

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Дорошенко А.В., Шестопалов К.А.
(Одесская государственная академия холода)

Аннотация. В работе описана методология создания нового поколения солнечных плоских коллекторов для систем тепло- и холодообеспечения на основе использования многослойных, многоканальных структур из полимерных материалов в их конструкции. разработана модель рабочих процессов, происходящих в солнечном коллекторе, с учетом механизма тепловых потерь конвекцией и излучением. по предложенной модели были получены характеристики температуры теплоносителя и его расхода от времени суток (в зависимости от изменения интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды), которые хорошо согласуются с экспериментальными данными.

PERSPECTIVELE DE DEZVOLTARE A ENERGETICII SOLARE

Doroşenco A.V., Şestopalov C.A.

(Academia de Stat a tehnicii frigorifice din Odesa)

Rezumat. În lucrare este descrisă metodologia de creare a noii generații de colectoare plate solare pentru sistemele de încălzire și răcire pe baza utilizării structurilor multistratificate cu multe canale create din materialele polimerice în construcția lor. Este elaborat modelul proceselor de lucru, petrecute în colectorul solar, luând în considerație pierderile termice, convecția și iradiația. După modelul propus au fost obținute caracteristicile temperaturii agentului termic și consumului lui în dependență de orele de lucru (în dependență de intensitatea radiației solare și temperatura aerului exterior) care se corespund bine datelor experimentale.

FUTURE TRENDS IN SOLAR ENERGETICS

Doroshenko A.V., Shestopalov K.A.

(Odessa State Academy of Refrigeration)

Abstract. In the work the methodology of new generation solar flat collectors creation for heating and cooling systems warmly is described on the basis of use of multilayered, multichannel structures made of polymeric materials in their design. The model of the working processes occurring in a solar collector is developed, in view of the mechanism of thermal losses by convection and by radiation. On the offered model characteristics of temperature of the heat-carrier and its charge from time of day (have been received depending on change of intensity of a sunlight and an ambient temperature) are well correlated with the experimental data.

Авторами был выполнен анализ и выбор материалов для создания водяного и воздушного СК из полимерных материалов для альтернативных систем. Переход к полимерным материалам в конструкции коллектора обеспечивает снижение веса СК; снижение стоимости СК и гелиосистемы в целом за счет исключения цветных металлов в конструкции; снижение вредных экологических последствий в полном цикле «жизни» нового типа СК.

А. Madhlopa, R. Mgawi, J. Taulo [1] изучали вопросы, связанные со стратификацией в интегрированном солнечном коллекторе-аккумуляторе с двумя горизонтальными баками. Maatouk Khoukhi, Shigenao Maruyama [2] изучали потери в солнечном коллекторе, вызванные конвективными и радиационными составляющими от абсорбера, учитывая остекление, а также скорость ветра над прозрачным покрытием. Michael Kohl и др. [3] рассматривали, какие полимерные материалы могут быть использованы в конструкции солнечных коллекторов при их остеклении. D.S. Kim, C.A. Infante Ferreira [4] проводят большой обзор холодильных солнечных систем с традиционными СК. H.M. Yeh, C.D. Ho, J.Z. Hou [5] изучали влияние одного или нескольких листов стекла, расположенных над и под абсорбером в воздушном СК, на его эффективность. Rajenda Karwa, S.N. Garg, A.K. Arya [6] рассматривают эффективность воздушного СК, изготовленного из модулей, соединенных параллельно или комбинировано. Ho-Ming Yeh и др. [7] изучают баланс энергии и массы в солнечном дистилляторе открытого типа.

Nielsen J.E. и Bezzel E. [8] рассматривали создание полимерного СК, в котором интегрированы прозрачное покрытие, абсорбер, тепловая изоляция и корпус в единой цельной структуре, состоящей из полностью прозрачной четырехстенной плиты с каналами. Боковые каналы служат корпусом и тепловой изоляцией, верхние каналы - прозрачным покрытием, нижние каналы – тепловой изоляцией. Оставшиеся каналы в центре плиты, соединенные с гидравлическим коллектором и заполненные абсорбирующей жидкостью.

J. Rekstad [9] представил данные исследований полимерного СК, прозрачное покрытие которого было изготовлено из панели прозрачного сотового поликарбоната толщиной 6 мм, а абсорбер – из такой же панели толщиной 10 мм, заполненной керамическими гранулами, которые используются для интенсификации теплообмена между теплоносителем и солнечными лучами и для интенсификации циркуляции теплоносителя за счет капиллярных сил.

Существует большое количество полимеров, которые потенциально могут быть использованы в конструкции плоского СК - полипропилен, полиметилметакрилат, поликарбонат, полисульфон, полиэстерсульфон, полиамид, аморфный полиамид, волокнистые пластики, поливинилхлорид, полиметилпропилен, акрил. Долгосрочное использование СК в открытой среде выдвигает ряд жестких требований к конструкционным материалам. При выборе полимерных материалов необходимо руководствоваться следующими требованиями: минимальная оптическая прозрачность материала не ниже 75%; рабочие температуры (устойчивость материалов) в диапазоне от -15 до $+130^{\circ}\text{C}$; стабильность к ультрафиолетовому излучению (УФИ). Анализ ПМ показывает, что лишь немногие из них пригодны для такого специфического применения. Полипропиленовые и полистироловые пластмассы непригодны из-за плохих оптических свойств, полисульфон и полиэстерсульфон стабильны к УФИ, но имеют нежелательный желтый цвет и слишком низкую оптическую прозрачность для такого применения. Аморфный полиамид можно сделать довольно прозрачным, но он чувствителен к гидролизу и нестабилен к УФИ. Акрил обладает отличной стойкостью к УФИ, но хрупок и используется только при температурах ниже 90°C .

Солнечный коллектор (СК) основной элемент солнечной установки, в котором солнечное излучение преобразуется в тепловую энергию. Все СК имеют общую деталь – поверхностный или объемный поглотитель тепла, которое может отводиться из коллектора, или аккумулироваться в нем. СК первого типа называются проточными, второго типа – с тепловым аккумулятором.

Самое большое распространение в мировой практике получили плоские СК (flat plate solar collector) из-за простоты конструкции и дешевизны. К числу принципиальных преимуществ таких СК по сравнению с коллекторами других типов относится их способность улавливать как прямую (лучистую), так и рассеянную солнечную энергию и, как следствие этого, возможность стационарной установки СК без необходимости в сложных системах слежения за солнцем.

Общий недостаток СК открытого типа – высокие тепловые потери, вследствие теплообмена между теплоносителем и светопрозрачным остеклением. Лучшие теплотехнические показатели имеют жидкостные проточные коллекторы с поглотителями в виде плоской панели с каналами. Выполняют такие панели из металла, пластмасс или ламинированных тканей. Можно существенно увеличить эффективность СК, применяя селективные покрытия, обеспечивающие высокую поглощающую способность по отношению к солнечному излучению и низкую собственную излучательную способность. Основными характеристиками любых СК является

уровень рабочих температур, оптический КПД θ , коэффициент потерь U , Вт/(м²·°С) и общий КПД.

В качестве полимера, пригодного к использованию в конструкции СК нами был выбран поликарбонат. Плита сотового поликарбоната представляет собой два параллельных листа с поперечными перегородками в цельной единой структуре. Температурный диапазон эксплуатации для поликарбоната: от -40 до +120°С, что позволяет использовать его в «открытых» системах. Максимальное термическое расширение (при $\Delta T = 80^\circ\text{C}$) составляет 2,5 мм/м. Светопропускная способность полимеров имеет большое значение при их выборе для использования в качестве прозрачного покрытия СК. Панели поликарбоната имеют светопропускание 70 – 82%, в зависимости от их толщины. Панели толщиной 4 мм с наибольшим светопропусканием были выбраны в качестве прозрачного покрытия (конструкция СК-П по рисунку 1), т.к. у них наибольшее светопропускание по сравнению с панелями больших толщин.

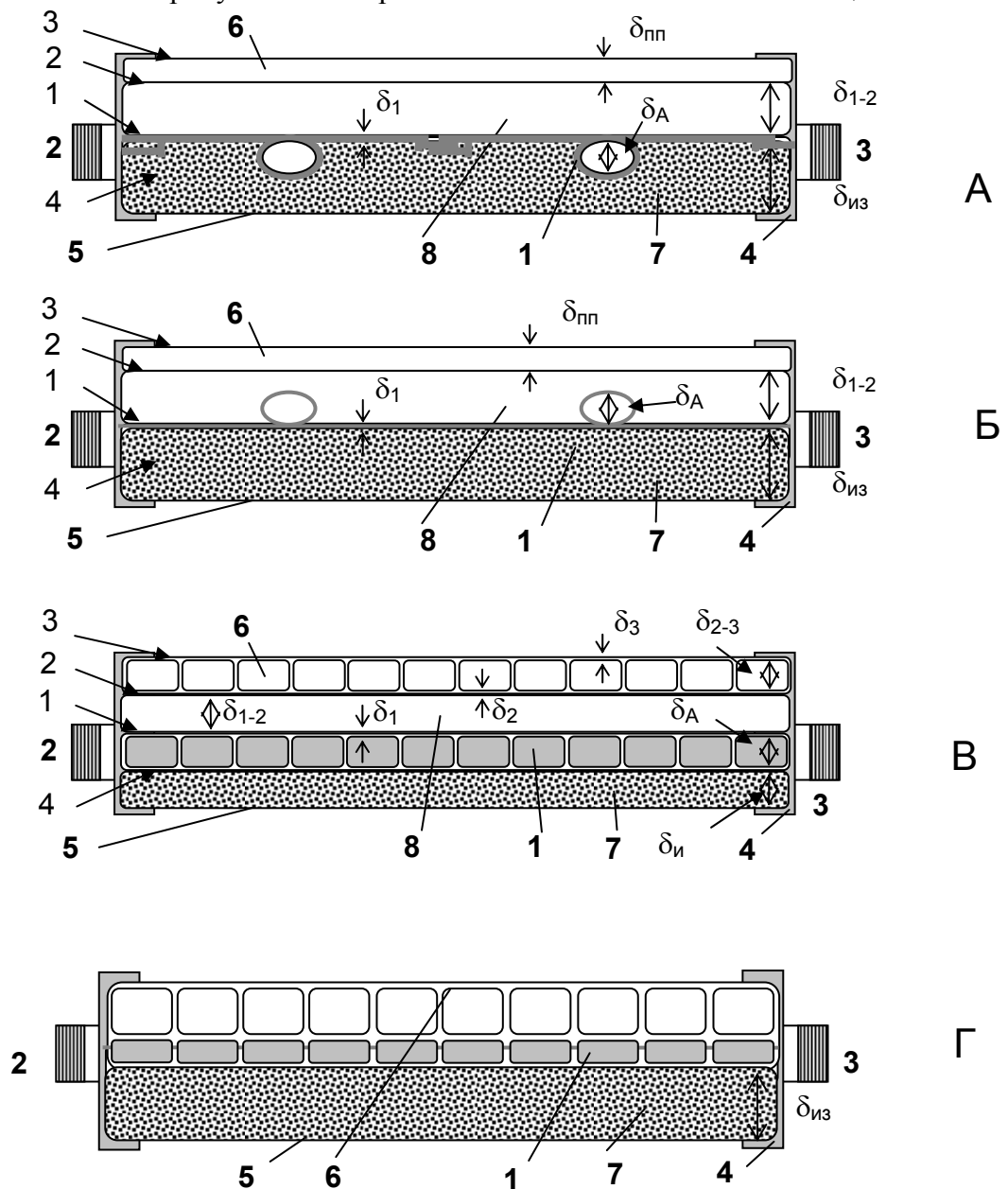


Рис.1. Принципиальные схемы разработанных плоских солнечных коллекторов.

- А - общий вид СК-А;
- Б - переходной тип СК-М (патенты Украины №№ 74521, 74522);
- В - полимерный тип СК-П с воздушным зазором;
- Г - полимерный тип СК-П без воздушного зазора.

Обозначения: 1 – трубный регистр абсорбера (многоканальная полимерная плита для СК-П); 2,3 – трубы гидравлического коллектора; 4 – корпус СК; 5 – металлический лист; 6 – прозрачная изоляция; 7 – теплоизоляция; 8 – воздушный зазор.

Поликарбонат устойчив ко многим химическим веществам, включая минеральные кислоты высокой концентрации, ко многим органическим кислотам, нейтральным и кислым растворам солей, многим жирам, парафинам, насыщенным алифатам и циклоалифатам, кроме метилового спирта. Поликарбонат разрушается водным или спиртовым раствором щелочей, аммиаком или его растворами и аминами. Степень чувствительности к воздействию химических соединений зависит от таких факторов, как концентрация, температура, продолжительность контакта с поверхностью панели, давления, а также напряжений в панели. Это делает поликарбонат приемлемым для создания солнечного коллектора СК-П и особенно коллектора-регенератора СК-Р, где имеет место прямой контакт материала и абсорбента.

Основная масса СК производится из цветных металлов (алюминий, медь) – абсорбер и корпус. Примером такого коллектора может служить СК-А, представленный на рисунке 1. В качестве абсорбера здесь используются трубы с цельнотянутыми ребрами, выполненные методом экструзии из алюминиевого сплава. В качестве прозрачного покрытия используется оконное стекло толщиной 4 мм. Вес коллектора площадью 1,1 м² составляет 23 кг. В СК-А трубы абсорбера соединены с гидравлическим коллектором методом аргонной сварки. Вопрос о ресурсе алюминия в открытой среде и в среде теплоносителя остается открытым. Способ изготовления абсорбера (методом экструзии, как единое изделие «труба/ребро») приводит к минимальному термическому сопротивлению. Алюминиевый корпус приводит к необходимости использования резиновой прокладки для стекла.

Использование сотовых поликарбонатных панелей в качестве стекла позволяет снизить вес СК. На рисунке 1 представлен СК-М, в котором стеклянное прозрачное покрытие заменено на поликарбонатную плиту сотовой структуры. В качестве абсорбера были использованы медные профилированные трубы, плотно прижатые к металлическому листу жестким зажимом. Оптимально здесь использовать теплопроводный клей или пайку для крепления труб абсорбера к металлическому листу. Для уменьшения термического сопротивления в месте контакта труба – металлический лист, были изготовлены специальные профилированные трубы для увеличения площади соприкосновения. Вес такого СК составляет 15 кг/м² площади коллектора. Использование поликарбонатной сотовой плиты позволило отказаться от использования резиновых прокладок и от необходимости специальных крепежных элементов, что упростило конструкцию и уменьшило стоимость изделия. Толщина медно-полимерного СК составила 60 мм по сравнению со 108 мм для алюминиевого образца СК.

Использование цветных металлов, их обработка и соединение является основным фактором высокой себестоимости металлических СК. Создание полностью полимерного СК было вторым шагом на пути использования полимерных материалов в конструкции СК. На рисунке представлен СК-П, полностью выполненный из

полимерных материалов. В качестве прозрачного покрытия ПП и абсорбера (теплоприемника) А здесь применяются плиты сотового поликарбоната различных толщин: для прозрачного покрытия – 4 мм, для абсорбера плиты 8 – 10 мм.

В некоторых конструкциях рекомендуется использовать в качестве изоляции также плиту сотового поликарбоната, т.к. он обладает хорошими теплоизоляционными свойствами.

При производстве традиционных металлических СК, в которых абсорбер выполнен из алюминия или меди, используется аргонная сварка или пайка для соединения труб абсорбера с гидравлическим коллектором и при соединении трубок абсорбера с ребрами. При использовании сотовых поликарбонатных плит в качестве абсорбера, возникают проблемы его соединения с гидравлическим коллектором, т.к. нужно учитывать колебания температур и, связанные с этим, термические расширения материалов.

В разработанных схемах альтернативных систем в качестве греющего источника используется гелиосистема с плоскими СК. Обычно гелиосистема включает в себя систему СК, теплоизолированный бак-теплоаккумулятор БТА и систему опускных и подъемных трубопроводов. Циркуляция теплоносителя осуществляется естественным образом за счет разности плотностей в опускной и подъемной частях гелиосистемы, либо принудительно с помощью насоса.

Моделирование рабочих процессов в плоском полимерном солнечном коллекторе.

В качестве абсорбера в полимерном СК используется полимерная плита; внутренние ребра-перегородки абсорбера расположены перпендикулярно ребрам прозрачного покрытия. В СК между абсорбером и прозрачным покрытием находится воздушный зазор δ_{1-2} . Распределения температур каждого элемента СК, включая теплоноситель, определяем на основании уравнений теплового баланса. При выводе уравнений, сделаем следующие допущения:

- режим работы солнечного коллектора – стационарный;
- градиентом температуры теплоносителя по периметру канала можно пренебречь;
- температура каждого покрытия изменяется только по направлению движения теплоносителя;
- свойства материала полимерных панелей и теплоносителя не зависят от температуры;
- поглощение солнечной энергии покрытиями коллектора не влияет на потери коллектора в целом.

В рассматриваемой конструкции полимерного СК черновое покрытие нанесено на нижнюю сторону абсорбера, поэтому над плитой абсорбера находится еще три полимерные плиты: 1 – прозрачная сторона абсорбера, 2 и 3 – стенки прозрачного покрытия. Коэффициенты теплоотдачи (их радиационные и конвективные составляющие) можно рассчитать по известным выражениям [11].

Для наружной поверхности коллектора (покрытия 3, здесь индексы: О – для окружающей среды, П – для прозрачного покрытия) можно использовать зависимости:

$$\alpha_{\text{по}}^{\text{к}} = (5.7 + W), \quad (1)$$

$$\alpha_{\text{по}}^{\text{р}} = \varepsilon_{\text{п}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{п}} + T_{\text{о}}) \cdot (T_{\text{п}}^2 + T_{\text{о}}^2), \quad (2)$$

где: α^k и α^p – конвективная и радиационная составляющие коэффициента теплоотдачи, Вт/(м²·К); w – скорость ветра, м/с; $\varepsilon_{\text{п}}$ – степень черноты; σ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м⁴·град²).

Для всех внутренних полостей коллектора, и, в частности, для поверхности абсорбера (индекс А):

$$\alpha_{\text{АП}}^k = \left[1 - 0.0018 \left(\frac{T_A}{2} + \frac{T_{\text{п}}}{2} - 10 \right) \right] \cdot \left[1 - (\beta - 45)(0.00259 - 0.00144 \cdot \varepsilon_{\text{п}}) 1.14 \frac{(T_A - T_{\text{п}})^{0.31}}{\delta_{\text{АП}}^{0.07}} \right] \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{АП}}^p = \sigma \cdot (T_A + T_{\text{п}}) \frac{T_A^2 + T_{\text{п}}^2}{\frac{1}{\varepsilon_A} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{п}}} - 1}, \quad (4)$$

где: β – угол наклона СК к горизонту, град; $\delta_{\text{АП}}$ – расстояние между поверхностями (абсорбером и прозрачным покрытием – воздушный зазор), мм. Термическое сопротивление на каждом участке СК определяют коэффициент потерь по формуле $U_i = R_i$, где U_i – коэффициент потерь на каждом участке СК, Вт/(м²·град); R_i – термическое сопротивление на каждом участке СК, (м²·К)/Вт.

Для абсорбера добавятся следующие формулы:

$$\alpha_{\text{А1}}^k = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{ж}}}{d_{\text{э}}}, \quad \alpha_{\text{Аж}}^k = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{ж}}}{d_{\text{э}}},$$

где: $\lambda_{\text{ж}}$ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К); $d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр канала абсорбера, мм. В дальнейшем будут использоваться следующие обозначения:

$\alpha_{\text{А1}}^p$, $\alpha_{\text{А2}}^p$, α_{23}^p , α_{30}^p – радиационные составляющие тепловых потерь с нижней поверхности абсорбера к верхней, в воздушном зазоре, с нижней поверхности прозрачного покрытия к верхней, с поверхности прозрачной изоляции (поликарбонатной плиты) в окружающую среду соответственно, Вт/(м²·К);

$\alpha_{\text{А1}}^k$, $\alpha_{\text{Аж}}^k$, α_{12}^k , α_{23}^k , α_{30}^k – конвективные составляющие теплоотдачи от верхней и нижней поверхности абсорбера жидкости, тепловых потерь в воздушном зазоре, между нижней и верхней поверхностью прозрачного покрытия и с поверхности прозрачного покрытия, Вт/(м²·К).

В начальном приближении теплового расчёта СК пренебрегаем влиянием рёбер жёсткости полимерных панелей. В таком случае тепловой расчёт полимерного коллектора аналогичен расчёту обычных коллекторов с двойным остеклением. Рассмотрим существующие уравнения теплового баланса для каждого элемента коллектора.

Поверхность 3+ (наружная поверхность покрытия):

$$\begin{cases} q_{30}^+ = (\alpha_{30}^k + \alpha_{30}^p) \cdot (T_3^+ - T_0); \\ q_3^+ = q_3^\lambda = -\frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot (T_3^+ - T_3^-); \end{cases} \quad (5)$$

где: λ_3 – коэффициент теплопроводности второго прозрачного покрытия (поликарбоната), Вт/м·К; δ_3 – толщина стенки (поликарбоната), мм. В последующих формулах λ_i и δ_i соответствуют коэффициенту теплопроводности и толщине соответствующего элемента СК.

Аналогичные уравнения можно записать для остальных прозрачных поверхностей.

Приёмная поверхность А:

$$\begin{cases} q_A^+ = -\alpha_{A1}^p \cdot (T_A^+ - T_1^-) - \alpha_{A1}^k (T_A^+ - T_{ж}) + J; \\ q_A^\lambda = \frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot (T_A^+ - T_A^-); \\ q_A^- = \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot (T_A^- - T_0). \end{cases} \quad (6)$$

Для жидкости в каналах абсорбера:

$$c_{ж} \cdot G_{ж} dT = dQ; \quad G_{ж} = \rho_{ж} \cdot \delta_A \cdot h \cdot V_{ж}; \\ dQ = [\alpha_1^- \cdot (T_1^- - T_{ж}) + \alpha_A^+ \cdot (T_A^+ - T_{ж})] h dx;$$

$$\begin{cases} c_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot \delta \cdot h \cdot V_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} = [\alpha_1^- \cdot (T_1^- - T_{ж}) + \alpha_A^+ \cdot (T_A^+ - T_{ж})] h dx; \\ c_{ж} \rho_{ж} \delta_A V_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} = \alpha_1^- (T_1^- - T_{ж}) + \alpha_A^+ (T_A^+ - T_{ж}). \end{cases} \quad (7)$$

$$\alpha_{1ж}^k = \alpha_1^- = \alpha_A^+ = \alpha_{A1}^k = \alpha_{ж}^k;$$

$$c_{ж} \rho_{ж} \delta_{A1} V_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} = \alpha_{ж}^k (T_1^- - T_{ж}) + \alpha_{ж}^+ (T_A^+ - T_{ж}) \quad (8)$$

Окончательно для покрытия 3 получаем уравнение:

$$U_{30} \cdot (T_3 - T_0) = U_{23} \cdot (T_2 - T_3) \quad (9)$$

где:

$$\begin{aligned}
 U_{30} &= \left[\frac{1}{\alpha_{30}^k + \alpha_{30}^p} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right]^{-1}; \\
 U_{23} &= \left[\frac{1}{\alpha_{23}^k + \alpha_{23}^p} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right]^{-1}.
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

Для покрытия 2 получаем следующие уравнения:

$$U_{23} \cdot (T_2 - T_3) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2) \tag{11}$$

где:
$$U_{12} = \left[\frac{1}{\alpha_{12}^k + \alpha_{12}^p} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} \right]^{-1}. \tag{12}$$

Для покрытия 1 получаем:

$$-\alpha_{1ж}^p \cdot (T_1 - T_{ж}) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2) \tag{13}$$

$$-\alpha_{A1}^p \cdot (T_A^+ - T_1^-) - \alpha_{A1}^k \cdot (T_A^+ - T_{ж}) + J = \frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot (T_A - T_A^-) = \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot (T_A^- - T_0)$$

$$\frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot (T_A - T_A^-) = \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot (T_A^- - T_0)$$

$$T_A^- \cdot \left[\frac{\lambda_A}{\delta_A} + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \right] = \frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot T_A + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot T_0$$

$$T_A^- = \frac{\frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot T_A + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot T_0}{\frac{\lambda_A}{\delta_A} + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}}}$$

$$T_A^- - T_0 = \frac{\frac{\lambda_A}{\delta_A} \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} (T_A - T_0)}{\frac{\lambda_A}{\delta_A} - \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}}}$$

$$U_A^{из} = \left[\frac{\lambda_A}{\delta_A} + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \right]^{-1}$$

Для покрытия А (приёмной поверхности абсорбера):

$$-\alpha_{A1}^p \cdot (T_A - T_1) - \alpha_{A1}^k \cdot (T_A - T_{ж}) + J = -U_A^{из} \cdot (T_A^- - T_0) \quad (14)$$

Таким образом, в первом приближении, тепловой расчёт полимерного коллектора определяется следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{30} \cdot (T_3 - T_0) = U_{23} \cdot (T_2 - T_3); \\ U_{23} \cdot (T_2 - T_3) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2); \\ -\alpha_{1ж} \cdot (T_1 - T_{ж}) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2); \\ -\alpha_{A1}^p \cdot (T_A - T_1) - \alpha_{A1}^k \cdot (T_A - T_{ж}) + J = -U_A^{из} \cdot (T_0 - T_A); \\ c_{ж} \cdot \delta_A \cdot \rho_{ж} \cdot V_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} = \alpha_{ж}^- (T_1 - T_{ж}) + \alpha_A^+ (T_A - T_{ж}); \\ \text{при } x = 0, T_{ж} = T_0. \end{array} \right. \quad (15)$$

Решением этой системы является система, описывающая изменение температуры жидкости по длине канала полимерной плиты абсорбера:

$$T_{ж}(x) = \frac{b_0 T_0 + I}{b_{ж}} \left(e^{\frac{b_{ж}}{a_{ж}} x} - 1 \right) + T_{ж}^0, \quad (16)$$

где:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{ж} = \frac{c_{ж} \times d_A \times r_{ж} \times V_{ж}}{a_{ж}^k}; \\ b_{ж} = c_{ж} K_A - 2K_A + a_A^p \times c_{ж} + a_{A1}^k; \\ b_0 = c_0 K_A + a_{A1}^p \times c_0 + U_A^{из}; \\ c_{ж} = \frac{K_{ж}}{K_{ж} + K_0}; \\ c_0 = \frac{K_0}{K_{ж} + K_0}; \\ K_{ж} = a_{1ж} \times (U_{23} \times U_{30} + U_{12} \times U_{30} + U_{12} \times U_{30}); \\ K_0 = U_{12} \times U_{30} \times U_{23}; \\ K_A = a_{A1}^p + a_{A1}^k + U_A^{из}. \end{array} \right. \quad (17)$$

В действительности при расчёте солнечного коллектора вводятся такие допущения:

- Поток солнечного излучения распределен равномерно по пластине коллектора.
- Влиянием процессов протекающих в прозрачном покрытии пренебрегаем.
- Температурный напор между верхней и нижней поверхностью прозрачного покрытия пренебрежимо мал, то есть $T_2 = T_3$.

С такими допущениями полный коэффициент тепловых потерь СК определяется по формуле:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{12}^k + \alpha_{12}^p} + \frac{1}{\alpha_{20}^k + \alpha_{20}^p}} + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}}. \quad (18)$$

На рисунке 2 приведены результаты расчетов тепловой эффективности (коэффициента тепловых потерь) для традиционного коллектора СК-А и полимерного коллектора СК-П для параметров: $t_0 = 20^\circ\text{C}$; $t_1 = 50^\circ\text{C}$; $\beta = 30^\circ$; $\delta_{1,2} = 3 \text{ см}$, $\delta_{из} = 3 \text{ см}$; $\lambda_{из} = 0,04 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $\delta_{2,3} = 4 \text{ мм}$; $W = 0$; величины δ_0 , δ_1 и δ_2 брались из паспортных данных для поликарбонатных панелей фирмы «Полигаль».

Коэффициент тепловых потерь у СК-П меньше, чем у СК-А, что связано, в первую очередь, с большим термическим сопротивлением прозрачного покрытия (поликарбонатная панель, в СК-А использовалось в качестве ПП простое стекло). При увеличении $\delta_{2,3}$ от 4 до 6 мм, величина U уменьшается незначительно, т. к. уменьшение $\alpha_{2,3}^k$ компенсируется тепловым потоком по ребрам (для этих панелей δ_0 было одинаково). При увеличении $\delta_{2,3}$ от 6 до 8 мм компенсация выражена значительно меньше, т. к. δ_2 изменяется мало, а δ_0 увеличивается почти в 2 раза.

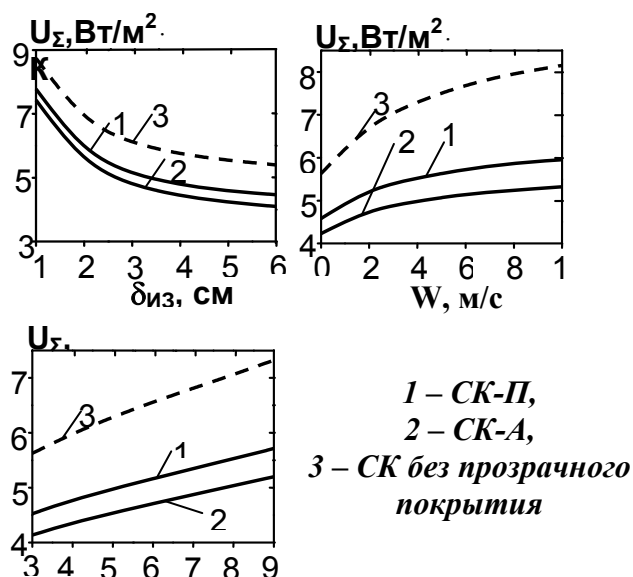


Рис.2. Коэффициент суммарных тепловых потерь

С учетом стоимости, в качестве прозрачной изоляции, рекомендуется использовать поликарбонатные панели толщиной 4 мм ($U=4,58 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$). С увеличением толщины теплоизоляции δ_{1-4} коэффициент тепловых потерь монотонно уменьшается. По всей видимости, использовать СК с толщиной теплоизоляции $\delta_{1-4}>40$ мм нецелесообразно, т. к. при этом U уменьшается только на 12% (СК-А), на 15% (СК-П, $\delta_{2-3}=4$ мм) и на 19% (СК-П, $\delta_{2-3}=8$ мм), а материальные затраты и габариты СК существенно растут.

Практический интерес представляет оценка влияния скорости ветра над поверхностью СК на коэффициент тепловых потерь, а, следовательно, и на к. п. д. СК (рис.1). При изменении W от 0 до 5 м/с, величина U увеличивается наиболее существенно для СК-А (на 33%) и в меньшей степени для СК-П (на 20%). Из этого следует, что скорость ветра необходимо учитывать при расчетах СК и солнечных систем, особенно если используются традиционные одностекольные коллекторы (СК с одиночным ПП).

Экспериментальные исследования

В период с 1999г. по 2006г. проводились сравнительные испытания различных типов разработанных СК. Для экспериментального изучения (испытания натуральных образцов) тепловых характеристик СК был создан стенд. Стенд симметричен и включает два полностью аналогичных контура для получения сравнительных рабочих характеристик образцов СК. Каждый контур, в свою очередь, включает: водопроводный трубопровод, оснащенный вентилем, который подключен к БТА объемом 85 литров; два теплоизолированных трубопровода, опускной и подъемный, которые служат соединением баков-аккумуляторов с исследуемыми СК. Опускной трубопровод оснащен запорным вентилем, подъемный оснащен запорным расходомерным устройством, состоящим из стеклянной трубки со шкалой, шприца (дозировочного устройства), наполненного красящей жидкостью (использовался раствор перманганата калия).

К контрольно-самопишущему прибору КСП 2-023 подключены термометры на входе в коллектор, на выходе из него и термометра, отвечающая за температуру окружающей среды. В каждом БТА установлено (полностью идентично по расположению) по семь термометр (шесть по высоте воды в баке и одна между стенкой бака и тепловой изоляцией); две термометры установлены на входе и на выходе из каждого испытываемого СК и одна термометра на наружном воздухе. Термометры подключены к вольтметру через переключатель. Сосуд Дьюара 21 обеспечивал нулевую температуру холодного спая термометр. Он оснащен контрольным ртутным термометром. Для измерения интенсивности солнечной радиации был использован пиранометр со вторичным прибором – гальванометром М-80. Для измерения скорости ветра использовался анемометр МС-13. Стенд позволяет сравнивать характеристики работы двух различных СК в естественных условиях, при солнечном излучении и погодных условиях, как они работали бы в составе реальной гелиосистемы.

Характеристики исследованных модулей

Основной задачей исследования являлась разработка эффективных СК, с высокой надежностью и сравнительно небольшой стоимостью. В соответствии с этим были разработаны и испытаны три основных типа СК:

1. СК с алюминиевым абсорбером и стеклом в качестве прозрачного покрытия (СК-А), традиционный тип СК;
2. СК с медным абсорбером и полимерным прозрачным покрытием (СК-М), метало-полимерный, переходный тип СК;
3. СК, изготовленный полностью из полимерных материалов (СК-П).

Схематическое изображение коллекторов СК-А, СК-М, СК-П и структура их абсорберов представлены на рисунке 1.

Методика и программа исследований

С учетом изложенного испытания охватывали задачи:

- Проведение сравнительных тестовых испытаний разработанных СК трех типов;
- Получение и анализ сравнительных характеристик традиционных и новых альтернативных разработок (СК-А, СК-М и СК-П);
- Выявление влияния конструктивных параметров новых разработок (характер комутирования абсорбера и гидравлического коллектора, тип и характеристики теплоизоляции, влияние прозрачного покрытия из различных материалов и геометрии);
- Выявление влияния технологических параметров новых разработок (характер и место нанесения черного покрытия);
- Испытания гелиосистем (ГС) с естественной циркуляцией теплоносителя (характер и скорость движения теплоносителя).

Всего было проведено более 220 опытов, в каждой серии которых исследовались сравнительные характеристики нескольких СК, в том числе 70 опытов на СК-А, 95 опытов на СК-М и 120 опытов на СК-П. Для анализа работы коллекторов была проведена серия испытаний весной и поздней осенью в указанные годы. Испытания осенью и весной показали, что гелиосистема, функционирующая в указанные сезоны, становится более чувствительной к метеорологическим условиям.

Расход теплоносителя, при естественной циркуляции, составлял около 50 л/ч (в расчете на кв.м коллектора), в зависимости от типа СК. В работе [6] Heinz Landener и Frank Späte провели дифференциацию гелиосистем по расходу циркулируемого теплоносителя. По их классификации существует три типа течения теплоносителя через СК:

«Low Flow» – системы с небольшим расходом (10 – 30 л/ч, при этом разница температур на выходе и входе в СК достигает 50°C);

«Match Flow» – системы со средним расходом (20 – 40 л/ч, разница температур – около 20°C);

«High Flow» – системы с большим расходом (30 – 70 л/ч, температурный напор до 15°C).

В соответствии с этой градацией наши испытания подходят под третью категорию – система с большим расходом теплоносителя и со сравнительно небольшими температурными напорами.

Результаты экспериментальных исследований. Интегральные данные и данные по динамическим характеристикам

Испытания на стенде носили сравнительный характер и позволяли выявить реальные характеристики сравниваемых СК, вне зависимости от состояния погодных

условий. По результатам эксперимента можно заключить, что динамика поведения температуры на выходе и на входе в СК имеет несколько определенных зон, характерных для всех типов исследованных СК. Первая зона характерна для прогрева воды в БТА; во второй идет постепенное увеличение температур теплоносителя, причем увеличение температуры на выходе из СК пропорционально солнечному излучению; в третьей зоне происходит постепенное снижение указанных температур, вызванное снижением солнечной активности; четвертая зона соответствует относительному покою системы в ночное время. В зависимости от интенсивности солнечной радиации изменяется и длительность существования этих зон. При слабом солнечном излучении (весна, осень) увеличивается по длительности первая и вторая зоны и уменьшается уровень достигаемых температур.

На рисунке 3 представлены сравнительные результаты экспериментальных исследований для нескольких модификаций СК традиционного, переходного и полимерного типов. Представлено сравнение температур на выходе из коллекторов и средняя температура в БТА.

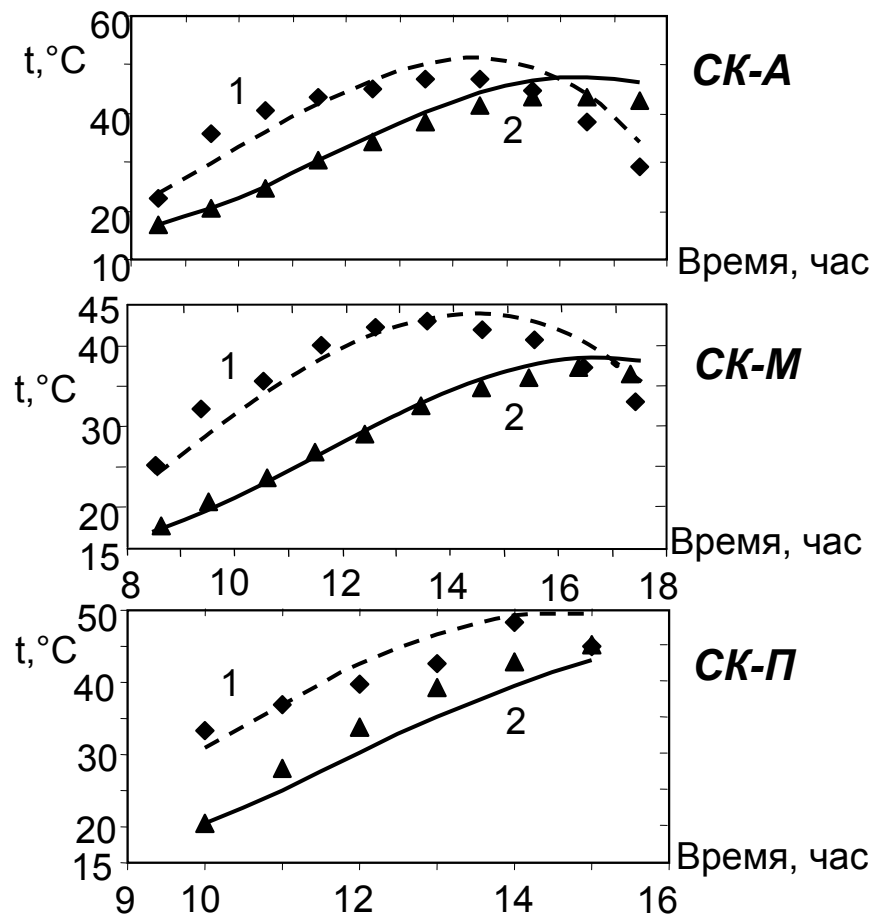


Рис. 3. Температура (расчетные значения – линии, экспериментальные данные - точки) на выходе из СК (1) и средняя температура в БТА (2) для СК-А, СК-М и СК-П, соответственно.

Параллельно и одновременно произведенные испытания и расчеты показали, что тепловые характеристики традиционного типа СК-А несколько выше

характеристик переходного типа СК-М (в среднем расхождение по температуре в БА в конце дня составляло 9,6%).

На рисунке 4 представлены сравнительные динамические характеристики СК-А и СК-М.

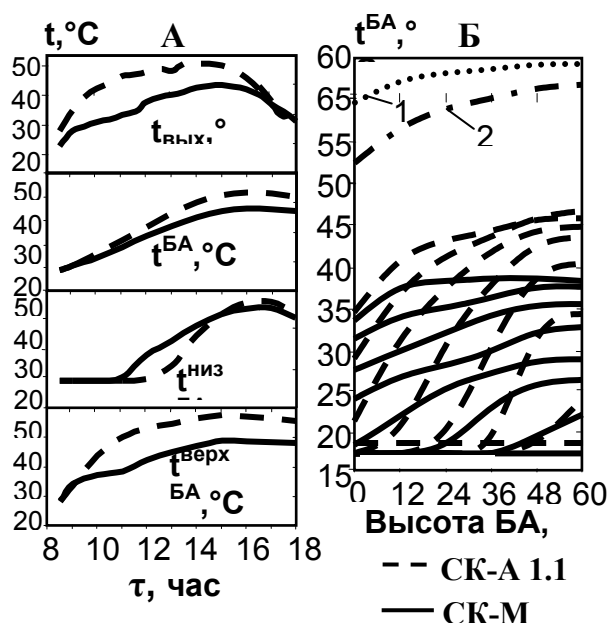


Рис.4. Результаты экспериментального исследования СК-А и СК-М 3.10.02:

А – динамика изменения (сверху вниз) температуры на выходе из СК, средней температуры в БА, температуры в нижней части БА, температуры в верхней части БА;
 Б – тепловое распределение по высоте БА каждые 2 часа и в конце опыта

Испытания на стенде носили сравнительный характер и позволяли выявить реальные характеристики сравниваемых СК, вне зависимости от состояния погодных условий. Из приведенных графиков можно видеть, что характеристики полимерного СК лежат на уровне характеристик плоских солнечных СК традиционного типа с трубным регистром из медных труб. Характеристики традиционного типа СК-А несколько выше характеристик СК-П (в среднем расхождение по температуре в БА в конце дня составляло 7 – 14 %). Это связано с несколько худшей светопропускательной способностью поликарбоната по сравнению со стеклом и меньшим коэффициентом теплопроводности поликарбоната по сравнению с алюминием. Коллекторы СК-П и СК-М дают близкие интегральные характеристики.

Были проведены сравнения полученных результатов с опытными и теоретическими данными других авторов по полимерным коллекторам. К сожалению, такие данные немногочисленны, что связано как с малой разработанностью в

настоящее время полимерных типов СК, так и ограниченным количеством информации в источниках.

ВЫВОДЫ

1. Проведенный анализ свойств полимерных материалов, отвечающих требованиям работы в «открытой» среде под действием солнечного излучения, показал, что одним из наиболее перспективных материалов для создания полимерного СК является поликарбонат, из которого могут изготавливаться как прозрачное покрытие, так и абсорбер солнечного коллектора; при использовании поликарбоната в качестве прозрачного покрытия целесообразно применять не литые листы, а панели сотовой структуры с воздушными каналами, что улучшает теплотехнические характеристики СК и удешевляет его конструкцию.
2. Выработаны практические рекомендации к усовершенствованию металлического (традиционного) типа СК-А (с алюминиевым абсорбером и стеклом в качестве прозрачного покрытия), конструированию металло-полимерного (переходного) типа СК, а также полимерного СК.
3. Проведенные теоретические расчеты показали, что тепловые характеристики СК-А несколько выше характеристик СК-П (в среднем расхождение по температуре в баке тепло-аккумуляторе в конце дня составляло 7 – 14%), что связано с худшей светопропускательной способностью поликарбоната по сравнению со стеклом, большим коэффициентом потерь и меньшим коэффициентом теплопроводности поликарбоната по сравнению с алюминием; характеристики традиционного СК-А и переходного СК-М коллекторов практически совпадают.

Литература

1. A. Madhlopa, R. Mgawi, J. Taulo, 2006. Experimental study of temperature stratification in an integrated collector-storage solar water heater with two horizontal tanks. *Solar Energy* 80, 989–1002.
2. Maatouk Khoukhi, Shigenao Maruyama, 2006. Theoretical approach of a flat-plate solar collector taking into account the absorption and emission within glass cover layer. *Solar Energy* 80, 787–794.
3. Michael Kohl et al, 2005. Durability of polymeric glazing materials for solar applications. *Solar Energy* 79, 618–623.
4. D.S. Kim, C.A. Infante Ferreira, 2008. Solar refrigeration options – a state-of-the-art review. *Refrigeration* 31, 3–15.
5. H.M. Yeh, C.D. Ho, J.Z. Hou, 2002. Collector efficiency of double-flow air heaters with fins attached. *Energy* 27, 715–727.
6. Rajenda Karwa, S.N. Garg, A.K. Arya, 2002. Thermo-hydraulic performance of a solar air heater with n-subcollectors in series and parallel configuration. *Energy* 27, 807–812.
7. Ho-Ming Yeh et al, 1999. Energy and mass balances in open-type multiple-effect solar distillers with air flow through the last effect. *Energy* 24, 103–115.
8. Nielsen J.E., Bezzel E., 1996, "Duct Plate" Solar Collectors in plastic materials, Solar Energy Laboratory, Danish Technological Institute
9. Rekstad J., 1997, SolarNor AS and General Electric Plastics, Solar Collectors in plastic materials from Norway.

6. Fulvio Ardenete, Giorgio Beccali, Maurizio Cellura, Valerio Lo Brano, 2005. Life cycle assessment of a solar thermal collector. *Renewable Energy* 30, 1031–1054.
7. Daffi J.A., Beckman Y.A, 1977, Heat processes with the use of solar energy, Moscow, Mir, pp. 566.
8. Collares Pereira M. CPC-type collectors and their potential for solar energy cooling applications. Proceedings of 2nd Munich Discussion Meeting ‘solar Assisted Cooling with Sorption System’, München, Paper No. 5.- 1995.
9. Czederna A., Tillman N.N., Herd G.C. Polimers as advanced materials for desiccant applications. 3. Alkalisalts of PSSA and poli AMPSASS, ASHRAE Trans., US, vol. 101, n. 1. – 1995. - P. 697-712.
10. Yang R., Wang P.L. Experimental study of a glazed solar collector/regenerator operated under a humid climate. *INT. J. Sol. Energy*, CH, vol. 16, n. 3. – 1995. - P. 185-201.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Величины :

T, t – температура, °C;
 δ – толщина, м;
 W – скорость ветра, м/с;
 α - коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 ε - степень черноты;
 σ - постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м⁴·град²)
 β - угол наклона солнечного коллектора к горизонту, град;
 U – коэффициент потерь, Вт/(м²·град);
 R – термическое сопротивление, (м²·К)/Вт;
 Nu - число Нуссельта;
 λ – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/(м·К)
 d – диаметр, м;
 q – плотность теплового потока, Вт/м²;
 J – плотность солнечного излучения; Вт/м²;
 c – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);
 G – расход, кг/с;
 Q – тепловой поток, Вт;
 h – высота, м;
 V – объем, м³;
 ρ – плотность, кг/м³;
 x – расстояние от начала канала, м;
 τ – время, час;
 η – коэффициент полезного действия;
 F – площадь, м².

Нижние индексы:

0 – окружающая среда;
 1 – верхняя сторона абсорбера;
 2 – нижняя сторона прозрачного покрытия;
 3 – верхняя сторона прозрачного покрытия;

о – окружающая среда;
п – покрытие;
а – абсорбер;
ж – жидкость;
э – эквивалентность;
из – изоляция;
СК – солнечный коллектор;
ПР – приведенный.

Верхние индексы:

к – конвективная составляющая;
р – радиационная составляющая;
«-» нижняя сторона покрытия;
«+» - верхняя сторона покрытия;
из – изоляция.

Сокращения:

СК – солнечный коллектор;
СК-А – солнечный коллектор с алюминиевым абсорбером;
СК-М – солнечный коллектор с медным абсорбером;
СК-П – полимерный солнечный коллектор;
БТА – бак-теплоаккумулятор;
ПП – прозрачное покрытие;
ГС – гелиосистема.