

УДК 674.047

**И. М. Озарков**, профессор доктор технических наук (НЛТУ Украины);  
**М. И. Данчук**, аспирант (НЛТУ Украины)

### ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА В ПЛОСКИХ ГЕЛИОТЕРМИЧЕСКИХ КОЛЛЕКТОРАХ

Проанализированы современные конструкции гелиотермических коллекторов, описаны составляющие конструкции коллектора, показаны формы теплоприемных элементов коллекторов. Приведены уравнения для определения коэффициента теплоотдачи конвективно-радиационного теплообмена при свободной (естественной) и вынужденной конвекции.

Analyzes contemporary design solar thermal collectors. Describes the components of the structure of the collector, and given their description. Displaying form heat perception collectors items. The equations for determining the heat transfer coefficient convective-radiative heat transfer in free (natural) and forced convection.

**Введение.** Проблема низкой эффективности энергетики в Украине связана с устаревшими технологиями, исчерпанием ресурса использования основных источников генерации тепла и электроэнергии. Это требует перехода в стране к энергоэффективным и экологически чистым технологиям, которыми являются возобновляемые источники энергии (ВИЭ). Несмотря на декларацию относительно осознания этой потребности со стороны разных ветвей власти и ряд принятых нормативно-законодательных актов относительно ВИЭ, реальных шагов относительно их внедрения сделано очень мало.

**Основная часть.** Теплоносителем в указанных выше коллекторах могут быть воздух, вода, незамерзающая жидкость (например, раствор гликоля и воды в пропорции 1 : 1).

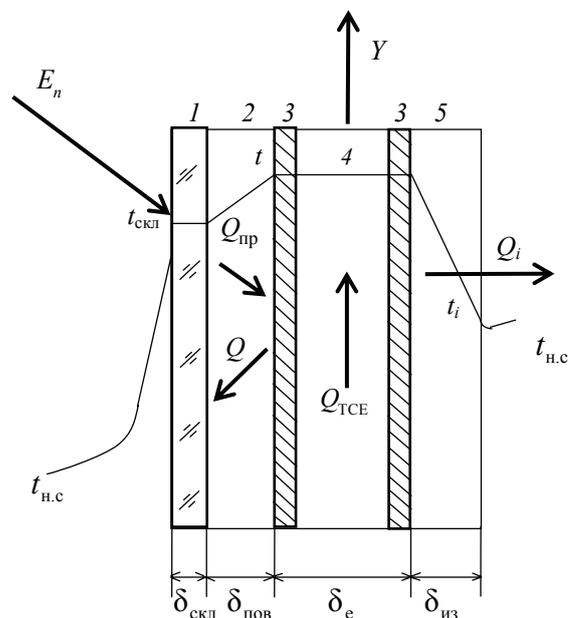
Наиболее экономически выгодным и простыми по конструкции являются плоские коллекторы, то есть поглотители и аккумуляторы солнечной энергии. В частности, плоские воздушные коллекторы обеспечивают температуру воздуха внутри сушилки 20...60°C, а плоские водные – 40...80°C. Следует заметить, что простое одинарное застекление позволяет улавливать также и рассеянное солнечное излучение и обеспечивает уровень температуры 50...60°C. Простота конструкции, относительно высокие экономические и технические показатели гелиотермического плоского коллектора и подбор соответствующего материала для смещения спектра излучения в дальнюю его область (6...15 мкм) позволяет использовать успешно такой коллектор в солнечной сушилке.

Плоский коллектор, как правило, представляет собой раму, в которой с одной стороны находятся одинарное или двойное застекления, а с другой стороны поглотитель или аккумулятор солнечной энергии. Основное преимущество плоского коллектора заключается в том, что он поглощает прямое и рассеянное солнечные излучения.

Прозрачное покрытие (стекло, поликарбонат, полиэтиленовая пленка) используется для уменьшения тепловых потерь с лицевой стороны ТПЭ.

Используют в большинстве случаев оконное стекло с низким содержанием оксидов железа. Применение призматического оконного стекла значительно повышает эффективность гелиоколлекторов. Одним из наиболее часто употребляемых видов стекла для гелиоколлекторов является стекло Diamat, CentrosSolarGlas (прозрачность составляет 91...96%).

На рисунке показано продольное сечение щелевого гелиоколлектора, в котором теплоносителем является воздух.



Продольное сечение щелевого гелиоколлектора и характер распределения температурных полей в нем:

- 1 – стекло; 2 – воздушный промежуток;
- 3 – стенка теплопринимающего элемента;
- 4 – теплоноситель; 5 – теплоизоляция

В состав коллектора входят такие конструктивные элементы:

- прозрачное покрытие (стекло, пленка), которое защищает абсорбер от тепловых потерь к атмосфере;
- теплоизоляция (защищает абсорбер от тепловых потерь снизу и по бокам);
- металлический или пластиковый корпус;
- прямой и обратной трубопроводы к теплоносителям.

Конструкция таких плоских гелиоколлекторов использует суммарное (прямое и рассеянное) излучение. Плоские коллекторы характеризуются простотой конструкции и относительно низкой ценой.

В гелиоколлекторах, где имеет место концентрация солнечной энергии с помощью отражателей (рефлекторов) или специальных линз на тепловом приемном элементе (ТПЭ), теплоносители нагреваются до высоких температур. Заметим, что солнечные коллекторы такого типа дорогие и требуют значительных затрат на изготовление рефлекторов и линз. Кроме того, такие коллекторы нуждаются в использовании специальных следящих систем. Коллекторы используются в основном на солнечных электростанциях или тогда, когда технический результат преобладает над денежными затратами.

Основной конструктивной составной гелиоколлектора является теплоприемный элемент (ТПЭ), то есть абсорбер, который поглощает солнечное излучение и передает энергию теплоносителю, который движется внутри элемента.

Изоляция уменьшает отдачу тепловой энергии в окружающую среду. Как теплоизолятор чаще всего используются минеральная вата, полиуретан, пеностекло, асбестовый войлок, пенопласт, пенополиуретан и т. п. В современных конструкциях коллекторов преимущество отдают пенополиуретановым изделиям из-за его пористо-полостной структуры, которая не поглощает атмосферной влаги и надолго сохраняет теплоизолирующие свойства [2].

Для улучшения равномерности затрат теплоносителя по ширине ТСЭ используют распределительные каналы или дополнительно устанавливают медные либо латунные трубки, в которых находят соли кристаллогидрата.

*Теоретические исследования.* Коэффициент восприятия солнечной энергии раскладывается на составные части, то есть:

$$\gamma_{\text{ТК}} = \varepsilon_{\text{скл}} \cdot \varepsilon_{\text{ТСЭ}} \cdot m_{\text{заб}} \cdot D_{\text{скл}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{скл}}$  – степень черноты стекла ( $\varepsilon_{\text{скл}} = 0,93 \dots 0,94$ );  $\varepsilon_{\text{ТСЭ}}$  – степень черноты теплопринимающего элемента (при нанесении на поверхность ТСЭ черной краски или покрытия с

высоким коэффициентом поглощения и низким коэффициентом отбивания ( $\varepsilon_{\text{ТСЭ}} = 0,92 \dots 0,96$ );  $m_{\text{заб}}$  – коэффициент загрязнения стекла (при едва заметном загрязнении стекла  $m_{\text{заб}} = 0,80 \dots 0,90$ ; при значительном опылении  $m_{\text{заб}} = 0,50 \dots 0,70$ );  $D_{\text{скл}}$  – коэффициент пропуска стекла, который зависит от качества стекла, его толщины и угла падения солнечных лучей на поверхность стекла, а также количества прозрачных (стеклянных) преград.

В случае, когда солнечный луч падает четко перпендикулярно на поверхность стекла ( $\theta_{\text{пад}} = 0$ ), то коэффициент пропуска его определяется по формуле

$$D_{\text{скл}} = \exp(-A_{\lambda} \cdot \delta_{\text{скл}}), \quad (2)$$

где  $A_{\lambda}$  – показатель поглощения стекла солнечного излучения;  $A_{\lambda} = 30 \text{ м}^{-1}$ .

Допустив, что коэффициент преломления не зависит от длины волны монохроматического излучения, значение монохроматической полусферической степени черноты для «беспределенно толстого» пласта ( $D_{\lambda} \approx 0$ ) стекла с показателем его преломления  $n = 1,52$ , можно принять, что  $\varepsilon_{\text{скл}} = 0,91$ .

Количество излучаемой энергии материалом определяется в общем случае формулой [3]:

$$E_{\text{выпр}} = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T^4, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  – постоянная Стефана – Больцмана,  $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ , или  $1 / 64,54 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ .

Чем большее соотношение  $A_{\lambda} / \varepsilon_{\lambda}$ , тем больше солнечной энергии будет аккумулировать материал. Это указывает на то, что принимающие поверхности гелиоколлектора необходимо делать черного цвета.

При обычных толщинах стекла (в несколько миллиметров), в частности 4 мм, стекло не может быть «беспределенно толстым», и температурная зависимость ( $\varepsilon_{\lambda} \cdot \delta$ ) будет определяться температурной зависимостью показателя поглощения  $m_{\lambda}$  ( $\text{см}^{-1}$ ). В связи с тем, что при длинах волн  $\lambda > 5 \text{ мкм}$  все кривые  $\varepsilon_{\lambda}$  сближаются, для низких температур излучаемая способность стекла направляется к границе величины степени черноты для пласта «безграничной толщины», то есть  $\varepsilon_{\lambda \text{скл}} = 0,91$ . Это означает, что обычное стекло имеет относительно высокую прозрачность для солнечного излучения, но плохую теплоизоляцию (коэффициент теплового сопротивления равен 1). Поэтому двойное застекление целесообразно использовать в сушильных установках или в помещениях зданий, которые располагаются в регионах с теплым климатом [4].

Одинарное застекление используется одновременно с материалом, который хорошо поглощает влагу (чаще всего силикон). В случае

двойного застекления, а также между одинарным стеклом и теплоизолирующим материалом (аккумулятором солнечной энергии) возникает закрытое воздушное пространство, которое действует увеличению теплового сопротивления (последний  $R_t = 1,8...2,1 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$ ).

Между гелиоколлектором и воздухом, который окружает коллектор, проходит очень сложный теплообмен за счет теплопроводности, конвекции (свободной или принудительной) и теплового излучения. При расчетах такого сложного теплообмена его раскладывают на простые составляющие и каждую из них (теплопроводность, конвекцию, тепловое излучение) рассчитывают отдельно, а потом их значения суммируются.

Поэтому при проведении проектировочных работ задают или выбирают наиболее вероятные условия работы гелиоколлектора и считают их постоянными (неизменными во времени), а теплофизические свойства материалов, из которых изготовлены коллекторы, принимают не зависящими от температуры. При этом кондуктивными (контактными) термическими сопротивлениями (теплопроводностью) с обеих сторон теплоизолированного пласта коллектора пренебрегают.

Лучевой теплообмен между двумя телами, которые принимают участие в теплообмене, выражают через лучевой коэффициент теплообмена, то есть

$$\lambda_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{пр}}}{F_{\text{опр}}(T_1 - T_2)}, \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}, \quad (4)$$

где  $Q_{\text{пр}}$  – лучевой поток, Вт.

Значения  $Q_{\text{пр}}$  определяют формулой

$$Q_{\text{пр}} = \overline{\varepsilon_{\text{пр}}} \cdot \sigma_0 \cdot F_{\text{опр}} \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

где  $\overline{\varepsilon_{\text{пр}}}$  – приведенная (интегральная) степень черноты двух тел, которые принимают участие в лучевом теплообмене:  $(\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / ((\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2}) - 1))$ ;

$\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}^4$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $F_{\text{опр}}$  – поверхность облучения,  $\text{м}^2$ .

В условиях работы плоских гелиоколлекторов, то есть когда  $0,90 < \frac{T_2}{T_1} \leq 1,10$ , можно пользоваться средним значением температуры, то есть

$$\overline{T_{\text{ср}}} = \left( \frac{T_1 + T_2}{2} \right). \quad (6)$$

Тогда

$$\frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 \right] = 0,040 \left( \frac{\overline{T_{\text{ср}}}}{100} \right)^3. \quad (7)$$

Таким образом, величину  $\lambda_{\text{пр}}$  можно определить формулой [1].

$$\lambda_{\text{пр}} = 0,227 \cdot (\varepsilon_{\text{пр}} \cdot \left( \frac{T_1 + T_2}{100} \right)^3). \quad (8)$$

Конвекционную составляющую теплообмена в промежутке между стеклом и теплоприемной поверхностью (ТПЭ) аккумулятора солнечной энергии определяют по формуле

$$q_{\text{конв}} = \frac{\lambda_{\text{пов.м}}}{\delta_{\text{пов}}} \cdot m_{\text{к.пр}} \cdot (T_{\text{пов}} - T_{\text{скл}}) = \lambda_{\text{к.пр}} (T_{\text{пов}} - T_{\text{скл}}), \quad (9)$$

где  $\lambda_{\text{пов.м}}$  – коэффициент теплопроводности воспринимающей поверхности ТСЕ,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$ ;  $\delta_{\text{пов}}$  – толщина воздушной прослойки, м;  $m_{\text{к.пр}}$  – коэффициент, который учитывает увеличение теплопроводности промежутка (прослойки) за счет свободной конвекции в коллекторе.

Коэффициент теплообмена в воздушной прослойке между стеклом и ТПЭ:

$$\lambda_{\text{к.пр}} = m_{\text{к.пр}} \cdot \frac{\lambda_{\text{пов}}}{\delta_{\text{пр}}}, \text{ Вт}/\text{м}^2 \cdot \text{К}. \quad (10)$$

В коллекторах произведение критериев Грасгофа (Gr) и Прандтля (Pr)  $(Gr \cdot Pr) \geq 103$ . Это значит, что

$$m_{\text{к.пр}} = 0,18(Gr \cdot Pr)^{0,25}; \quad (11)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \delta_{\text{пр}}^3}{\nu_{\text{пов}}^2} \cdot \left( \frac{T_{\text{пов}} - T_{\text{скл}}}{T} \right), \quad Pr = \frac{\nu_{\text{пов}}}{a_{\text{пов}}}, \quad (12)$$

где  $\nu_{\text{пов}}$  – коэффициент климатической вязкости воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $a_{\text{пов}}$  – коэффициент температуропроводности воздуха при средней температуре,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Тогда, с учетом значения теплофизических свойств воздуха при средней температуре формула для определения коэффициента теплообмена имеет вид

$$\lambda_{\text{к.пр}} = 1,94 \sqrt[4]{\frac{T_{\text{пов}} - T_{\text{скл}}}{\delta_{\text{пр}} \cdot T}}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}). \quad (13)$$

Конвективный теплообмен между внешней поверхностью коллектора и внешним окружающим атмосферным воздухом (когда коллектор непосредственно контактирует с атмосферой) может осуществляться свободной

(при безветренной погоде) или смешанной (свободной и принудительной) конвекцией, когда есть ветреная погода. Поэтому при расчетах тепловых потерь из коллектора берется средняя скорость движения воздуха в теплую пору года в зависимости от местности региона Украины [5].

Коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции определяют формулой

$$Nu = 0,15 \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,33}, \quad (14)$$

где  $Nu$  ( $Nu = \frac{\lambda_{к.пр}}{\lambda_{пов}} \cdot L_{ГК}$ ,  $L_{ГК}$  – длина коллектора) –

критерий Нуссельта.

Приближенное значение коэффициента конвективно-лучевого теплообмена  $\lambda_{к.пр}$  рассчитывается по формуле

$$\lambda_{к.пр} = 1,83 \sqrt[3]{T_{скл} - T_{н.с}}, \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°C}, \quad (15)$$

где  $T_{н.с}$  – температура окружающего внешнего воздуха, К.

В случае вынужденной конвекции воздуха

$$Nuf = 0,032 \cdot Re_f^{80}, \quad (16)$$

где  $Re_f$  – критерий Рейнольдса при средней температуре  $\bar{t}$  ( $\frac{t_{н.с} + t_{скл}}{2}$ ).

Таким образом, коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции:

$$\lambda_{н.с} = 5,30 \cdot \omega_{пов}^{IX}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}. \quad (17)$$

В случае смешанной конвекции для определения тепловых потерь необходимо рассчитать коэффициенты теплообмена при свободной и вынужденной конвекции и наибольший из них принять за расчетный.

Тепловые потери с тыльной стороны гелиоколлектора определяются термическим сопротивлением изоляционного материала и окружающего воздуха, который окружает коллектор с обратной стороны [6]. В связи с этим термосопротивление изоляции значительно больше внешнего термосопротивления, то есть

$$\frac{\delta_{из}}{\lambda_{из}} \gg \frac{1}{(\lambda_{н.с} + \lambda_{пр})}, \quad (18)$$

Внешним термосопротивлением пренебрегают и считают, что температура на внешней поверхности изоляции (из тыла) равна температуре окружающего среды. Это значит, что коэффициент теплопередачи  $K_{T_{из}}$  можно выразить следующей формулой:

$$K_{T_{из}} = \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}}. \quad (19)$$

**Вывод.** Таким образом, изменение условий работы гелиоколлектора, то есть контакта с окружающим воздухом, приводит к изменению тепловых потоков из лицевой стороны (со стороны прозрачной поверхности), что будет вызывать определенные изменения тепловых потерь в окружающую среду.

### Литература

1. Применение солнечной энергии в жилом хозяйстве и деревообработке: І. М. Озарків [і інш.]. Львов: НВФ «Українські технології», 2012. 338 с.
2. Kolektorysłoneczne: energiasłoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnymprzemysle. G. Wiśniehiski [i in.]. Warszawa: Medium, 2008. 201 s.
3. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков: монография / К. Я. Кондратьев [и др.]. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 232 л.
4. Жданов Ю. А. Расчет солнечных систем горячего водоснабжения с суточным циклом аккумуляции тепла // Гелиотехника. 1989. № 2. С. 43–47.
5. Кудря С. О., Головки В. М. Основи конструювання енергоустановок з відновлюваними джерелами енергії: курс лекцій. Ніжин: Аспект-Поліграф, 2005. 131 с.
6. Geletka V., Sedlakova A. Impact of Shape of buildings on Energy Consumption // Вісник НУ «Львівська політехніка», «Теорія і практика удівництва». 2012. № 737. С. 252–259.

Поступила 03.03.2014