Q_{\text{ДИЭ}} = (1 - f_{\text{год}}) Q_{\text{годн}}. \quad (4.2)$$

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

$$f_{\text{год}} = \sum f Q_{\text{мн}} / \sum Q_{\text{мн}}. \quad (4.3)$$

Средний график потребления горячей воды в течение суток показан на рис. 4.1.

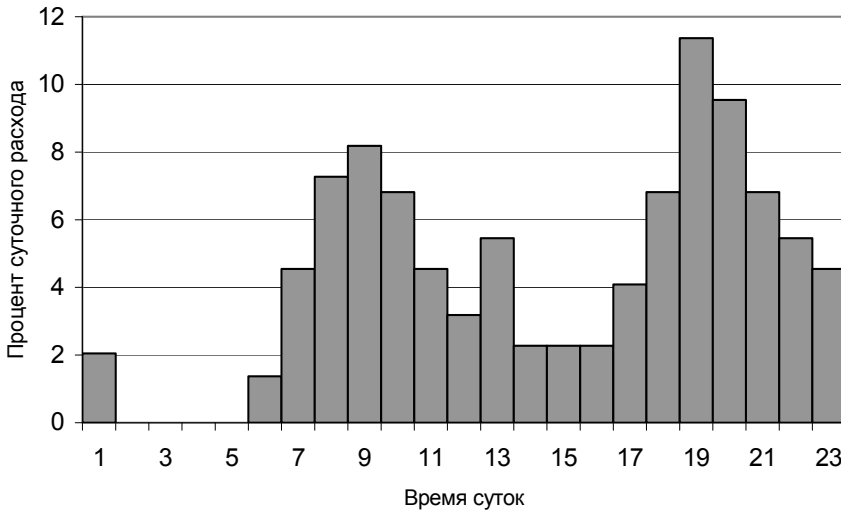


Рис. 4.1. Средний график потребления горячей воды в течение суток

Месячная степень замещения топлива

$$f = \frac{Q_{\text{мс}}}{Q_{\text{мн}}} = \frac{Q_{\text{мн}} - Q_{\text{вДИЭ}}}{Q_{\text{мн}}} = 1 - \frac{Q_{\text{мДИЭ}}}{Q_{\text{мн}}}, \quad (4.4)$$

где  $Q_{\text{мн}}$ ,  $Q_{\text{мс}}$  и  $Q_{\text{мДИЭ}}$  – месячные величины тепловой нагрузки, теплоты, обеспечиваемой солнечной и дополнительной энергией, ГДж/мес.

Удельный объемный расход теплоносителя  $V_k$  для жидкостных КСЭ следует принимать равным  $V_k = 0,01 \dots 0,02$  л/(м<sup>2</sup>·с), удельный объем водяного аккумулятора теплоты  $V_{ак} = 0,05 \dots 0,1$  м<sup>3</sup>.

Годовая (сезонная) теплопроизводительность системы  $Q_{год}$  с и степень замещения  $f_{год}$  для ССГВ меньше  $Q_{годк}$  и  $f_{год}$  на 25...35 %, а для ССТ – на 30...50 % (из-за теплопотерь в системе и неиспользуемого избытка полезной теплоты).

Годовая экономия топлива, обеспечиваемая использованием солнечной энергии:

$$B = f_{год} Q_{годн} / (Q_T \eta_{ТГ}), \text{ т.у.т.}, \quad (4.5)$$

где  $f_{год}$  – годовая степень замещения;

$Q_{годн}$  – годовая нагрузка теплоснабжения, ГДж/год;

$Q_T$  – теплота сгорания топлива, отнесенная к 1 т условного топлива;

$\eta_{ТГ}$  – КПД теплогенерирующей установки, равный 0,45 и 0,6 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.

## 5. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАМЕЩЕНИЯ (f-МЕТОД)

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

$$Q_k - Q_{гв} + E = \Delta U, \quad (5.1)$$

где  $Q_k$  – месячная теплопроизводительность солнечной установки;

$Q_{гв}$  – месячная нагрузка горячего водоснабжения;

$E$  – общее количество энергии, полученное в течение месяца от дублирующего источника;

$\Delta U$  – изменение количества энергии в аккумулирующей установке.

При размерах аккумуляторов, обычно применяемых в ССТ, разность  $\Delta U$  мала по сравнению с  $Q_k$ ,  $Q_{ГВ}$  и  $E$  и может быть принята равной нулю. Тогда уравнение (5.1) можно переписать в следующем виде:

$$f = (Q_{ГВ} - E) / Q_{ГВ} = Q_k / Q_{ГВ}, \quad (5.2)$$

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

Непосредственно уравнение (5.2) 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:

$$X = F_k K_k (T_a - \bar{T}_в) \Delta t / Q_{ГВ}; \quad (5.3)$$

$$Y = F_k \eta_0 \bar{E} n_d / Q_{ГВ}, \quad (5.4)$$

где  $\Delta t$  – число секунд в месяце;

$T_a$  – базисная температура, принятая равной 100°C;

$\bar{T}_в$  – среднемесячная температура наружного воздуха, °C;

$\bar{E}$  – среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность коллектора, Дж/м<sup>2</sup>.

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  $T_{ХВ}$ , так и минимально допустимая температура горячей воды  $T_{ГВ}$  влияют на характеристики системы. Поскольку средняя рабочая температура в системе, а следовательно, и потери тепла от коллектора зависят от  $T_{ХВ}$  и  $T_{ГВ}$ , разумно предположить, что



выражение комплекса  $X$ , характеризующего потери тепла от коллектора, можно скорректировать таким образом, чтобы учесть влияние  $T_{\text{ХВ}}$  и  $T_{\text{ГВ}}$ . Если месячные значения  $X$  умножить на поправочный коэффициент, определяемый по нижеприведенному выражению, то  $f$ -метод расчета жидкостных систем солнечного отопления и горячего водоснабжения можно использовать для определения месячных значений  $f$ , достигаемых в системах солнечного горячего водоснабжения. Поправочный коэффициент для систем горячего водоснабжения равен

$$X_c / X = \frac{11,6 + 1,18 T_{\text{ГВ}} + 3,86 T_{\text{ХВ}} - 2,32 \bar{T}_{\text{В}}}{100 - \bar{T}_{\text{В}}}. \quad (5.5)$$

Рассмотрим системы солнечного горячего водоснабжения, в которых вместимость бака-аккумулятора составляет  $75 \text{ л/м}^2$ . Предполагается, что потребление горячей воды осуществляется по графику, показанному на рис. 4.1. Оба этих условия являются базовыми в  $f$ -методе расчета. При вместимости аккумулятора  $75 \text{ л/м}^2$  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. 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, чем это следует из соотношения, позволяющего вычислить поправочный коэффициент при  $37,5 < M < 300$ :

$$X_c / X = (M / 75)^{-0,25}, \quad (5.6)$$

где  $M$  – количество воды в аккумуляторе,  $\text{л/м}^2$ .

Предполагается, что перегрев воды выше минимально допустимой температуры горячей воды  $T_{\text{ГВ}}$  невыгоден. Иногда температура воды в аккумуляторе будет превышать  $T_{\text{ГВ}}$ . Считается, что солнечная энергия, затрачиваемая на нагрев воды выше  $T_{\text{ГВ}}$ , расходуется бесполезно и не участвует в покрытии нагрузки горячего водоснабжения.

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

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

$$f = 1,029 Y - 0,065 X - 0,245 Y^2 + 0,0018 X^2 + 0,0215 Y^3, \quad (5.7)$$

где  $0 < Y < 3$ ;  $0 < X < 18$ .

## 6. ПРИМЕР РАСЧЕТА

Система солнечного нагрева воды для бытовых нужд будет установлена на доме, расположенном на широте  $\varphi^\circ$  с.ш. Коллектор для нагрева жидкости с двухслойным остеклением типа НПК-2 следует выбрать из табл. 3.1 и задать соответствующие величины ( $K_k$  и  $\eta_0$ ). Его используют в системе солнечного теплоснабжения дома, причем система должна обеспечить нагрев воды для семьи из  $N$  человек, каждый из которых ежедневно расходует  $V_{гв}$  литров воды при температуре  $T_{гв}$ ,  $^\circ\text{C}$ . Температура водопроводной воды в данном городе составляет  $T_{хв}$ ,  $^\circ\text{C}$ . Коллекторы устанавливаются под углом  $\beta$  к горизонту и ориентируются строго на юг. Объем воды в баке-аккумуляторе равен  $75 \text{ л/м}^2$ . Необходимо рассчитать долю тепловой нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии, при площади коллектора 2,5; 5 и  $10 \text{ м}^2$ .

Для среднего дня каждого месяца рассчитывается количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность КСЭ, для чего определяется угол склонения Солнца  $\delta$  по формуле (2.4), часовые углы захода Солнца для горизонтальной  $\omega_3$  и наклонной  $\omega'_3$  поверхностей по формулам (2.5) и (2.6), среднемесячные коэффициенты пересчета солнечной радиации  $R_{п}$  и  $R$  по формулам (2.2) и (2.3), среднемесячное дневное количество солнечной энергии  $E_k$ , поступающей на поверхность КСЭ, по формуле (2.1). Результаты расчетов представляются в виде следующей таблицы.

Таблица 6.1

## Результаты расчетов прихода солнечной радиации

| Месяц    | $\bar{E}_s$ ,<br>МДж/(м <sup>2</sup> ·день) | $\bar{E}_d$ ,<br>МДж/(м <sup>2</sup> ·день) | $\delta$ ,<br>град | $\omega_3$ ,<br>град | $\omega'_3$ ,<br>град | $\bar{R}_n$ | $\bar{R}$ | $\bar{E}_k$ ,<br>МДж/(м <sup>2</sup> ·день) |
|----------|---|---|--------------------|----------------------|-----------------------|-------------|-----------|---|
| Апрель   |   |   |                    |                      |                       |             |           |   |
| Май      |   |   |                    |                      |                       |             |           |   |
| Июнь     |   |   |                    |                      |                       |             |           |   |
| Июль     |   |   |                    |                      |                       |             |           |   |
| Август   |   |   |                    |                      |                       |             |           |   |
| Сентябрь |   |   |                    |                      |                       |             |           |   |

Затем необходимо определить месячные тепловые нагрузки горячего водоснабжения. Средняя суточная тепловая нагрузка равна произведению суточного расхода воды, ее теплоемкости и разности температур горячей  $T_{гв}$  и холодной  $T_{хв}$  воды. Средняя месячная тепловая нагрузка, указанная в столбце 3 табл. 6.2, получена умножением суточной тепловой нагрузки на число дней в месяце (расчет – по формуле (4.1) для соответствующих месяцев года).

Доля месячной тепловой нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии,  $f$  есть функция безразмерных комплексов  $X$  и  $Y$ , определяемых по выражениям (5.3) и (5.4). Эти комплексы должны рассчитываться для соответствующих месяцев года при каждом заданном значении площади коллектора. Уравнения (5.3) и (5.4) следует переписать так, чтобы в левых частях стояли величины  $X/F_k$  и  $Y/F_k$ , представленные в столбцах 5 и 7 табл. 6.2.

Таблица 6.2

## Значения безразмерных комплексов

| Месяц    | Число дней в месяце | Число секунд в месяце, $10^6$ | $Q_{гв}$ , $10^6$ | $100-T_{в}$ , °С | $X/F_k$ , м <sup>-2</sup> | $\bar{E}_k$ , МДж/м <sup>2</sup> ·день | $Y/F_k$ , м <sup>-2</sup> |
|----------|---------------------|-------------------------------|-------------------|------------------|---------------------------|--|---------------------------|
|          | 1                   | 2                             | 3                 | 4                | 5                         | 6                                      | 7                         |
| Апрель   |                     |                               |                   |                  |                           |  |                           |
| Май      |                     |                               |                   |                  |                           |  |                           |
| Июнь     |                     |                               |                   |                  |                           |  |                           |
| Июль     |                     |                               |                   |                  |                           |  |                           |
| Август   |                     |                               |                   |                  |                           |  |                           |
| Сентябрь |                     |                               |                   |                  |                           |  |                           |

Данные о среднемесячной температуре наружного воздуха можно найти в справочнике метеоданных, а значение базисной температуры равно  $100^{\circ}\text{C}$  (столбец 4 табл. 6.2). Среднемесячный дневной приход радиации на наклонную поверхность приведен в табл. 6.2 (столбец 6).

Для системы горячего водоснабжения значения  $X/F_k$ , указанные в столбце 5 табл. 6.2, необходимо умножить на поправочный коэффициент из выражения (5.5). Заметим, что этот коэффициент зависит от  $\bar{T}_в$  и изменяется от месяца к месяцу. Скорректированные значения  $X/F_k$  представлены в столбце 1 табл. 6.3.

Умножая  $X/F_k$  и  $Y/F_k$  на площадь коллектора, получаем  $X$  и  $Y$  (табл. 6.3). Значения этих комплексов при различной площади коллектора приведены в столбцах 3 и 4 для соответствующих месяцев года. Доля месячной нагрузки  $f$ , обеспечиваемой за счет солнечной энергии, определяется в зависимости от  $X$  и  $Y$  с помощью уравнения (5.7). Значения  $f$  указаны в столбце 5. Месячное количество солнечного тепла (столбец 6) определяется умножением  $f$  на месячную нагрузку горячего водоснабжения.

Таблица 6.3

Значения безразмерных комплексов при различной площади коллектора и коэффициента замещения  $f$

| Месяц  | $X/F_k$ | $Y/F_k$ | Площадь коллектора, м <sup>2</sup> |     |     |                         |     |     |     |                         |     |     |     |                         |  |
|--|---------|---------|------------------------------------|-----|-----|-------------------------|-----|-----|-----|-------------------------|-----|-----|-----|-------------------------|--|
|  |         |         | 2,5                                |     |     |                         | 5   |     |     |                         | 10  |     |     |                         |  |
|  |         |         | $X$                                | $Y$ | $f$ | $f \cdot Q_{ГВ},$<br>Дж | $X$ | $Y$ | $f$ | $f \cdot Q_{ГВ},$<br>Дж | $X$ | $Y$ | $f$ | $f \cdot Q_{ГВ},$<br>Дж |  |
| 1  | 2       | 3       | 4                                  | 5   | 6   | 3                       | 4   | 5   | 6   | 3                       | 4   | 5   | 6   |                         |  |
| Апрель   |         |         |                                    |     |     |                         |     |     |     |                         |     |     |     |                         |  |
| Май  |         |         |                                    |     |     |                         |     |     |     |                         |     |     |     |                         |  |
| Июнь   |         |         |                                    |     |     |                         |     |     |     |                         |     |     |     |                         |  |
| Июль   |         |         |                                    |     |     |                         |     |     |     |                         |     |     |     |                         |  |
| Август   |         |         |                                    |     |     |                         |     |     |     |                         |     |     |     |                         |  |
| Сентябрь   |         |         |                                    |     |     |                         |     |     |     |                         |     |     |     |                         |  |
| Сумма  |         |         |                                    |     |     |                         |     |     |     |                         |     |     |     |                         |  |
| Доля сезонной нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии |         |         |                                    |     |     |                         |     |     |     |                         |     |     |     |                         |  |

Доля сезонной нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии, равна отношению сезонного количества солнечного тепла (сумма столбца 6 табл. 6.3) к сезонной тепловой нагрузке (сумма сезонных расходов теплоты, рассчитанных по формуле (4.1)). Результаты расчетов должны быть представлены графически в виде зависимости доли сезонной нагрузки, обеспечиваемой за счет солнечной энергии, от площади коллектора. Затем необходимо рассчитать сезонную экономию топлива, обеспечиваемую использованием солнечной энергии, по соотношению (4.5).

## Литература

1. Внутренние санитарно-технические устройства: В 3 ч. Ч. 1. Отопление. / В.Н. Богословский, Б.А. Крупнов, А.Н. Сканава и др.; Под ред. И.Г. Староверова и Ю.И. Шиллера. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1990. – 344 с.
2. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 80 с.
3. Валов М.И., Казанджан Б.И. Системы солнечного теплоснабжения. – М.: Изд-во МЭИ, 1991. – 140 с.
4. Даффи Дж., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М.: Мир, 1977. – 420 с.
5. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 208 с.
6. Авезов Р.Р., Орлов А.Ю. Солнечные системы отопления и горячего водоснабжения. – Ташкент: Фан, 1991. – 285 с.
7. Системы солнечного тепло- и хладоснабжения / Под ред. Э.В. Сарнацкого, С.А. Чистовича. – М.: Стройиздат, 1990. – 325 с.

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| В в е д е н и е.....   | 3  |
| 1. КЛАССИФИКАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО<br>ВОДОСНАБЖЕНИЯ.....                           | 3  |
| 2. РАСЧЕТ ПРИХОДА РАДИАЦИИ НА НАКЛОННУЮ<br>ПОВЕРХНОСТЬ.....                                | 6  |
| 3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВЫБОР КОЛЛЕКТОРОВ<br>СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ (КСЭ).....                       | 9  |
| 4. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА СИСТЕМ<br>СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО<br>ВОДОСНАБЖЕНИЯ..... | 12 |
| 5. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАМЕЩЕНИЯ ( $f$ -МЕТОД)....   | 15 |
| 6. ПРИМЕР РАСЧЕТА.....   | 18 |
| Л и т е р а т у р а.....   | 22 |

Учебное издание

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к курсовой работе по дисциплине  
«Энергоэффективные технологии на основе нетрадиционных  
и возобновляемых источников энергии»  
для студентов специальности 1-43 01 06  
«Энергоэффективные технологии и энергетический менеджмент»

Составители: КРИВОШЕЕВ Юрий Константинович  
ХУТСКАЯ Наталия Геннадьевна

Редактор Т.А.Палилова. Корректор М.П.Антонова  
Компьютерная верстка Н.А.Школьниковой

---

Подписано в печать 10.06.2004.

Формат 60x84 1/16. Бумага типографская № 2.

Печать офсетная. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,1. Тираж 100. Заказ 364.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:

Белорусский национальный технический университет.

Лицензия № 02330/0056957 от 01.04.2004.

220013, Минск, проспект Ф.Скорины, 65.