

Д.т.н., профессор каф. ТЭС Овчинников Ю.В.

Фрагмент лекционного курса «Энергосбережения в теплоэнергетике и тепло-технологиях»

## **МЕТОДИКА**

**Расчета солнечного коллектора в экологичной и энергосберегающей системе индивидуального отопления**

## 6. Отопительные системы с солнечными коллекторами

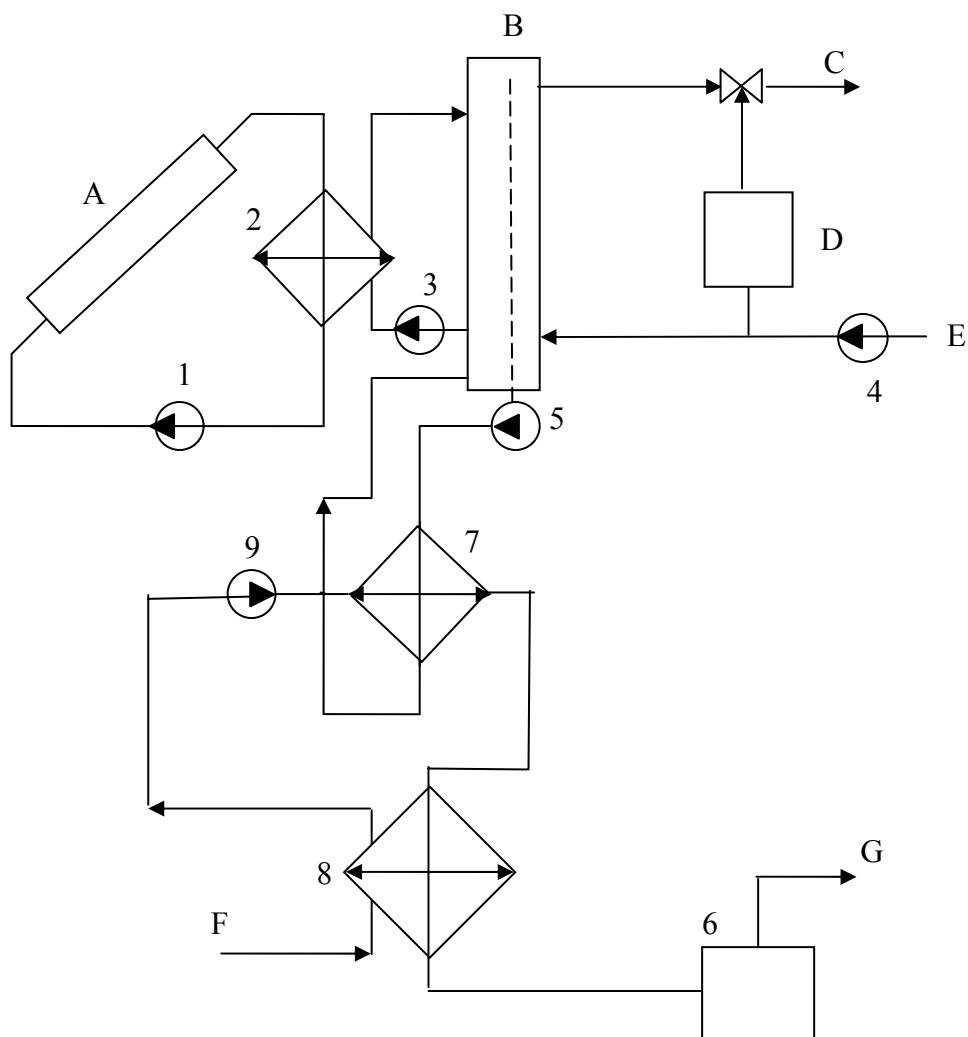


Рис. 6. Схема активной системы отопления с использованием солнечной энергии. 1 – насос; 2 – теплообменник; 3, 4, 5 – циркуляционные насосы; 6 – сборник горячей воды; 7 – теплообменник; 8 – регенератор; 9 – циркуляционный насос. А – коллектор солнечной энергии; В – аккумулятор теплоты; С – горячая вода на теплоснабжение; D – резервный источник энергии; E – обратная вода из системы теплоснабжения; G – горячая вода; F – холодная вода

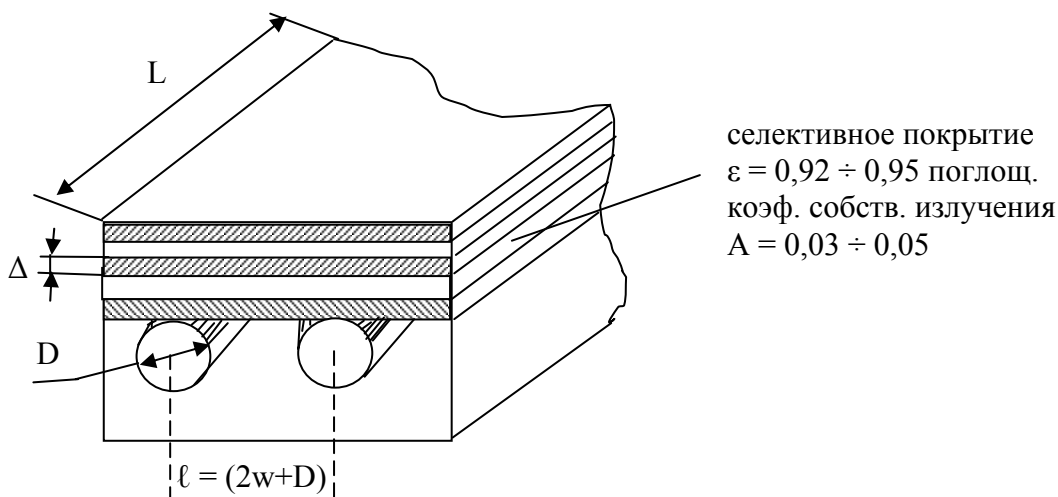


Рис. 7. Схема коллектора

### 7. Основы расчета солнечного коллектора:

Для инженерного проектирования систем преобразования солнечной энергии необходимо знать:

- полную инсоляцию (облучение земной поверхности солнечной радиацией);
- прямое излучение;
- диффузное излучение;
- отраженное излучение.

Прямое среднемесячное излучение Солнца  $\text{Вт/м}^2$ , падающее на поверхность, расположенную на Земле, равно сумме прямой составляющей излучения, диффузионной и отражательной составляющих излучения:

$$J_r + R_b B_h + \frac{J + \cos \beta}{2} + (D_h + B_h) \frac{\rho_s (1 - \cos \beta)}{2},$$

где

$R_b$  – коэффициент наклона, учитывающий прямое излучение для горизонтальной и наклонной поверхностей;

$B_h$  – среднемесячная составляющая прямого излучения на горизонтальной поверхности  $\text{Вт/м}^2$ ;

$D_h$  – среднемесячная рассеянная (диффузионная) составляющая излучения,  $\text{Вт/м}^2$ ;

$\beta$  – угол наклона поверхности, на которую падают лучи Солнца, к горизонту, град.;

$\rho_s$  – отражательная способность поверхности грунта (для снега и льда  $\rho_s=0,7$ ; для бетона  $\rho_s=0,2$ ; для асфальта, воды и темной земли  $\rho_s=0,1$ , для песка  $\rho_s=0,4$ ).

Среднемесячная составляющая прямого излучения на горизонтальной поверхности определяется как разность между среднемесячной внеатмосферной инсоляцией и среднемесячным рассеянным (диффузионным) излучением,  $\text{Вт/м}^2$ ;

$$B_h = H_h - D_h;$$

Ключевым параметром, влияющим на полное среднемесячное излучение Солнца, является месячный показатель чистоты неба.

$$K_r = \frac{H_h}{H_0},$$

Где

$H_h$  – среднемесячная наземная инсоляция горизонтальной поверхности (определяется по солнечным картам),  $\text{Вт/м}^2$ ;

$H_0$  – среднемесячная внеатмосферная инсоляция горизонтальной поверхности, Вт/м<sup>2</sup>.

Значение внеатмосферной суточной инсоляции на горизонтальной поверхности, входящей в уравнение (\*) для средних чисел каждого месяца для северного полушария определяется по графику (см. Рис. 8).

Северная широта, град.

Рис. 8. Изменение суточной инсоляции

Отношение среднемесячного рассеянного излучения  $H_h$  зависит от показателя чистоты неба:

$$\frac{D_h}{H_h} = 1.39 - 4.03K_T + 5.53K_T^2 - 3.11K_T^3.$$

Среднемесячные значения показателя чистоты неба  $K_T$  для Новосибирска даны в таблице 1.

Таблица 1

Коэффициент чистоты (ясности) неба  $K_T$ , средняя температура наружного воздуха  $t_{\text{air}}$  для Новосибирска по месяцам:

Новосибирск (55° с.ш.)												
Мес.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$K_T$	0,37	0,45	0,55	0,50	0,58	0,56	0,60	0,57	0,55	0,42	0,43	0,41
$t_{\text{air}}^{\circ\text{C}}$	-15,5	-10,7	-8,7	4,0	11,7	18,0	22,3	18,3	10,7	4,3	-5,5	-15,8

Результаты экспериментального исследования излучения Солнца различными обсерваториями (рис. 9) показывают изменения отношения среднемесячного рассеянного излучения к полному среднемесячному излучению  $D_h/H_h$ .

Формула справедлива при солнечной постоянной:

$$J_0 = 1,394 \text{ кВт/м}^2.$$

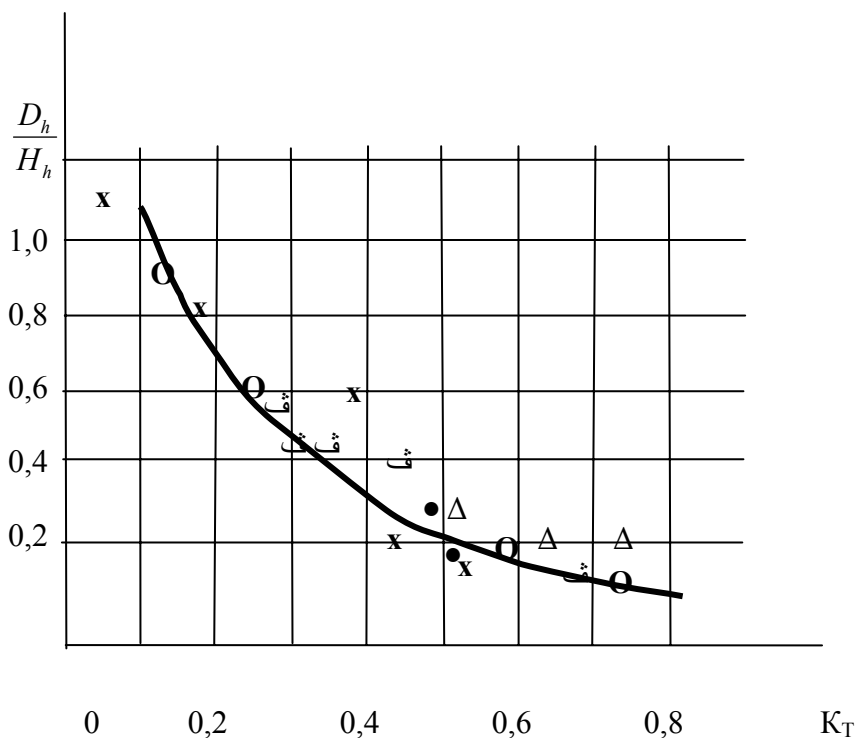


Рис.9. Изменение  $D_h/H_h$ , зависящие от показателя чистоты неба: - расчетные данные; ● – обсерватория «Блю-Хилл»; △ – НИС, Франция, x – Мелсингфорс, Финляндия, ف – Кью, Лондон.

Коэффициент наклона связывает прямое излучение для горизонтальной поверхности с прямым излучением для наклонной поверхности.

$$R_b = \frac{\cos i}{\cos \alpha} = \frac{\sin \delta_s \sin(\varphi - \beta) + \cos \delta_s \cos(\varphi - \beta) \cos(h_s)}{\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta_s) + \cos(\varphi) \cdot \cos(\delta_s) \cdot \cos(h_s)},$$

где  $i$  – угол падения (угол между нормалью к поверхности и направлением лучей от Солнца), град.;

$\alpha$  – высота Солнца (угол между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью в заданном месте на Земле), град.;

$h_s$  – угловое солнечное время (угловое смещение Солнца, 1 час соответствует  $(\pi/12)$  рад.

Солнечные коллекторы, как правило, устанавливаются неподвижно под углом к горизонту, примерно равным широте данной местности, поэтому высота Солнца равна широте  $\alpha = \varphi$ .

Угол склонения Солнца в данный день

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

где  $n$  – порядковый номер дня в году.

Значение угла склонения  $\delta_s$  для любого дня года приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значение угла склонения Солнца для среднего дня по месяцам

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

Полезный тепловой поток, передаваемый теплоносителю, зависит от его массового расхода, теплоемкости и температуры, Вт

$$\Phi_e = Gc_p(T_{f_2} - T_{f_1}),$$

Где  $G$  – массовый расход теплоносителя через коллектор, кг/с;

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

$T_{f_2}$ ,  $T_{f_1}$  – температура теплоносителя на выходе и на входе в коллектор, К/

Тепловые характеристики коллектора рассчитывают исходя из уравнения баланса энергии, которое позволяет определить долю энергии падающего излучения, как полезную энергию, передаваемую теплоносителю.

$$J_c F_k \cdot \tau_c \alpha_{s,c} = \Phi_e + \Phi_p + \frac{de_c}{dt},$$

где  $F_k$  – площадь плоского коллектора, м<sup>2</sup>;

$J_c$  – полная плотность потока солнечного излучения, падающего на поверхность коллектора,  $\frac{Вт}{м^2}$ ;

$\tau_c$  – эффективная пропускательная способность покрытия солнечного коллектора;

$\alpha_{s,c}$  – поглощательная способность поверхности пластины солнечного коллектора;

$\Phi_s$  – тепловой поток от поглощающей пластины коллектора к теплоносителю, Вт;

$\Phi_p$  – тепловой поток (тепловые потери) от поглощающей пластины коллектора в окружающую среду, Вт;

$\frac{de_c}{dt}$  – поток теплоты, аккумулированный коллектором за счет его внутренней энергии,

Вт.

Значение коэффициента полезного действия коллектора представляет собой отношение полезно используемой энергии к полной энергии падающего солнечного излучения на всю площадь коллектора

$$\eta = \frac{Q_e}{F_k J_c}.$$

Тепловые потери в солнечном коллекторе

$$\Phi_p = \psi_c F_k (T_c - T_{air}),$$

где  $\psi_c$  – суммарный коэффициент тепловых потерь коллектора ( $\psi_c = 4$  Вт/м<sup>2</sup>К) для двойного стеклянного покрытия;  $\psi_c = 8$  Вт/м<sup>2</sup>К для одинарного стеклянного покрытия;

$T_c$ ,  $T_{air}$  – соответственно температуры пластины коллектора и окружающей среды, К.

Суммарный коэффициент тепловых потерь представляет собой коэффициент теплопередачи от теплоносителя в окружающую среду и определяется по известным формулам теплообмена.

В случае использования солнечного коллектора с оребрением трубы теплоносителя, коэффициент эффективности ребра представляет отношение теплового потока в реальном ребре к максимально возможному тепловому потоку:

$$\eta_f = \frac{th\xi w}{\xi w},$$

где  $\xi w$  – безразмерный параметр, в котором  $\xi^2 = \psi_c / (\lambda \cdot \Delta)$  и  $w = (\ell - D)/2$ ;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/м·К;

$\Delta$  – толщина соединительной пластины, м;

$\ell_0 D$  – расстояние между трубами и диаметр трубы, м.

Коэффициент эффективности коллектора представляет собой отношение термического сопротивления между коллектором и окружающим воздухом к термическому сопротивлению между теплоносителем и окружающим воздухом:

$$\eta_{sk} = \frac{\alpha_{ci} \pi D (D + 2w \eta_f)}{(D + 2w) [\alpha_{ci} \pi D + \psi_c (D + 2w \eta_f)]},$$

где  $\alpha_{ci}$  – коэффициент теплоотдачи от поверхности трубы к теплоносителю

( $\alpha_{ci} = 300$  Вт/м<sup>2</sup>·К – ламинарное течение воды при вынужденной конвекции;

$\alpha_{ci} = 1500$  Вт/м<sup>2</sup>·К – турбулентное течение воды при вынужденной конвекции;  $\alpha_{ci} = 100$

Вт/м<sup>2</sup>·К – турбулентное движение воздуха при вынужденной конвекции.

Эффективность солнечного коллектора повышается с увеличением толщины соединительной пластины и ее теплопроводности и уменьшается с увеличением расстояния между трубами, по которым течет теплоноситель. Увеличение коэффициента теплоотдачи между стенками канала и рабочей жидкостью приводит к возрастанию  $\eta_k$ , а увеличение суммарного коэффициента тепловых потерь  $\xi$  вызывает его уменьшение.

Степень эффективности процесса передачи теплоты теплоносителя оценивается коэффициентом отвода теплоты, характеризующимся отношением фактического теплового потока теплоносителя к тепловому потоку при максимальной разности температур между поглощающей пластиной и окружающей средой.

$$\chi_{отн.} = \frac{G_c c_p (T_{f2} - T_{f1})}{\alpha_{ci} J_s - \psi_c (T_{f1} - T_{air})} (*),$$

где  $G_c$  – расход теплоносителя на единицу поверхности коллектора, кг/м<sup>2</sup>с;

$J_s = \tau_c J_C$  – поток падающего излучения на коллектор с учетом пропускной способности стекла, Вт/м<sup>2</sup>.

После преобразований правой части уравнения коэффициент отвода теплоты:

$$\chi_{отв} = \frac{G_c c_p}{\psi_c} \left[ 1 - \frac{\frac{\alpha_{sc} J_s}{\psi_c} - (T_{f2} - T_{air})}{\frac{\alpha_{sc} J_s}{\psi_c} - (T_{f1} - T_{air})} \right]$$

или, учитывая, что при отводе теплоты из коллектора справедливо (утверждение) выражение:

$$\frac{\frac{\alpha_{sc} J_s - (T_{f2} - T_{air})}{\psi_c}}{\frac{\alpha_{sc} J_s - (T_{f1} - T_{air})}{\psi_c}} = \exp \left[ -\frac{\psi_c \cdot \eta_K}{G_c \cdot C_p} \right],$$

Числитель правой части уравнения (\*) представляет собой полезный тепловой поток, в зависимости от температуры теплоносителя на входе в солнечный коллектор, Вт:

$$\Phi_c = F_c \chi_{отв} [\alpha_{sc} J_s - \psi_c (T_{f1} - T_{air})] (**)$$

Уравнение (\*\*) имеет форму, удобную для расчетов, поскольку температура теплоносителя на входе либо известна, либо задается, а среднемесячная температура окружающей среды для различных широт приводится в справочной литературе. Среднечасовой к.п.д. солнечного коллектора:

$$\eta_c = \frac{q_\ell}{J_c}.$$

Среднесуточный к.п.д. солнечного коллектора

$$\eta_c = \frac{\sum q_\ell}{\sum J_c}.$$

|



Примечание.

1 Д.т.н., профессор каф. ТЭС Овчинников Ю.В. Фрагмент лекционного курса «Энергосбережения в теплоэнергетике и теплотехнология» МЕТОДИКА Расчета солнечного коллектора в экологичной и энергосберегающей системе индивидуального отопления

2 6. Отопительные системы с солнечными коллекторами В С А 3 D 5 4 E F 6 G Рис. 6. Сема активной системы отопления с использованием солнечной энергии. насос; теплообменник; 3, 4, 5 циркуляционные насосы; 6 сборник горячей воды; 7 теплообменник; 8 регенератор; 9 циркуляционный насос. А коллектор солнечной энергии; В аккумулятор теплоты; С горячая вода на теплоснабжение; D резервный источник энергии; E обратная вода из системы теплоснабжения; G горячая вода; F холодная вода

3 3 L селективное покрытие  $\varepsilon = 0,9$  0,95 поглощ. коэф. собств. излучения  $A = 0,03$  0,05 D I = (w+d Рис. 7. Сема коллектора 7. Основы расчета солнечного коллектора: Для инженерного проектирования систем преобразования солнечной энергии необходимо знать: - полную инсоляцию (облучение земной поверхности солнечной радиацией); - прямое излучение; - диффузное излучение; - отраженное излучение. Прямое среднемесячное излучение Солнца Вт/м, падающее на поверхность, расположенную на Земле, равно сумме прямой составляющей излучения, диффузионной и отражательной составляющих излучения:  $+ \cos \beta \rho ( \cos \beta r + Rb V + + ( D + B$ , где R b коэффициент наклона, учитывающий прямое излучение для горизонтальной и наклонной поверхностей; B среднемесячная составляющая прямого излучения на горизонтальной поверхности Вт/м ; D среднемесячная рассеянная (диффузионная составляющая излучения, Вт/м :  $\beta$  угол наклона поверхности, на которую падают лучи Солнца, к горизонту, град.;  $\rho$  отражательная способность поверхности грунта (для снега и льда  $\rho = 0,7$ ; для бетона  $\rho = 0,;$  для асфальта, воды и темной земли  $\rho = 0,;$  для песка  $\rho = 0,4$ . Среднемесячная составляющая прямого излучения на горизонтальной поверхности определяется как разность между среднемесячной внеатмосферной инсоляцией и среднемесячным рассеянным (диффузионным излучением, Вт/м ;  $B = H D$  ; Ключевым параметром, влияющим на полное среднемесячное излучение Солнца, является месячный показатель чистоты неба.  $H K = ,$  r Где H среднемесячная наземная инсоляция горизонтальной поверхности (определяется по солнечными картами, Вт/м ; H 0

4 H 0 среднемесячная внеатмосферная инсоляция горизонтальной поверхности, Вт/м. Значение внеатмосферной суточной инсоляции на горизонтальной поверхности, входящей в уравнение (\* для средних чисел каждого месяца для северного полушария определяется по графику (см. Рис Северная широта, град. Рис. 8. Изменение суточной инсоляции Отношение среднемесячного рассеянного излучения H зависит от показателя чистоты неба:  $D 3 = KT + 5,53KT 3,KT$  H Среднемесячные значения показателя чистоты неба K T для Новосибирска даны в таблице. Таблица Коэффициент чистоты (ясности неба K T, средняя температура наружного воздуха t air для Новосибирска по месяцам: Новосибирск (55 о с.ш. Мес K T 0,37 0,45 0,55 0,50 0,58 0,56 0,60 0,57 0,55 0,4 0,43 0,4 t o air C -5,5-0,7-8,7 4,0,7 8,0,3 8,3 0,7 4,3-5,5-5,8 Результаты экспериментального исследования излучения Солнца различными обсерваториями (рис. 9 показывают изменения отношения среднемесячного рассеянного излучения к полному среднемесячному излучению D /H. Формула справедлива при солнечной постоянной:  $0 = ,394$  квт/м.

5 Рис.9. Изменение D /H, зависящие от показателя чистоты неба: - расчетные данные; обсерватория «Блю-Хилл»; НИС, Франция, Мелсингфорс, Финляндия, Кью, Лондон. Коэффициент наклона связывает прямое излучение для горизонтальной поверхности с прямым излучением для наклонной поверхности.  $R b \cos i \sin \delta \sin( \phi \beta + \cos \delta \cos( \phi \beta \cos( = , \cos \alpha \sin( \phi \sin( \delta + \cos( \phi \cos( \delta \cos($  где i угол падения (угол между нормалью к поверхности и направлением лучей от Солнца, град.;  $\alpha$  высота Солнца (угол между направлением на Солнце и горизонтальной поверхностью в заданном месте на Земле, град.; угловое солнечное время (угловое смещение Солнца, час соответствует  $(\pi/$  рад. Солнечные коллекторы, как правило, устанавливаются неподвижно под углом к горизонту, примерно равным широте данной местности, поэтому высота Солнца равна широте  $\alpha = \phi$ . Угол склонения Солнца в данный день  $84 + n \delta = 3,45 \sin 360, 365$  где n порядковый номер дня в году.

6 Значение угла склонения  $\delta$  для любого дня года приведены в табл.. Значение угла склонения Солнца для среднего дня по месяцам 6 Таблица Месяцы  $\delta$ , град ,9-3,0 -,4 9,4 8,8 3,, 3,5, -9,6-8,9-3,0 Полезный тепловой поток, передаваемый теплоносителю, зависит от его массового расхода, теплоемкости и температуры, Вт  $Fe = Gc \rho ( T T$ , Где G массовый расход теплоносителя через коллектор, кг/с;  $c \rho$  удельная изобарная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг К; T, T температура теплоносителя на выходе и на входе в коллектор, к/ Тепловые характеристики коллектора рассчитывают исходя из уравнения

баланса энергии, которое позволяет определить долю энергии падающего излучения, как полезную энергию, передаваемую теплоносителю.  $de = F_k \tau \alpha = \Phi_e + \Phi_p + dt$  где  $F_k$  площадь плоского коллектора, м<sup>2</sup>;  $\tau$  полная плотность потока солнечного излучения, падающего на поверхность коллектора, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha$  эффективная пропускательная способность покрытия солнечного коллектора;  $\Phi_e$  поглощательная способность поверхности пластины солнечного коллектора;  $\Phi_p$  тепловой поток от поглощающей пластины коллектора к теплоносителю, Вт;  $\Phi_r$  тепловой поток (тепловые потери от поглощающей пластины коллектора в окружающую среду, Вт;  $de$  - поток теплоты, аккумулированный коллектором за счет его внутренней энергии, Вт. Значение коэффициента полезного действия коллектора представляет собой отношение полезно используемой энергии к полной энергии падающего солнечного излучения на всю площадь коллектора. Тепловые потери в солнечном коллекторе  $\eta = Q_e / F_k \cdot \Phi_p = \psi \cdot C \cdot F_k \cdot (T_c - T_{air})$ , где  $\psi \cdot C$  суммарный коэффициент тепловых потерь коллектора ( $\psi \cdot C = 4$  Вт/м<sup>2</sup>·К для двойного стеклянного покрытия;  $\psi \cdot C = 8$  Вт/м<sup>2</sup>·К для одинарного стеклянного покрытия;  $T_c$ ,  $T_{air}$  соответственно температуры пластины коллектора и окружающей среды, К. Суммарный коэффициент тепловых потерь представляет собой коэффициент теплопередачи от теплоносителя в окружающую среду и определяется по известным формулам теплообмена.

В случае использования солнечного коллектора с оребрением трубы теплоносителя, коэффициент эффективности ребра представляет отношение теплового потока в реальном ребре к максимально возможному тепловому потоку:  $\eta = \xi \cdot w$  где  $\xi$  безразмерный параметр, в котором  $\xi = \psi \cdot C / (\lambda \cdot l \cdot D)$ ;  $\lambda$  коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/м·К;  $l$  толщина соединительной пластины, м;  $D$  расстояние между трубами и диаметр трубы, м. Коэффициент эффективности коллектора представляет собой отношение термического сопротивления между коллектором и окружающим воздухом к термическому сопротивлению между теплоносителем и окружающим воздухом:  $\eta = \alpha \cdot c \cdot i \cdot (D + w) / (\alpha \cdot c \cdot i \cdot D + \psi \cdot (D + w))$ , где  $\alpha \cdot c \cdot i$  коэффициент теплоотдачи от поверхности трубы к теплоносителю ( $\alpha \cdot c \cdot i = 300$  Вт/м<sup>2</sup>·К ламинарное течение воды при вынужденной конвекции;  $\alpha \cdot c \cdot i = 500$  Вт/м<sup>2</sup>·К турбулентное течение воды при вынужденной конвекции;  $\alpha \cdot c \cdot i = 00$  Вт/м<sup>2</sup>·К турбулентное движение воздуха при вынужденной конвекции). Эффективность солнечного коллектора повышается с увеличением толщины соединительной пластины и ее теплопроводности и уменьшается с увеличением расстояния между трубами, по которым течет теплоноситель. Увеличение коэффициента теплоотдачи между стенками канала и рабочей жидкостью приводит к возрастанию  $\eta$ , а увеличение суммарного коэффициента тепловых потерь  $\xi$  вызывает его уменьшение. Степень эффективности процесса передачи теплоты теплоносителя оценивается коэффициентом отвода теплоты, характеризующимся отношением фактического теплового потока теплоносителя к тепловому потоку при максимальной разности температур между поглощающей пластиной и окружающей средой.  $G_c \cdot p \cdot (T_c - T_{air})$  где  $G_c$  расход теплоносителя на единицу поверхности коллектора, кг/м<sup>2</sup>·с;  $p$  - поток падающего излучения на коллектор с учетом пропускной способности стекла, Вт/м<sup>2</sup>. После преобразований правой части уравнения коэффициент отвода теплоты:  $\chi_{отв} = G_c \cdot p \cdot \alpha \cdot \psi \cdot (T_c - T_{air})$  или, учитывая, что при отводе теплоты из коллектора справедливо (утверждение выражение:

$\eta = \alpha \cdot (T_c - T_{air}) / (\psi \cdot \eta \cdot K) = \exp \alpha \cdot (T_c - T_{air}) / (G_c \cdot p \cdot \psi)$  Числитель правой части уравнения (\*) представляет собой полезный тепловой поток, в зависимости от температуры теплоносителя на входе в солнечный коллектор, Вт:  $\Phi_c = F_k \cdot \chi_{отв} \cdot [\psi \cdot (T_c - T_{air})] \cdot \alpha$  (\*\* Уравнение (\*\*) имеет форму, удобную для расчетов, поскольку температура теплоносителя на входе либо известна, либо задается, а среднемесячная температура окружающей среды для различных широт приводится в справочной литературе. Среднечасовой к.п.д. солнечного коллектора:  $\eta_{ср} = I_{ср} / \Sigma q$ . Среднесуточный к.п.д. солнечного коллектора  $\Sigma \eta = \Sigma I$ .