



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые
источники энергии»

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Методические указания

Минск
БНТУ
2011

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра ЮНЕСКО «Энергосбережение и возобновляемые
источники энергии»

**НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

Методические указания к курсовой работе
для студентов специальности
1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии
и энергетический менеджмент»

Минск
БНТУ
2011

УДК [620.9004.18 + 620.97] (075.8)

ББК 31.15я7

Н 57

Составители:

Ю.К. Кривошеев, Н.Г. Хутская

Рецензенты:

А.И. Шнип, Г.И. Пальченок

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.

Введение

Современный специалист-энергетик должен обладать глубокими теоретическими знаниями и прочными практическими навыками. В настоящее время промышленное производство и жилищно-коммунальное хозяйство нашей страны нуждаются в проведении решительных мероприятий, направленных на снижение энергоемкости продукции. Будущие специалисты должны находить неожиданные решения в области энергосбережения и уметь 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 – 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 с учетом 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; вычислить полный коэффициент тепловых потерь коллектора; 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) сезонное теплоснабжение или режим теплопотребления с максимальными нагрузками в летний период;
- 2) высокая себестоимость тепловой энергии, отпускаемой традиционным источником теплоты;
- 3) высокие среднегодовые значения интенсивности поступающей солнечной радиации и большое количество солнечных дней;
- 4) наличие площадей для размещения коллектора солнечной энергии (КСЭ), отсутствии затенения КСЭ с ограждающими конструкциями здания;
- 5) повышенные требования к чистоте окружающей среды;
- 6) экономия топливно-энергетических ресурсов.

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

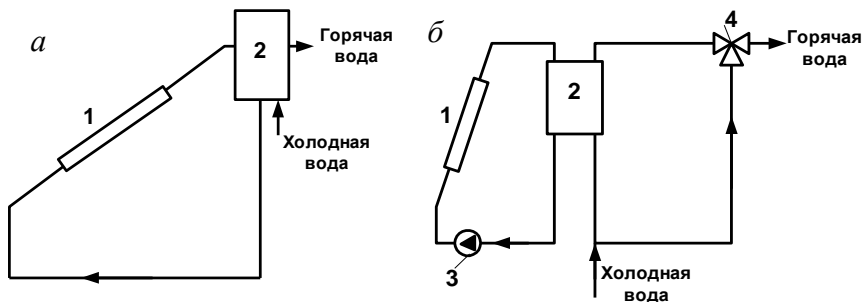


Рис. 1.1. Принципиальные схемы солнечной водонагревательной установки с естественной (а) и принудительной (б) циркуляцией теплоносителя:
 1 – коллектор солнечной энергии (КСЭ); 2 – бак-аккумулятор горячей воды;
 3 – насос; 4 – смесительный вентиль

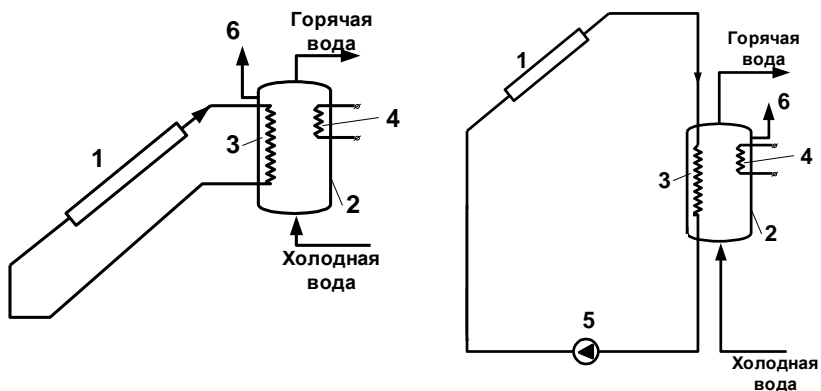


Рис. 1.2. Двухконтурная схема солнечной водонагревательной установки с естественной (а) и принудительной (б) циркуляцией теплоносителя:
 1 – коллектор солнечной энергии; 2 – аккумулятор тепла; 3 – теплообменник;
 4 – резервный (дополнительный) источник энергии; 5 – насос;
 6 – предохранительный клапан

Солнечные системы горячего водоснабжения 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. 1.2, б).

2. РАСЧЕТ ПРИХОДА РАДИАЦИИ НА НАКЛОННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Плотность потока солнечной радиации у верхней границы атмосферы на поверхность, расположенной 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 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, $\text{МДж/(м}^2 \cdot \text{день)}$, поступающей на наклонную поверхность КСЭ:

$$E_k = RE, \quad (2.1)$$

где R – отношение среднемесячных дневных количеств солнечной радиации, поступающих на наклонную и горизонтальную поверхности;

E – среднемесячное дневное количество суммарного солнечного излучения, поступающего на горизонтальную поверхность, $\text{МДж/(м}^2 \cdot \text{день)}$.

Для наклонной поверхности с южной ориентацией

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

где E_d – среднемесячное дневное количество диффузной (рассеянной) солнечной энергии, поступающей на горизонтальную поверхность, $\text{МДж/(м}^2 \cdot \text{день)}$;

R_n – коэффициент пересчета прямого излучения с горизонтальной на наклонную поверхность;

β – угол наклона КСЭ 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_n (рис. 2.1)

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

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

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

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

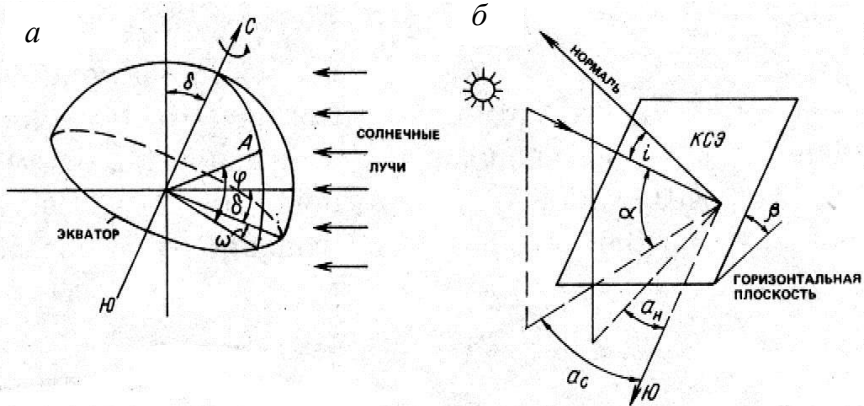


Рис. 2.1. Углы, характеризующие положение точки на земной поверхности (а) и наклонной поверхности коллектора солнечной энергии (б) относительно солнечных лучей:

φ – широта местности; ω – часовой угол; δ – склонение Солнца; i – угол падения солнечных лучей на наклонную поверхность КСЭ; α – угол высоты Солнца; α_s – азимут Солнца; α_n – азимут наклонной поверхности

Для среднего дня I–XII месяцев величина δ равна

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

Часовой угол захода (восхода) Солнца для поверхности: горизонтальной:

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

наклонной:

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

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

Значения среднемесячных величин E , E_d , и температуры наружного воздуха T_B для различных географических пунктов приведены в приложении.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВЫБОР КОЛЛЕКТОРОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Различают *плоские коллекторы* без изменения плотности потока солнечной энергии и *фокусирующие коллекторы* с концентрированием солнечной энергии (параболо-цилиндрические концентраторы, фоклины и т. п.). Для отопления и горячего водоснабжения наиболее пригодны плоские КСЭ, позволяющие нагревать теплоноситель до 60–80 °С. При температурах теплоносителя 80 °С 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 уменьшения 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.

Коэффициент полезного действия КСЭ (мгновенный)

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

где q_k – удельная теплопроизводительность КСЭ, т. е. количество полезной теплоты, получаемой с 1 м² площади КСЭ за 1 с, Вт/м²;

I_k – плотность суммарного потока солнечной радиации, поступающей на поверхность КСЭ, Вт/м²;

m_k – удельный массовый расход теплоносителя в КСЭ, кг/(м²·с);

c_p – удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К);

$T_{\text{ТН}}$ и $T_{\text{ТК}}$ – температура теплоносителя на входе в КСЭ и выходе из него, °С.

Мгновенный КПД плоского КСЭ

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

где η_0 – эффективный оптический КПД КСЭ;

K_k – эффективный коэффициент теплопотерь КСЭ, Вт/(м²·К);

$T_{\text{в}}$ – температура наружного воздуха.

Характеристика КСЭ – зависимость η_k от $(T_{\text{тн}} - T_{\text{в}})/I_k$ 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_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 η_0 необходимо умножить на 0,97.

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

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

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

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

Суммирование производится только для тех отрезков времени, когда $I_k > I_{\text{кр}}$, при этом \bar{I}_k – средняя плотность потока солнечной энергии для рассматриваемого периода, Вт/м².

Рассмотрим более подробно, как производится вычисление полного коэффициента тепловых потерь. Потери энергии через нижнюю поверхность коллектора обусловлены двумя факторами: потерями за счет теплопроводности через тепловую изоляцию и потерями за счет излучения и конвекции в окружающую среду, причем излучением и конвекцией можно пренебречь. Таким образом, коэффициент тепловых потерь через нижнюю поверхность коллектора $\alpha_{\text{н}}$

$$\alpha_n = \frac{\lambda}{L}, \quad (3.5)$$

где λ и L – соответственно коэффициент теплопроводности и толщина изоляции.

Для большинства коллекторов расчет потерь через боковые поверхности представляет весьма сложную задачу. Обычно рекомендуется выбирать толщину изоляции боковой поверхности примерно равной толщине изоляции нижней поверхности. Тогда потери через боковые поверхности можно оценить, предполагая, что плотность теплового потока через эти поверхности постоянна по периметру коллектора.

Потери с верхней поверхности коллектора обусловлены излучением и конвекцией между параллельными пластинами. Потери энергии верхним стеклянным покрытием в окружающую среду равны количеству энергии, переносимой от пластины с температурой T_n к первому стеклянному покрытию с температурой T_c и далее от одного стекла к другому. Таким образом, потери энергии через верхнее стекло в окружающую среду с единицы площади равны

$$q = \alpha_{nc}(T_n - T_c) + \frac{\sigma(T_n^4 - T_c^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_n}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right) - 1}, \quad (3.6)$$

где α_{nc} – коэффициент конвективного теплообмена между двумя наклонными параллельными пластинами;

ε_n и ε_c – степень черноты пластины и стеклянного покрытия соответственно.

Линеаризуя радиационный член уравнения и вводя коэффициент теплопередачи излучением, выражение для тепловых потерь можно переписать в следующем виде:

$$q = (\alpha_{nc} + \alpha_{pl})(T_n - T_c), \quad (3.7)$$

$$\text{где } \alpha_{pl} = \sigma(T_n + T_c)(T_n^2 + T_c^2) / \left[\left(\frac{1}{\varepsilon_n}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_c}\right) - 1 \right]. \quad (3.8)$$

Выражение для переноса тепла от верхнего стеклянного покрытия к окружающей среде имеет такой же вид, однако коэффициент конвективной теплоотдачи в этом случае определяется скоростью ветра над коллектором. Приближенные значения этого коэффициента вычисляются с помощью следующего соотношения:

$$\alpha_B = 5,7 + 3,8V, \quad (3.9)$$

где α_B – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К);

V – скорость ветра, м/с.

Радиационный коэффициент теплопередачи верхнего стеклянного покрытия с температурой T_c учитывает теплообмен излучением с небосводом при определенной температуре, которую будем считать температурой воздуха T_B . При этом выражение для коэффициента теплопередачи излучением α_{p2} имеет вид

$$\alpha_{p2} = \varepsilon_c \sigma (T_c + T_B)(T_c^2 + T_B^2). \quad (3.10)$$

Что касается $\alpha_{пс}$, то его вычисление проводится следующим образом. Свободная конвекция в воздушном зазоре между двумя параллельными пластинами, наклоненными под углом 45°, для случая $10^4 < Gr < 10^7$, описывается следующим соотношением:

$$Nu = 0,093 (Gr)^{0,31}, \quad (3.11)$$

где числа Нуссельта и Грасгофа определены выражениями

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad Gr = \frac{g\beta\Delta T d^3}{\nu^2}, \quad (3.12)$$

где α – коэффициент теплообмена;

d – расстояние между пластинами;

λ – коэффициент теплопроводности;

g – ускорение силы тяжести;

β – коэффициент объемного расширения воздуха ($1/T$ для идеального газа);

ΔT – разность температур между пластинами;

ν – коэффициент кинематической вязкости, все свойства определены при средней температуре воздуха.

Расчет коэффициента потерь через верхнюю поверхность в окружающую среду проводится методом итераций. В случае однослойного покрытия выражение для него принимает следующий вид:

$$K = \left(\frac{1}{\alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р1}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{В}} + \alpha_{\text{р2}}} \right)^{-1}, \quad (3.13)$$

при этом коэффициент теплопередачи излучением от стекла к небу-своду

$$\alpha_{\text{р2}} = \sigma \varepsilon_{\text{с}} (T_{\text{с}} + T_{\text{В}})(T_{\text{с}}^2 + T_{\text{В}}^2). \quad (3.14)$$

Учитывая, что поток энергии от пластины к стеклу равен потоку энергии от пластины в окружающую среду, нетрудно получить следующее выражение для температуры стеклянного покрытия:

$$T_{\text{с}} = T_{\text{п}} - \frac{K(T_{\text{п}} - T_{\text{В}})}{\alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{р}}}. \quad (3.15)$$

Методика расчета состоит в том, что произвольно задается значение $T_{\text{с}}$ и рассчитываются коэффициенты $\alpha_{\text{п}}$, $\alpha_{\text{р1}}$, $\alpha_{\text{р2}}$ и, наконец, K . Результаты этих расчетов используются затем для вычисления $T_{\text{с}}$ по приведенному уравнению. Если полученное значение $T_{\text{с}}$ близко к начальному произвольно выбранному значению, то нет необходимости в дальнейших расчетах. В противном случае полученное значение $T_{\text{с}}$ принимается за исходное и процесс вычислений повторяется.

Поскольку наклон коллектора к горизонту β является существенным параметром, учесть его можно с помощью следующего соотношения:

$$\frac{K(\beta)}{K(45)} = 1 - (\beta - 45)(0,00259 - 0,00144\epsilon_{\text{п}}), \quad (3.16)$$

где β – угол наклона в градусах.

Полный коэффициент тепловых потерь K_k определяется суммированием коэффициентов потерь через верхнюю и нижнюю поверхности коллектора, т. е. выражений (3.5) и (3.16).

В табл. 3.1 приведены значения максимальной температуры теплоносителей $T_{\text{т}}$, оптического КПД η_0 , коэффициента теплопотерь K_k основных типов КСЭ.

Теплопроизводительность КСЭ. Мгновенное количество полезной энергии, даваемой КСЭ, Вт:

$$Q_k = F_k [I_k \eta_0 - K_k (T_{\text{тн}} - T_{\text{в}})], \quad (3.17)$$

где F_k – площадь поверхности КСЭ, м².

Ориентация, угол наклона, размещение и соединение модулей КСЭ. 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 β равен широте местности φ для систем круглогодичного действия, $\beta = \varphi + 15^\circ$ для систем, работающих только в летний период.

Таблица 3.1

Основные технические данные КСЭ

| Тип коллектора | $T_{\text{т}}$, °С, максимальное значение | η_0 | K_k , Вт/(м ² ·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 |

Окончание табл. 3.1

| Тип коллектора | T_r , °С, максимальное значение | η_0 | K_k , Вт/(м ² ·К) |
|--|-----------------------------------|-----------|--------------------------------|
| 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 |
| Параболо-цилиндрический 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 от него. 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 ССТ 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 ССТ с помощью ЭВМ и дают возможность получить долгосрочные характеристики ССТ.

Цель теплового расчета ССТ состоит в определении:

- 1) удельной суточной тепловой производительности системы q_c ;
- 2) площади F_k лучепоглощающей поверхности КСЭ;
- 4) объема теплового аккумулятора $V_{ак}$;
- 4) удельного массового расхода теплоносителя в контуре КСЭ m_k ;
- 5) угла наклона β КСЭ к горизонту;
- 6) площади поверхностей нагрева теплообменников в контурах КСЭ и потребителя;
- 7) годовой степени замещения топлива $f_{год}$ и расхода дополнительной энергии $Q_{д.и.э.}$.

Исходные данные для расчета ССТ включают:

- 1) местоположение гелиосистемы – широта, долгота и высота местности над уровнем моря;
- 2) климатические данные; среднемесячное дневное количество суммарной E и диффузной E_d солнечной радиации, поступающей на горизонтальную поверхность; температура наружного воздуха T_B ;
- 3) характеристики КСЭ η_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) значения температур холодной $T_{х.в.}$ и горячей $T_{г.в.}$ воды;
- 6) суточное общее потребление горячей воды $V_{г.в.}$.

В соответствии с п. 1 выбирают тип и схему ССТ, а по п. 3 – тип КСЭ и его характеристики. Солнечные системы горячего водоснабжения с естественной циркуляцией следует применять при площади КСЭ до 20 м² 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, кДж, на горячее водоснабжение в данном месяце выражается следующим образом:

$$Q_{Г.В} = Q_{Г.В}^{сут} n_d = 4,19 \cdot 10^3 V_{Г.В} (T_{Г.В} - T_{Х.В}) N n_d, \quad (4.1)$$

где $Q_{Г.В}^{сут}$ – суточный расход теплоты на горячее водоснабжение, кДж.

n_d – число дней в данном месяце;

$V_{Г.В}$ – суточный расход горячей воды на 1 человека по нормам, м³/(день·чел.);

$T_{Г.В}$ и $T_{Х.В}$ – температуры горячей и холодной воды, °С (значения $T_{Х.В}$ и n_d изменяются по месяцам, а остальные величины постоянные);

N – число жителей.

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

Вследствие нестабильности поступления солнечной энергии системы солнечного отопления должны работать с дополнительным (резервным), обеспечивающим 100 % тепловой нагрузки источником энергии (ДИЭ): котельная, теплосеть и т. п. 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 $Q_{Г.В}^{суш}$ горячего водоснабжения, остальную часть тепловой нагрузки должен обеспечивать ДИЭ:

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

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

$$f_{год} = \sum f O_{Н}^M / \sum O_{Н}^M, \quad (4.3)$$

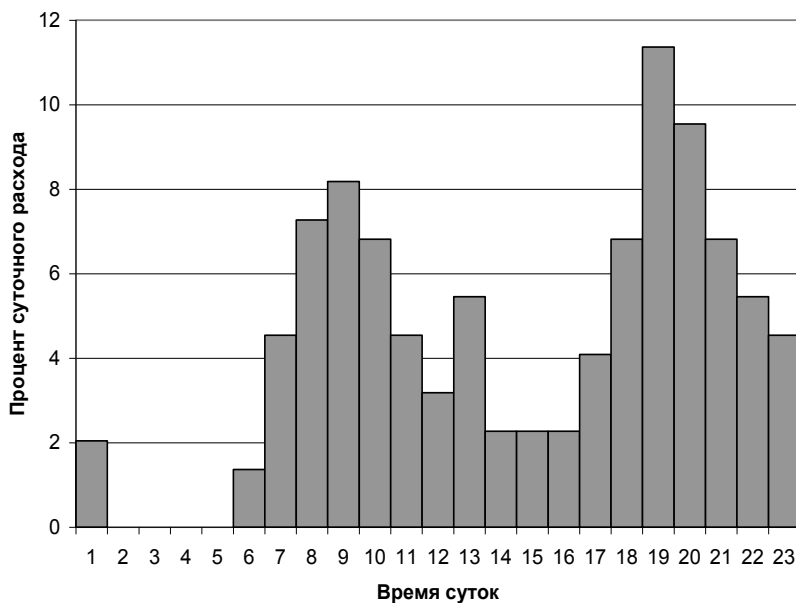


Рис. 4.1. Средний график потребления горячей воды в течение суток

Месячная степень замещения топлива

$$f = \frac{Q_{с}^M}{Q_{Н}^M} = \frac{Q_{Н}^M - Q_{ДИЭ}^M}{Q_{Н}^M} = 1 - \frac{Q_{ДИЭ}^M}{Q_{Н}^M}, \quad (4.4)$$

где $Q_{\text{н}}^{\text{М}}$, $Q_{\text{с}}^{\text{М}}$ и $Q_{\text{ДИЭ}}^{\text{М}}$ – месячные величины тепловой нагрузки, теплоты, обеспечиваемой солнечной и дополнительной энергией, ГДж/месяц.

Удельный объемный расход теплоносителя V_k для жидкостных КСЭ следует принимать: $V_k = 0,01 \dots 0,02$ л/(м²·с), удельный объем водяного аккумулятора теплоты: $V_{\text{ак}} = 0,05 \dots 0,1$ м³.

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

Годовая экономия топлива, тонн условного топлива, обеспечиваемая использованием солнечной энергии:

$$B = f_{\text{год}} Q_{\text{н}}^{\text{год}} / (Q_{\text{т}} \eta_{\text{тг}}), \quad (4.5)$$

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

$Q_{\text{н}}^{\text{год}}$ – годовая нагрузка теплоснабжения, ГДж/год;

$Q_{\text{т}}$ – теплота сгорания топлива, отнесенная к 1 тонне условного топлива;

$\eta_{\text{тг}}$ – 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 виде

$$Q - Q_{г.в} + E = \Delta U, \quad (5.1)$$

где Q – месячная теплопроизводительность солнечной установки;

$Q_{г.в}$ – месячная нагрузка горячего водоснабжения;

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

ΔU – изменение количества энергии в аккумулирующей установке.

При размерах аккумуляторов, обычно применяемых в ССТ, разность ΔU мала по сравнению с Q , $Q_{г.в}$ и E и может быть принята равной нулю. Тогда уравнение (5.1) можно переписать в виде

$$f = (Q_{г.в} - E) / Q_{г.в} = Q / Q_{г.в}, \quad (5.2)$$

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

Непосредственно уравнение (5.2) нельзя использовать для расчета f , поскольку величина Q является сложной функцией падающего излучения, температуры окружающей среды и тепловых нагрузок. Однако рассмотрение параметров, от которых зависит Q , позволяет предположить, что коэффициент замещения f эмпирически можно связать с двумя безразмерными комплексами:

$$X = F_k K_k (T_A - T_B) \Delta t / Q_{г.в}; \quad (5.3)$$

$$Y = F_k \eta_0 E_k n_D / Q_{г.в}, \quad (5.4)$$

где T_A – базисная температура, принятая равной 100 °С;

T_B – среднемесячная температура наружного воздуха, °С;

Δt – число секунд в месяце;

E_k – среднемесячный дневной приход суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность коллектора, Дж/(м²·день).

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 $T_{х.в}$ 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. Поправочный коэффициент для систем горячего водоснабжения

$$X_C / X = \frac{11,6 + 1,18T_{г.в} + 3,86T_{х.в} - 2,32T_{в}}{100 - T_{в}} \quad (5.5)$$

Рассматриваются системы солнечного горячего водоснабжения, в которых вместимость бака-аккумулятора составляет 75 л/м². 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 л/м² 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, чем это следует из соотношения, позволяющего вычислить поправочный коэффициент:

$$X_C / X = (M / 75)^{-0,25} \text{ при } 37,5 < M < 300, \quad (5.6)$$

где M – количество воды в аккумуляторе, л/м².

Предполагается, что перегрев воды выше минимально допустимой температуры горячей воды $T_{г.в}$ невыгоден. Иногда температура воды в аккумуляторе будет превышать $T_{г.в}$. Считается, что солнечная энергия, затрачиваемая на нагрев воды выше $T_{г.в}$, 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 $Q_{г.в}$. 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:

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

где $0 < Y < 3$ и $0 < X < 18$.

6. ПРИМЕР РАСЧЕТА

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 тепло-снабжения дома, причем система должна обеспечить нагрев воды для семьи из N человек, каждый из которых ежедневно расходует $V_{г.в}$ литров воды при температуре $T_{г.в}$ °С. Температура водопроводной воды в данном городе составляет $T_{х.в}$ °С. Коллекторы устанавливаются под углом β 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 2, 4 и 6 м^2 .

Для среднего дня каждого месяца рассчитывают количество солнечной энергии, поступающей на наклонную поверхность КСЭ, для чего определяют угол склонения Солнца δ по формуле (2.4), часовые углы захода Солнца для горизонтальной ω_3 и наклонной ω'_3 поверхностей по формулам (2.5) и (2.6), среднемесячные коэффициенты пересчета солнечной радиации R_n 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 форме табл. 6.1:

Таблица 6.1

| Месяц | \bar{E} МДж/(м ² ·день) | \bar{E}_d МДж/(м ² ·день) | δ , град | ω_3 , град | ω'_3 , град | R_n | R | E_k МДж/(м ² ·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 $T_{г.в}$ и холодной воды $T_{х.в}$. Средняя месячная тепловая нагрузка, указанная в столбце 3 табл. 6.2, получена умно-

жением суточной тепловой нагрузки на число дней в месяце (расчет по формуле 4.1 для соответствующих месяцев года).

Далее следует рассчитать полный коэффициент тепловых потерь (раздел 3, формулы (3.5) – (3.16)) для каждого месяца, задав определенное значение температуры пластины T_p .

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

Таблица 6.2

| Месяц | Число дней в месяце | Число секунд в месяце, 10^6 | $Q_{г.в.}$ Дж | $100 - T_B$, °C | X/F_k , m^{-2} | E_k , МДж/ $m^2 \cdot$ день | Y/F_k , m^{-2} |
|----------|---------------------|-------------------------------|------------------|------------------|--------------------|----------------------------------|--------------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Апрель | | | | | | | |
| Май | | | | | | | |
| Июнь | | | | | | | |
| Июль | | | | | | | |
| Август | | | | | | | |
| Сентябрь | | | | | | | |

Данные о среднемесечной температуре наружного воздуха можно найти в справочнике метеоданных, а значение базисной температуры равно $100\text{ }^\circ\text{C}$ (столбец 4 табл. 6.2). Среднемесечный дневной приход радиации на наклонную поверхность приведен в табл. 6.1 (столбец 6 табл. 6.1).

Для системы горячего водоснабжения значения X/F_k , указанные в столбце 5 табл. 6.2, необходимо умножить на поправочный коэффициент, даваемый выражением (5.5). Заметим, что этот коэффициент зависит от T_B 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 (см. 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

| Месяц | X/F_k | Y/F_k | Площадь коллектора, м ² | | | | | | | | | | | | | |
|--|---------|---------|------------------------------------|-----|-----|-------------------------------|-----|-----|-----|-------------------------------|-----|-----|-----|-------------------------------|---|---|
| | | | 2 | | | | 4 | | | | 6 | | | | | |
| | | | X | Y | f | $f Q_{г.в.}, 10^9, \text{Дж}$ | X | Y | f | $f Q_{г.в.}, 10^9, \text{Дж}$ | X | Y | f | $f Q_{г.в.}, 10^9, \text{Дж}$ | | |
| | | | 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 следует рассчитать сезонную экономию топлива, обеспечиваемую использованием солнечной энергии, по соотношению (4.5).

Литература

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

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица П1

Средние месячные поступления суммарной E и диффузной E_d (ккал/см²) солнечной радиации на горизонтальную поверхность, средняя температура наружного воздуха T_B , °С

| Месяц | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь |
|---|--------|-------|-------|-------|--------|----------|
| Брест, $\varphi = 52,2$ | | | | | | |
| E | 9,8 | 14,0 | 15,6 | 15,0 | 11,9 | 8,6 |
| E_d | 5,2 | 7,1 | 6,9 | 7,1 | 5,8 | 4,2 |
| T_B | 7,3 | 14,2 | 17,0 | 18,8 | 17,6 | 13,4 |
| Владивосток, $\varphi = 43,1$ | | | | | | |
| E | 18,0 | 21,5 | 21,4 | 21,3 | 18,5 | 14,8 |
| E_d | 5,4 | 6,2 | 6,0 | 6,2 | 5,4 | 4,1 |
| T_B | 4,7 | 9,7 | 13,8 | 18,4 | 21,0 | 16,8 |
| Гомель, $\varphi = 52,5$ | | | | | | |
| E | 9,8 | 13,6 | 15,0 | 14,8 | 12,2 | 8,1 |
| E_d | 5,3 | 6,7 | 6,9 | 7,0 | 5,8 | 4,1 |
| T_B | 6,3 | 13,7 | 16,9 | 18,6 | 17,4 | 12,5 |
| Горький, $\varphi = 56,5$ | | | | | | |
| E | 9,6 | 14,1 | 15,1 | 14,8 | 11,2 | 6,6 |
| E_d | 5,1 | 6,8 | 6,3 | 6,5 | 5,1 | 3,9 |
| T_B | 3,4 | 11,2 | 16,3 | 18,1 | 16,3 | 10,7 |
| Минск, $\varphi = 54$ | | | | | | |
| E | 9,37 | 13,53 | 15,03 | 14,41 | 11,33 | 7,45 |
| E_d | 5,12 | 6,65 | 6,95 | 6,89 | 5,65 | 3,97 |
| T_B | 5,3 | 12,6 | 16,0 | 17,8 | 16,2 | 11,6 |

Окончание табл. 1П

| Месяц | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь |
|---------------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|----------|
| Пярну, $\varphi = 58,4$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 10,05 | 14,61 | 15,11 | 13,52 | 11,64 | 6,70 |
| <i>E</i> _д | 5,00 | 7,04 | 7,71 | 7,51 | 5,79 | 3,96 |
| <i>T</i> _B | 2,8 | 10,3 | 14,7 | 17,3 | 16,0 | 11,7 |
| Рига, $\varphi = 57$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 9,0 | 13,1 | 12,8 | 13,6 | 10,7 | 6,75 |
| <i>E</i> _д | 4,02 | 5,26 | 5,61 | 5,69 | 4,71 | 3,41 |
| <i>T</i> _B | 5,2 | 11,5 | 15,4 | 18 | 16,5 | 12,2 |
| Саратов, $\varphi = 51,5$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 11,97 | 15,95 | 16,30 | 19,02 | 16,03 | 11,13 |
| <i>E</i> _д | 5,75 | 6,74 | 6,53 | 6,44 | 5,37 | 4,13 |
| <i>T</i> _B | 5,8 | 15,1 | 20,0 | 22,1 | 20,6 | 14,1 |
| Семипалатинск, $\varphi = 50,5$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 10,5 | 14,6 | 17,3 | 16,2 | 13,2 | 11,5 |
| <i>E</i> _д | 5,5 | 6,5 | 6,6 | 6,6 | 5,8 | 3,8 |
| <i>T</i> _B | 3,8 | 13,9 | 20,0 | 22,1 | 19,9 | 13,2 |
| Таргу, $\varphi = 58,4$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 10,05 | 14,61 | 15,11 | 13,52 | 11,64 | 6,70 |
| <i>E</i> _д | 5,00 | 7,04 | 7,71 | 7,51 | 5,79 | 3,96 |
| <i>T</i> _B | 3,9 | 10,6 | 14,8 | 17,3 | 15,5 | 10,8 |

Таблица П2

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

| Месяц | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь |
|----------------------------|--------|------|------|------|--------|----------|
| Братск, $\varphi = 56,4$ | | | | | | |
| E | 482 | 591 | 637 | 603 | 465 | 310 |
| E_d | 260 | 293 | 281 | 264 | 218 | 155 |
| T_B | -1,5 | 6,2 | 13,3 | 18,0 | 14,8 | 7,8 |
| 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 |
| 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 |
| Душанбе, $\varphi = 38,7$ | | | | | | |
| E | 515 | 738 | 846 | 884 | 787 | 633 |
| E_d | 235 | 256 | 251 | 276 | 230 | 193 |
| T_B | 15,0 | 19,6 | 24,5 | 26,5 | 24,2 | 19,4 |
| Кострома, $\varphi = 58$ | | | | | | |
| E | 411 | 540 | 591 | 591 | 461 | 238 |
| E_d | 218 | 264 | 285 | 285 | 235 | 142 |
| T_B | 2,6 | 10,5 | 15,2 | 17,6 | 15,6 | 9,7 |
| Красноярск, $\varphi = 56$ | | | | | | |
| E | 469 | 562 | 654 | 628 | 494 | 302 |
| E_d | 243 | 281 | 276 | 285 | 226 | 155 |
| T_B | 1,7 | 9,1 | 16,4 | 19,4 | 16,2 | 9,6 |

Продолжение табл. П2

| Месяц | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь |
|---|--------|------|------|------|--------|----------|
| Кемерово, $\varphi = 55,3$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 444 | 548 | 646 | 675 | 498 | 319 |
| <i>E_д</i> | 222 | 230 | 264 | 298 | 230 | 151 |
| <i>T_B</i> | 1,0 | 9,7 | 16,2 | 18,5 | 15,4 | 9,5 |
| Курск, $\varphi = 51,8$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 381 | 553 | 629 | 612 | 495 | 339 |
| <i>E_д</i> | 209 | 268 | 281 | 281 | 231 | 163 |
| <i>T_B</i> | 5,8 | 13,7 | 17,4 | 19,3 | 18,2 | 12,6 |
| Куйбышев, $\varphi = 53,3$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 493 | 637 | 679 | 654 | 540 | 344 |
| <i>E_д</i> | 214 | 247 | 247 | 256 | 214 | 151 |
| <i>T_B</i> | 5,1 | 14,1 | 18,7 | 20,7 | 19,0 | 12,6 |
| Новосибирск, $\varphi = 54,9$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 465 | 595 | 633 | 641 | 494 | 327 |
| <i>E_д</i> | 222 | 264 | 264 | 268 | 226 | 155 |
| <i>T_B</i> | 0,6 | 10,6 | 16,6 | 19,0 | 16,2 | 10,2 |
| Могилев, $\varphi = 53,8$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 402 | 553 | 628 | 615 | 494 | 306 |
| <i>E_д</i> | 209 | 281 | 293 | 293 | 234 | 164 |
| <i>T_B</i> | 5,4 | 12,9 | 16,4 | 18,2 | 16,6 | 11,6 |
| Псков, $\varphi = 58$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 373 | 532 | 591 | 570 | 427 | 243 |
| <i>E_д</i> | 205 | 264 | 277 | 281 | 222 | 138 |
| <i>T_B</i> | 4,0 | 11,0 | 15,2 | 17,6 | 15,7 | 10,8 |

Окончание табл. П2

| Месяц | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь |
|---------------------------|--------|------|------|------|--------|----------|
| Самарканд, $\varphi = 40$ | | | | | | |
| E | 524 | 708 | 825 | 855 | 784 | 620 |
| E_d | 247 | 230 | 222 | 218 | 197 | 172 |
| T_B | 13,8 | 19,2 | 23,2 | 25,6 | 23,7 | 18,6 |
| 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 |
| Якутск, $\varphi = 62,0$ | | | | | | |
| E | 499 | 566 | 633 | 603 | 444 | 277 |
| E_d | 214 | 264 | 247 | 260 | 184 | 130 |
| T_B | -7,2 | 5,9 | 15,4 | 18,7 | 14,8 | 6,2 |

Таблица ПЗ

Среднемесячное суточное поступление суммарной E и диффузной E_d солнечной радиации, МДж/(м²·день), на горизонтальную поверхность и температура наружного воздуха T_B , °С

| Месяц | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь |
|--------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|----------|
| Алматы, $\varphi = 43,4$ | | | | | | |
| E | 16,54 | 20,52 | 22,66 | 23,62 | 20,79 | 16,96 |
| E_d | 6,95 | 8,1 | 7,78 | 6,88 | 6,34 | 5,28 |
| T_B | 10,3 | 16,0 | 20,3 | 22,9 | 21,7 | 15,6 |
| Ашхабад, $\varphi = 38$ | | | | | | |
| E | 18,34 | 24,16 | 26,83 | 26,59 | 24,97 | 20,57 |
| E_d | 7,78 | 8,1 | 7,92 | 7,83 | 6,48 | 5,98 |
| T_B | 16,4 | 22,8 | 27,3 | 29,3 | 27,7 | 22,6 |
| Баку, $\varphi = 41,1$ | | | | | | |
| E | 24,05 | 27,13 | 29,61 | 27,40 | 25,11 | 20,01 |
| E_d | 4,73 | 5,26 | 6,53 | 6,34 | 5,4 | 3,89 |
| T_B | 11,8 | 18,4 | 23,4 | 26,5 | 26,3 | 22,1 |
| Ереван, $\varphi = 40,1$ | | | | | | |
| E | 19,18 | 24,97 | 28,22 | 27 | 25,11 | 20,15 |
| E_d | 8,02 | 8,23 | 7,78 | 6,88 | 6,34 | 5,28 |
| T_B | 11,1 | 15,9 | 20,1 | 24,0 | 24,2 | 20,0 |
| Киев, $\varphi = 50,5$ | | | | | | |
| E | 13,9 | 18,76 | 21,82 | 20,52 | 17,28 | 12,65 |
| E_d | 7,51 | 9,18 | 10,0 | 9,45 | 7,69 | 5,84 |
| T_B | 7,2 | 14,3 | 17,6 | 18,8 | 17,7 | 13,7 |
| Кишинев, $\varphi = 47$ | | | | | | |
| E | 15,84 | 20,25 | 23,07 | 23,62 | 20,11 | 14,73 |
| E_d | 8,48 | 9,18 | 10,0 | 9,04 | 7,83 | 5,98 |
| T_B | 9,3 | 15,6 | 19,2 | 21,4 | 20,5 | 15,7 |

Продолжение табл. ПЗ

| Месяц | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь |
|--|--------|-------|-------|-------|--------|----------|
| Москва, $\varphi = 55,8$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 13,34 | 18,63 | 19,74 | 19,17 | 15,12 | 10,0 |
| <i>E_д</i> | 7,51 | 8,31 | 9,73 | 10,26 | 8,1 | 6,12 |
| <i>T_B</i> | 4,0 | 11,7 | 16,0 | 18,3 | 16,3 | 10,7 |
| Одесса, $\varphi = 46,5$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 16,82 | 21,73 | 24,05 | 23,08 | 20,65 | 15,57 |
| <i>E_д</i> | 7,64 | 8,5 | 8,48 | 7,83 | 6,61 | 5,42 |
| <i>T_B</i> | 8,9 | 15,8 | 20,2 | 22,8 | 21,9 | 17,1 |
| Омск, $\varphi = 55$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 15,94 | 19,42 | 21,82 | 20,50 | 15,99 | 11,09 |
| <i>E_д</i> | 7,14 | 8,70 | 9,13 | 8,70 | 7,60 | 5,43 |
| <i>T_B</i> | 1,3 | 10,7 | 16,6 | 18,3 | 15,9 | 10,4 |
| Полтава, $\varphi = 49,5$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 13,95 | 18,86 | 21,91 | 20,95 | 17,64 | 13,7 |
| <i>E_д</i> | 6,83 | 8,17 | 8,46 | 8,17 | 7,25 | 5,49 |
| <i>T_B</i> | 7,8 | 15,6 | 18,3 | 20,5 | 19,6 | 14,3 |
| Свердловск, $\varphi = 57$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 15,5 | 18,52 | 20,67 | 19,45 | 15,26 | 9,63 |
| <i>E_д</i> | 7,53 | 8,77 | 9,37 | 9,06 | 7,58 | 5,43 |
| <i>T_B</i> | 2,6 | 10,1 | 15,6 | 17,4 | 15,1 | 9,2 |
| Таллин, $\varphi = 59$ | | | | | | |
| <i>E</i> | 13,5 | 18,2 | 21,0 | 19,1 | 14,1 | 8,6 |
| <i>E_д</i> | 6,3 | 7,5 | 9,5 | 8,7 | 6,9 | 4,4 |
| <i>T_B</i> | 2,4 | 8,8 | 13,5 | 16,6 | 15,4 | 10,9 |

Окончание табл. ПЗ

| Месяц | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь |
|---------------------------|--------|-------|-------|-------|--------|----------|
| Ташкент, $\varphi = 41,3$ | | | | | | |
| E | 17,51 | 23,22 | 26,34 | 27,13 | 24,43 | 19,46 |
| E_d | 6,25 | 6,75 | 5,84 | 5,13 | 4,99 | 4,31 |
| T_B | 14,4 | 20,0 | 24,7 | 26,9 | 24,9 | 19,4 |
| Тбилиси, $\varphi = 41,7$ | | | | | | |
| E | 16,12 | 19,71 | 22,8 | 22,41 | 20,52 | 15,29 |
| E_d | 7,23 | 7,83 | 7,64 | 7,83 | 6,75 | 5,42 |
| T_B | 11,9 | 17,3 | 21,1 | 24,4 | 24,2 | 19,6 |
| Фрунзе, $\varphi = 43$ | | | | | | |
| E | 17,37 | 21,6 | 25,16 | 24,3 | 21,73 | 17,37 |
| E_d | 7,78 | 6,91 | 7,78 | 7,56 | 6,48 | 5,56 |
| T_B | 11,4 | 16,9 | 21,3 | 24,1 | 22,6 | 17,3 |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение. | 3 |
| 1. КЛАССИФИКАЦИЯ СОЛНЕЧНЫХ СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ. | 4 |
| 2. РАСЧЕТ ПРИХОДА РАДИАЦИИ НА НАКЛОННУЮ ПОВЕРХНОСТЬ. | 6 |
| 3. КЛАССИФИКАЦИЯ И ВЫБОР КОЛЛЕКТОРОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ. | 9 |
| 4. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАСЧЕТА СИСТЕМ СОЛНЕЧНОГО ОТОПЛЕНИЯ И ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ. | 16 |
| 5. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАМЕЩЕНИЯ (f-МЕТОД). | 20 |
| 6. ПРИМЕР РАСЧЕТА. | 23 |
| Литература. | 26 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ. | 27 |

Учебное издание

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ
ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

Методические указания к курсовой работе
для студентов специальности
1-43 01 06 «Энергоэффективные технологии
и энергетический менеджмент»

Составители:

КРИВОШЕЕВ Юрий Константинович
ХУТСКАЯ Наталия Геннадьевна

Редактор Е.О. Коржуева
Компьютерная верстка А.Г. Занкевич

Подписано в печать 22.08.2011.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,64. Тираж 100. Заказ 1153.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.
Министерство образования Республики Беларусь