

А.В. Дорошенко, М.А. Глауберман, Э. Т. Роговская

Одесский национальный университет им. И.И. Мечникова

Солнечные плоские коллекторы из полимерных материалов

Разработана идеология создания нового поколения солнечных плоских коллекторов для систем тепло- и холодообеспечения на основе использования многослойных и многоканальных структур из полимерных материалов в их конструкции. Выполнено моделирование рабочих процессов с учетом механизма тепловых потерь из-за конвекции и радиации. Проведено экспериментальное исследование опытных образцов и намечены пути дальнейшего совершенствования характеристик альтернативных солнечных систем на основе применения полимерных солнечных коллекторов.

I. Введение. Практически все регионы Украины пригодны для развития солнечной энергетики. Системы солнечного горячего водоснабжения (ССГВ) получили широкое распространение. Они отличаются назначением и конструкцией используемых солнечных коллекторов (СК), способом циркуляции и видом теплоносителя, способом подачи горячей воды потребителю. СК предназначены для обеспечения производственных и бытовых нужд в горячем водоснабжении и отоплении, могут использоваться для нагрева воды в плавательных бассейнах, нагрева воздуха в солнечных теплицах и сушилках; известны конструкции солнечных опреснителей, установок кондиционирования воздуха, холодильных и водоподъемных установок [1-3]. Перспективно создание на основе солнечной энергии комбинированных систем теплоснабжения, рационально интегрирующих возможности традиционной и альтернативной энергетики [1-7]. Любой альтернативный источник энергии подвержен естественным колебаниям активности, что требует создания компенсационного механизма.

II. Разработка конструкции СК. Солнечный коллектор основной элемент солнечной установки, в котором солнечное излучение преобразуется в тепловую энергию. По виду теплоносителя коллекторы делят на жидкостные и воздушные; по уровню достигаемой температуры на низкотемпературные (до 100°C), среднетемпературные (до 200°C) и высокотемпературные (до 350°C). Температура нагрева теплоносителя прямо пропорциональна интенсивности падающей солнечной энергии и обратно пропорциональна тепловым потерям в окружающую среду. Наибольшее распространение в мировой практике получили плоские СК (flat plate solar collector) из-за простоты конструкции и дешевизны. На рис. 1А представлена схема традиционного плоского СК-А. Абсорбер (1) плоского СК, как правило, изготавливается из материала с высокой теплопроводностью, из металлов (стали, алюминия – рис. 1А, или меди – рис. 1Б). Прозрачная изоляция (б) представляет собой один или два слоя стекла или полимерной пленки. В случае низкой температуры нагрева теплоносителя (до 30°C) коллектор может вовсе не иметь прозрачной изоляции. 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. Можно существенно увеличить эффективность СК, применяя селективные покрытия, обеспечивающие высокую поглощающую способность по отношению к солнечному излучению и низкую собственную излучательную способность. Такое возможно благодаря тому, что поглощение и излучение происходят в далеких друг от друга областях спектра: поглощение в коротковолновой (ультрафиолетовой, видимой и высокотемпературной инфракрасной) зоне, а излучение – в длинноволновой (низкотемпературной инфракрасной). Нанося на поглощающую поверхность ряд тонких слоев диэлектрика, металлов или их оксидов, можно обеспечить высокий коэффициент поглощения солнечной радиации при низкой степени черноты покрытия.

Основными характеристиками любых СК является уровень рабочих температур, оптический КПД θ , коэффициент потерь U , Вт/(м²·°С) и общий КПД. Существуют различные конструкции плоских СК, отличающихся, в основном, типом абсорбера (теплоприемника) и типом прозрачной изоляции.

Переход к полимерным материалам обеспечивает снижение веса и стоимости СК и гелиосистемы в целом за счет исключения цветных металлов в конструкции; снижение вредных экологических последствий в полном цикле «жизни» нового типа СК. Существует большое количество полимеров, которые потенциально могут быть использованы в конструкции плоского СК - полипропилен, полиметилметакрилат, поликарбонат, полисульфон, полиэстеровый сульфид, полиамид, аморфный полиамид, волокнистые пластики, поливинилхлорид, полиметилпропилен, акрил. Долгосрочное использование СК в открытой среде выдвигает ряд жестких требований к конструкционным материалам: оптическая прозрачность материала не ниже 75%; температурная устойчивость в диапазоне от –15 до +130С; стабильность к ультрафиолетовому излучению (УФИ). Полипропиленовые и полистироловые пластмассы непригодны из-за плохих оптических свойств, полисульфон и полиэстеровый сульфид стабильны к УФИ, но имеют нежелательный желтый цвет и слишком низкую оптическую прозрачность. Аморфный полиамид можно сделать достаточно 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°С. В качестве полимера для конструирования СК, нами был выбран поликарбонат.

Плита сотового поликарбоната представляет собой два параллельных листа с поперечными перегородками в цельной единой структуре как показано на рис. 1В. 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. Панели поликарбоната имеют светопропускание 70 – 82%, в зависимости от толщины. Панели толщиной 4 мм с наибольшим светопропусканием были выбраны в качестве прозрачного покрытия (б). Современные поликарбонатные панели производятся со специальным покрытием, предотвращающим попадание УФИ внутрь структуры панели. По сравнению с другими прозрачными покрытиями той же толщины, тепловые потери через сотовые панели из ПК значительно

ниже и тепловая изоляция намного лучше. Сотовые панели из поликарбоната отличаются высокими механическими характеристиками. 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.

Основные задачи были определены следующим образом:

1. создать металло-полимерный, переходной тип СК-М, с медным трубным регистром и полимерной плитой в качестве прозрачного покрытия (рис. 1Б);
2. создать полимерный тип СК-П, на основе полимерных материалов из плит сотовой структуры, используемых как в качестве абсорбера, так и в качестве прозрачной изоляции (рис. 1В).

В качестве абсорбера в традиционном типе СК-А (рис. 1А), выпускаемом раньше и прошедшем надежную апробацию на действующих ССГВ [1,4-7], используются трубы с цельнотянутыми ребрами, выполненные методом экструзии из алюминиевого сплава; в качестве прозрачного покрытия используется оконное стекло толщиной 4 мм. Способ изготовления абсорбера (методом экструзии, как единое изделие «труба/ребро») приводит к минимальному термическому сопротивлению. Использование сотовых поликарбонатных панелей в качестве прозрачного покрытия позволяет снизить вес СК. На рис. 1Б представлен разработанный металло-полимерный коллектор СК-М [10], в котором стеклянное прозрачное покрытие заменено на поликарбонатную плиту сотовой структуры толщиной 4 мм. В качестве абсорбера были использованы медные трубы, профилированные для увеличения площади соприкосновения. На рис. 1В представлен разработанный коллектор СК-П [9], полностью выполненный из полимерных материалов. В качестве прозрачного покрытия и абсорбера здесь применяются плиты сотового поликарбоната различных толщин: для прозрачного покрытия – 4 мм, для абсорбера плиты 8 – 10 мм.

III. Теоретическое исследование. Полимерный СК выполнен из плиты, имеющей сотовую структуру. Такой СК представляет коллектор с двойным прозрачным покрытием (ПрПк). Известно, что двойное ПрПк существенно снижает величину суммарного коэффициента потерь [2,3], но, в традиционном виде, приводит к росту веса и габаритов СК. Использование полимерной плиты сотовой структуры практически не изменяет эти показатели, играя в то же время роль двойного ПрПк. В качестве абсорбера в полимерном СК используется такая же полимерная плита, но другого размера; между абсорбером и прозрачным покрытием находится воздушный зазор δ_{1-2} (рис. 1В).

Распределение температур каждого элемента СК, включая теплоноситель, определяем на основании уравнений теплового баланса. При выводе уравнений, сделаны дополнительные 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 конструкции полимерного СК черновое покрытие нанесено на нижнюю сторону плиты абсорбера, поэтому над этой плитой находится еще три полимерные плиты (рис. 1В): 1 – прозрачная сторона абсорбера, 2 и 3 – стенки прозрачного покрытия. Коэффициенты теплоотдачи (их радиационные и конвективные составляющие) можно рассчитать по известным выражениям [3] (для наружной поверхности (покрытие 3, здесь индексы: О – окружающая среда, П – прозрачное покрытие, А - абсорбер):

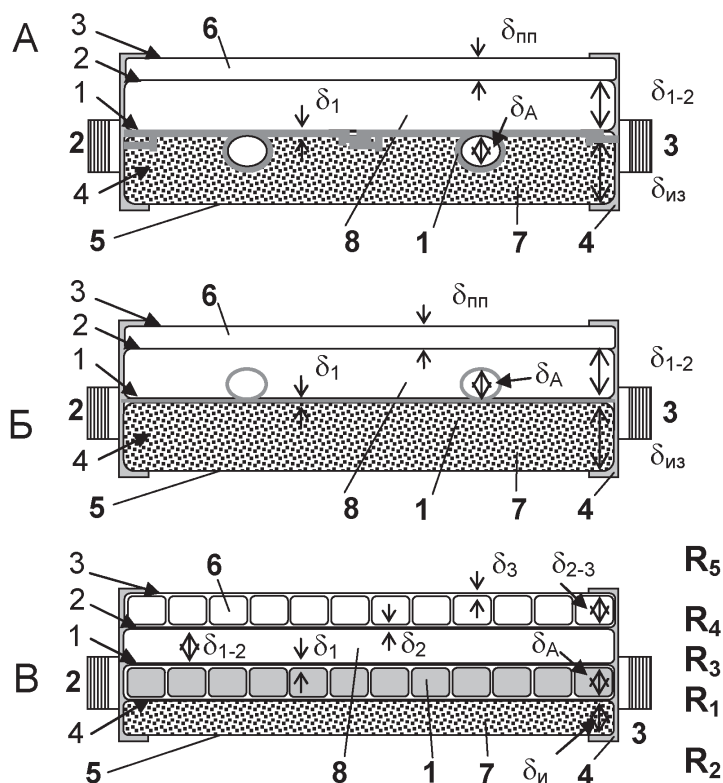


Рис. 1. Принципиальные схемы разработанных плоских солнечных коллекторов. **А** - общий вид традиционного СК с алюминиевым трубным регистром СК-А; **Б** - переходного типа с медным трубным регистром СК-М (патент Украины № 74523); **В** - полимерного СК-П (патенты Украины №№ 74521, 74522). Обозначения: 1 – трубный регистр абсорбера (многоканальная полимерная плита для СК-П); 2,3 – трубы гидравлического коллектора; 4 – корпус

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

$$\alpha_{\text{АП}}^{\text{р}} = \sigma \cdot (T_{\text{А}} + T_{\text{П}}) \frac{T_{\text{А}}^2 + T_{\text{П}}^2}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{А}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{П}}} - 1}, \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{ПО}}^{\text{к}} = (5.7 + W), \quad (3)$$

$$\alpha_{\text{по}}^p = \varepsilon_{\text{п}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{п}} + T_0) \cdot (T_{\text{п}}^2 + T_0^2), \quad (4)$$

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); β – угол наклона СК к горизонту, град; $\delta_{\text{ап}}$ – расстояние между абсорбером и прозрачным покрытием (воздушный зазор), мм. Термическое сопротивление на каждом участке СК определяют коэффициент потерь:

$$U_i = \frac{1}{R_i}, \quad (5),$$

где U_i – коэффициент потерь на каждом участке СК, Вт/(м²·град); R_i – термическое сопротивление на каждом участке СК, (м²·К)/Вт. Характерная цепь тепловых потерь для разработанных солнечных коллекторов приведена на рис. 2.

В дальнейшем используются следующие обозначения: $\alpha_{\text{А1}}^p$, $\alpha_{\text{А2}}^p$, α_{23}^p , α_{30}^p – радиационная составляющая тепловых потерь с нижней поверхности абсорбера к верхней, в воздушном зазоре, с нижней поверхности прозрачного покрытия к

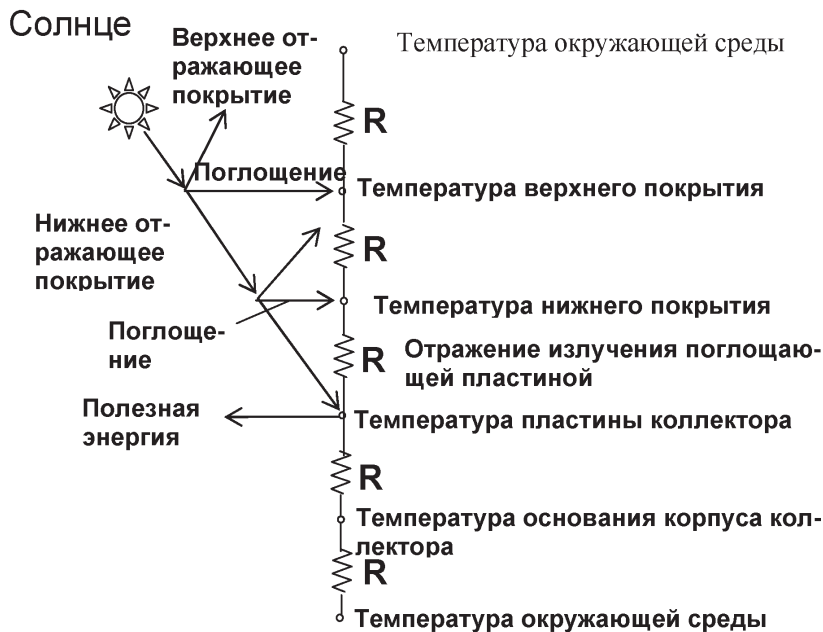


Рис. 2. Характерная цепь тепловых потерь для разработанных полимерного и металло-полимерного солнечных коллекторов

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 – конвективная составляющие теплоотдачи, Вт/(м²·К).

В начальном приближении пренебрегаем влиянием рёбер жёсткости полимерных панелей. В таком случае тепловой расчёт полимерного коллектора ана-

логичен расчёту обычных коллекторов с двойным ПрПк. Рассмотрим уравнения теплового баланса для каждого элемента коллектора.

1. Поверхность 3^+ (наружная поверхность ПрПк):

$$\begin{cases} q_{30}^+ = (\alpha_{30}^k + \alpha_{30}^p) \cdot (T_3^+ - T_0); \\ q_3^+ = q_3^\lambda = -\frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot (T_3^+ - T_3^-); \end{cases} \quad (6)$$

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

2. Поверхность 3^- (внутренняя поверхность ПрПк) (здесь и далее индекс «+» означает наружную сторону рассматриваемой поверхности; индекс «-» – её внутреннюю сторону):

$$\begin{cases} q_{32}^- = (\alpha_{32}^k + \alpha_{23}^p)(T_2^+ - T_3^-); \\ q_3^- = q_3^\lambda = -\frac{\lambda_3}{\delta_3} (T_3^+ - T_3^-). \end{cases} \quad (7)$$

3. Поверхность 2^+ :

$$\begin{cases} q_{23}^+ = (\alpha_{23}^k + \alpha_{23}^p)(T_2^+ - T_3^-); \\ q_2^+ = q_2^\lambda = -\frac{\lambda_2}{\delta_2} (T_2^+ - T_2^-). \end{cases} \quad (8)$$

4. Поверхность 2^- :

$$\begin{cases} q_{21}^- = (\alpha_{12}^k + \alpha_{12}^p) \cdot (T_1^+ - T_2^-); \\ q_2^- = q_2^\lambda = -\frac{\lambda_2}{\delta_2} \cdot (T_2^+ - T_2^-). \end{cases} \quad (9)$$

5. Поверхность 1^+ :

$$\begin{cases} q_{12}^+ = (\alpha_{21}^k + \alpha_{21}^p) \cdot (T_1^+ - T_2^-); \\ q_{12}^+ = q_1^\lambda = -\frac{\lambda_1}{\delta_1} (T_1^+ - T_1^-). \end{cases} \quad (10)$$

6. Поверхность 1^- :

$$\begin{cases} q_{1ж}^- = \alpha_{1ж}^k (-T_1^+ + T_{ж}); \\ q_1^\lambda = -\frac{\lambda_1}{\delta_1} (T_1^+ - T_1^-). \end{cases} \quad (11)$$

7. Приёмная поверхность абсорбера А:

$$\begin{cases} q_A^+ = -\alpha_{A1}^p \cdot (T_A^+ - T_1^-) - \alpha_{A1}^k (T_A^+ - T_{ж}) + J; \\ q_A^\lambda = \frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot (T_A^+ - T_A^-); \\ q_A^- = \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot (T_A^- - T_0). \end{cases} \quad (12)$$

Для жидкости в каналах абсорбера:

$$\begin{aligned} c_{ж} \cdot G_{ж} dT &= dQ; \quad G_{ж} = \rho_{ж} \cdot \delta_A \cdot h \cdot V_{ж}; \\ dQ &= [\alpha_1^- \cdot (T_1^- - T_{ж}) + \alpha_A^+ \cdot (T_A^+ - T_{ж})] h dx; \\ \begin{cases} c_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot \delta \cdot h_A \cdot V_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} = [\alpha_1^- \cdot (T_1^- - T_{ж}) + \alpha_A^+ \cdot (T_A^+ - T_{ж})] h dx; \\ c_{ж} \rho_{ж} \delta_A V_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} = \alpha_1^- (T_1^- - T_{ж}) + \alpha_A^+ (T_A^+ - T_{ж}). \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{1ж}^k &= \alpha_1^- = \alpha_A^+ = \alpha_{A1}^k = \alpha_{ж}^k; \\ c_{ж} \rho_{ж} \delta_{A1} V_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} &= \alpha_{ж}^k (T_1^- - T_{ж}) + \alpha_{ж}^+ (T_A^+ - T_{ж}) \end{aligned} \quad (14)$$

Далее вводятся обозначения: $T_3 = T_3^-$; $T_2 = T_2^-$; $T_1 = T_1^-$; $T_A = T_A^+$
Из уравнений (6) – (7):

$$\begin{cases} q_{30}^+ = q_{32}^-; \\ (\alpha_{30}^+ + \alpha_{30}^p) \cdot (T_3^+ - T_0) = (\alpha_{23}^k + \alpha_{23}^p) \cdot (T_2^+ - T_3). \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} q_{30}^+ = q_3^\lambda; \\ (\alpha_{30}^k + \alpha_{30}^p)(T_3^+ - T_0) = -\frac{\lambda_3}{\delta_3} (T_3^+ - T_3). \end{cases} \quad (16)$$

Откуда:

$$T_3^+ = \frac{1}{\alpha_{30}^k + \alpha_{30}^p + \frac{\lambda_3}{\delta_3}} \left[(\alpha_{30}^k + \alpha_{30}^p) \cdot T_0 + \frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot T_3 \right] \quad (17)$$

$$T_3^+ - T_0 = \frac{\frac{\lambda_3}{\delta_3} \cdot (T_3 - T_0)}{\alpha_{30}^k + \alpha_{30}^p + \frac{\lambda_3}{\delta_3}}, \quad (18)$$

В результате, для покрытия 3 имеем:

$$U_{30} (T_3 - T_0) = (\alpha_{23}^k + \alpha_{23}^p) (T_2^+ - T_3), \quad (19)$$

где:

$$U_{30} = \left[\frac{1}{\alpha_{30}^k + \alpha_{30}^p} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right]^{-1} \quad (20)$$

Аналогичным образом, получим:

$$U_{23} \cdot (T_2 - T_3) = (\alpha_{23}^k + \alpha_{23}^p) \cdot (T_2^+ - T_3), \quad (21)$$

где:

$$U_{23} = \left[\frac{1}{\alpha_{23}^k + \alpha_{23}^p} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right]^{-1}. \quad (22)$$

Окончательно для покрытия 3:

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

где:

$$U_{30} = \left[\frac{1}{\alpha_{30}^k + \alpha_{30}^p} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right]^{-1}; \quad (24)$$

$$U_{23} = \left[\frac{1}{\alpha_{23}^k + \alpha_{23}^p} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right]^{-1}.$$

Для покрытия 2:

$$U_{23} \cdot (T_2 - T_3) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2), \quad (25)$$

где:

$$U_{12} = \left[\frac{1}{\alpha_{12}^k + \alpha_{12}^p} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} \right]^{-1}. \quad (26)$$

Далее:

$$(\alpha_{21}^k + \alpha_{21}^p) \cdot (T_1^+ - T_2) = \alpha_{1ж}^k \cdot (T_1 - T_{ж}) = -\frac{\lambda_1}{\delta_1} \cdot (T_1^+ - T_1)$$

$$T_1^+ - T_1 = \frac{\alpha_{21}^k + \alpha_{21}^p}{\alpha_{21}^k + \alpha_{21}^p + \frac{\lambda_1}{\delta_1}} (T_2 - T_1)$$

Для покрытия 1:

$$-\alpha_{1ж}^k \cdot (T_1 - T_{ж}) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2) \quad (27)$$

$$-\alpha_{A1}^p \cdot (T_A^+ - T_1^-) - \alpha_{A1}^k \cdot (T_A^+ - T_{ж}) + J = \frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot (T_A - T_A^-) = \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot (T_A^- - T_0) \quad (28)$$

$$\begin{aligned}
\frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot (T_A - T_A^-) &= \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot (T_A^- - T_0) \\
T_A^- \cdot \left[\frac{\lambda_A}{\delta_A} + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \right] &= \frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot T_A + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot T_0 \\
T_A^- &= \frac{\frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot T_A + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot T_0}{\frac{\lambda_A}{\delta_A} + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}}} \\
T_A^- - T_0 &= \frac{\frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot T_A + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot T_0 - \frac{\lambda_A}{\delta_A} \cdot T_0 - \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \cdot T_0}{\frac{\lambda_A}{\delta_A} + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}}} \\
&= \frac{\frac{\lambda_A}{\delta_A} (T_A - T_0)}{\frac{\lambda_A}{\delta_A} + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}}} \\
U_A^{из} &= \left[\frac{\lambda_A}{\delta_A} + \frac{\lambda_{из}}{\delta_{из}} \right]^{-1}
\end{aligned} \tag{29}$$

Для покрытия А (приёмной поверхности абсорбера):

$$-\alpha_{А1}^p \cdot (T_A - T_1) - \alpha_{А1}^k \cdot (T_A - T_{ж}) + J = -U_A^{из} \cdot (T_A^- - T_0) \tag{30}$$

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

$$\begin{cases}
U_{30} \cdot (T_3 - T_0) = U_{23} \cdot (T_2 - T_3); \\
U_{23} \cdot (T_2 - T_3) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2); \\
-\alpha_{1ж} \cdot (T_1 - T_{ж}) = U_{12} \cdot (T_1 - T_2); \\
-\alpha_{А1}^p \cdot (T_A - T_1) - \alpha_{А1}^k \cdot (T_A - T_{ж}) + J = -U_A^{из} \cdot (T_0 - T_A); \\
c_{ж} \cdot \delta_A \cdot \rho_{ж} \cdot V_{ж} \frac{dT_{ж}}{dx} = \alpha_{ж}^- (T_1 - T_{ж}) + \alpha_A^+ (T_A - T_{ж}); \\
\text{при } x = 0, T_{ж} = T_0.
\end{cases} \tag{31}$$

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

$$T_{ж}(x) = \frac{b_0 T_0 + I}{b_{ж}} (e^{\frac{b_{ж} x}{a_{ж}}} - 1) + T_{ж}^0, \tag{32}$$

где:

$$\left\{ \begin{array}{l}
a_{\text{ж}} = \frac{c_{\text{ж}} \cdot \delta_{\text{А}} \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot V_{\text{ж}}}{\alpha_{\text{ж}}^{\text{к}}}; \\
b_{\text{ж}} = \chi_{\text{ж}} K_{\text{А}} - 2K_{\text{А}} + \alpha_{\text{А}}^{\text{п}} \cdot \chi_{\text{ж}} + \alpha_{\text{А1}}^{\text{к}}; \\
b_0 = \chi_0 K_{\text{А}} + \alpha_{\text{А1}}^{\text{п}} \cdot \chi_0 + U_{\text{А}}^{\text{ИЗ}}; \\
\chi_{\text{ж}} = \frac{K_{\text{ж}}}{K_{\text{ж}} + K_0}; \\
\chi_0 = \frac{K_0}{K_{\text{ж}} + K_0}; \\
K_{\text{ж}} = \alpha_{1\text{ж}} \cdot (U_{23} \cdot U_{30} + U_{12} \cdot U_{30} + U_{12} \cdot U_{30}); \\
K_0 = U_{12} \cdot U_{30} \cdot U_{23}; \\
K_{\text{А}} = \alpha_{\text{А1}}^{\text{п}} + \alpha_{\text{А1}}^{\text{к}} + U_{\text{А}}^{\text{ИЗ}}.
\end{array} \right. \quad (33)$$

Полный коэффициент тепловых потерь СК определяется по формуле:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{12}^{\text{к}} + \alpha_{12}^{\text{п}}} + \frac{1}{\alpha_{20}^{\text{к}} + \alpha_{20}^{\text{п}}}} + \frac{\lambda_{\text{ИЗ}}}{\delta_{\text{ИЗ}}}. \quad (34)$$

Значения температуры воздуха T_0 , °С и суммарной солнечной инсоляции J , Вт/м² в зависимости от времени суток представлены на рис. 3Б. Здесь же представлен теоретический расход теплоносителя (сплошная линия) и температура в верхней части бака-аккумулятора в зависимости от времени дня. Видно, что теоретические расчёты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными (точки на графиках). Расхождение составляет 5 – 6 %.

На рисунке 3В представлены расчетные и экспериментальные данные по температуре на выходе из коллектора и средней температуре в баке-теплоаккумуляторе (БТА) для трех исследованных типов СК (СК-А, СК-М, СК-П). Расчеты корректировались с учетом зависимости от изменения реального угла падения солнечного излучения на плоскость СК. Расчетные и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются.

IV. Экспериментальное исследование. Основной задачей было проведение прямых сравнительных испытаний разработанных СК различных модификаций, при их одновременной работе на отдельных установках в идентичных условиях. В качестве основного экспериментального метода изучения рабочих характеристик СК был принят метод прямых сравнительных испытаний, при котором сравниваются характеристики двух вариантов СК с последующим сопоставлением результатов по тестовым международным методикам (DIN V 4757-3); проверка надежности разрабатываемых СК (СК-М и СК-П) (проверка абсорбера на устойчивость к увеличению давления теплоносителя, проверка стойкости СК против высоких температур, проверка на непроемаемость) под-

твердила высокие теплотехнические характеристики новых разработок, а также сохранение работоспособности изделий в течение срока службы.

Стенд [1,8] симметричен и включает два аналогичных контура для получения сравнительных характеристик СК. Термопары установлены на входе и на выходе СК и в каждом баке-теплоаккумуляторе БТА. 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.

Динамика поведения температуры имеет несколько определенных зон: 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.

На практике вводится понятие эффективности коллектора F' , представляющей собой отношение термического сопротивления переносу теплоты от поглощающей пластины СК к окружающему воздуху к сопротивлению переносу теплоты от жидкости к окружающему воздуху [3]. Величину F' можно рассчитать по формуле:

$$F' = \frac{1}{\frac{b \cdot U}{\pi \cdot D \cdot \alpha_{ж}} + \frac{b}{D + (b - D) \cdot F}}, \quad (35)$$

где: b - расстояние между центрами соседних каналов поликарбонатной плиты, м; d_3 - эквивалентный диаметр канала, м; $\alpha_{ж}$ - коэффициент теплоотдачи от стенки канала к жидкости, Вт/(м²·К), ($\alpha_{ж} \approx 300$ для естественной и 1500 для вынужденной конвекции); F - эффективность ребра прямоугольного профиля, так как в поликарбонатной плите отсутствуют рёбра, принимаем $F = 1$. Коэффициент полезного действия СК можно рассчитать по формуле:

$$\eta = \tau \cdot \varepsilon_1 \cdot F' - U \cdot F' \cdot [0.5 \cdot (t_{ж1} + t_{ж2}) - t_0] / J \quad (36)$$

где $t_{ж1}$, $t_{ж2}$ - температура жидкости на входе и на выходе из СК, °С. Если U и $F' = \text{const}$, зависимость η от $[0.5 \cdot (t_{ж1} + t_{ж2}) - t_0] / J$ представляет собой прямую линию. Величина $[0.5 \cdot (t_{ж1} + t_{ж2}) - t_0] / J$ называется приведенной температурой. На рис. 3А представлены сравнительные характеристики СК в виде зависимости $\eta_{СК}$ от приведенной температуры для различных типов СК (1 – СК для бассейнов, то есть СК упрощенной конструкции, как правило, без прозрачного покрытия; 2 – полимерный СК-П и традиционный СК-М с трубным регистром из медных трубок; 4 – СК с вакуумными трубами).

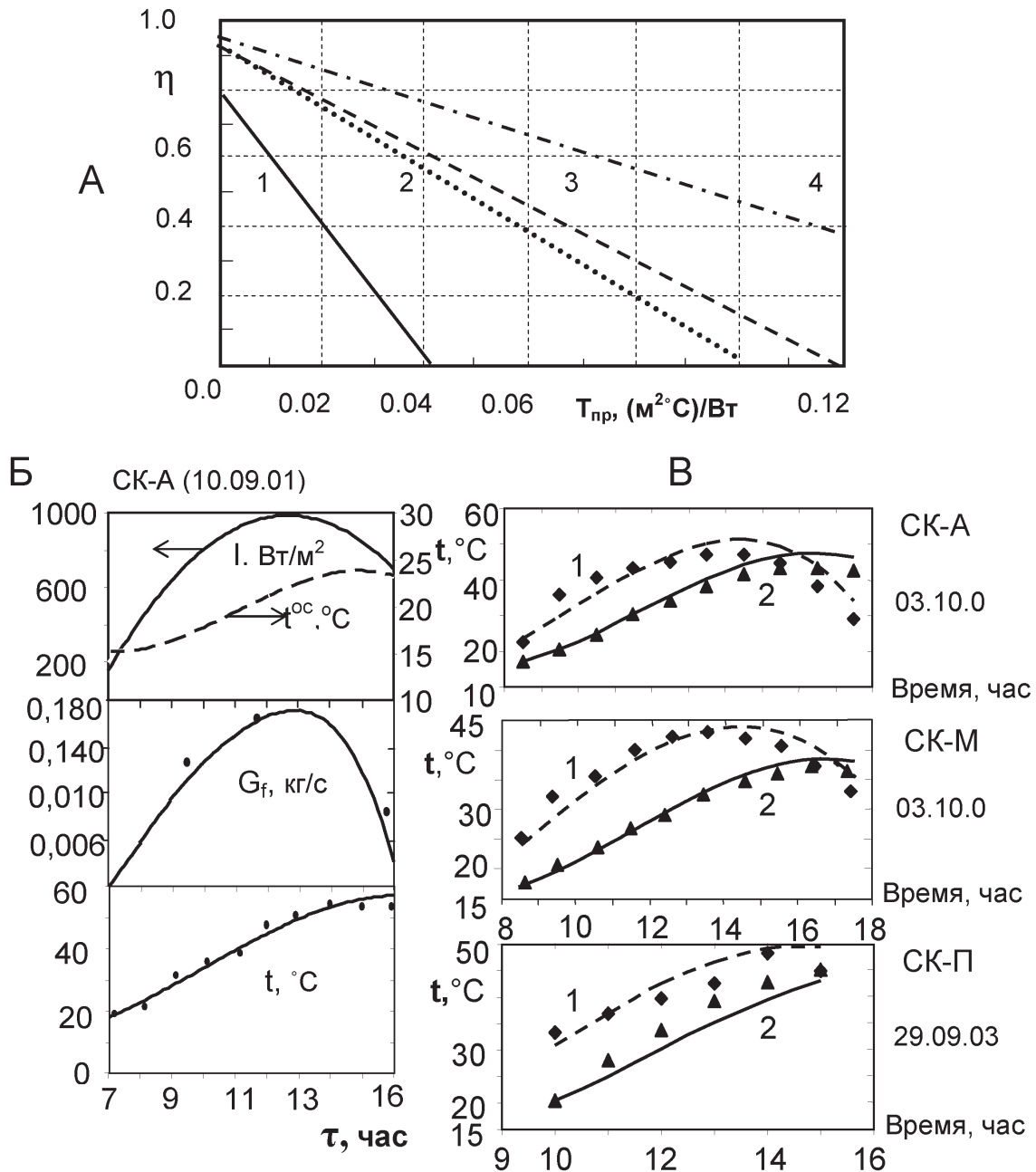


Рис 3. А – зависимость (экспериментальные данные) коэффициента полезного действия СК от приведенной температуры $T_{пр} = [0.5 \cdot (t_{ж1} + t_{ж2}) - t_0] / J$: 1 – СК без прозрачной изоляции; 2 – полимерный СК (СК-П); 3 – металлический плоский СК (СК-А и СК-М); 4 – вакуумированный СК; Б - изменение расхода теплоносителя и температуры теплоносителя в верхней точке БТА с течением времени на фоне изменения интенсивности солнечной энергии и температуры окружающего воздуха; В - температура (расчетные значения – линии, экспериментальные данные - точки) на выходе

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 БТА в конце дня составляло 7 – 14 %). Это связано с несколько худшей светопропускательной способностью поликарбоната по сравнению со стеклом. 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 [11, 12]. В работе [11] исследовали полимерный СК, в котором интегрированы прозрачное покрытие, абсорбер, тепловая изоляция и корпус в единой цельной структуре, состоящей из полностью прозрачной четырехстенной плиты с каналами. Испытания проходили при интенсивности солнечного излучения 800 Вт/м^2 , при температуре окружающей среды 25°C и скорости ветра 5 м/с в лабораторных условиях. J. Rekstad [12] 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. Рабочие характеристики всех трех типов сравниваемых полимерных СК находятся в хорошем соответствии.

V. 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 (с алюминиевым абсорбером и стеклом в качестве прозрачного покрытия), конструированию металло-полимерного (переходного) типа СК (с медным абсорбером и полимерным прозрачным покрытием) и полимерного СК-П.
3. Разработанное экспериментальное оборудование позволяло производить натурные испытания с учетом изменяющейся интенсивности солнечного излучения, и климатических параметров – температуры, облачности и ветронагрузки, а также сравнительные испытания в летний и осенне-весенний периоды года.

4. Параллельно проведенные испытания и теоретические расчеты показали, что тепловые характеристики СК-А несколько выше характеристик СК-П (в среднем расхождение по температуре в БТА 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.
5. Рабочие характеристики всех трех типов сравниваемых полимерных СК (по работе датских и норвежских исследователей и по нашим данным) находятся в хорошем соответствии. Несколько более крутой характер зависимости $\eta = f(T_{пр})$ в наших исследованиях вызван характером проведения испытаний в открытой среде с явно выраженными колебаниями интенсивности, температуры и ветронагрузки; осенние и весенние испытания показали, что гелиосистема, функционирующая в указанные сезоны, становится более чувствительной к метеорологическим условиям.

Литература

1. Горин А., Дорошенко А. Альтернативные холодильные системы и системы кондиционирования воздуха. – Донецк: Норд-Пресс, 2006. – 341 с.
2. Андерсон Б. Солнечная энергия (основы строительного проектирования). – М.: Стройиздат, 1982. – 375 с.
3. Бекман У., Клейн С., Даффи Дж. Расчет систем солнечного теплоснабжения. – М.: Энергоиздат, 1982. – 80 с.
4. Дорошенко А. Корейша О. Белал Брахим. Использование солнечной энергии в системах термовлажностной обработки воздуха // Холодильная техника и технология. - Вып. 4 (78). – 2002. – С. 5-10.
5. Дорошенко А. и др. Солнечные системы автономного теплоснабжения. // Технические газы. 2002. – №2. – С. 10-21.
6. Дорошенко А. Гликсон А. Гелиосистемы и тепловые насосы в системах автономного тепло- и хладоснабжения // АВОК (Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика). Москва, Россия. 2004. – №7. – С. 2 - 6.
7. Doroshenko A. A. Glauberman M. Alternative Refrigerating, Heat-Pumping and Air-Conditioning Systems on the basis of the open absorption cycle and Solar Energy // INTAS Technical Report, INTAS. – 2000. – Number 96 – P. 1730.
8. Дорошенко А. Горин А. 2005, Альтернативные системы кондиционирования воздуха (солнечные холодильные и кондиционирующие системы на основе открытого абсорбционного цикла). АВОК (Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика). Москва, Россия. 2005. - №1. - С. 60 – 64.
9. Патент на винахід № 74521. Полимерный солнечный коллектор. Горин А. Філіпцов С. Дорошенко О. Глауберман М. Гликсон А.

10. Патент на винахід № 74523. Плоский солнечный металло-полимерный коллектор, Горін А. .Філіпцов С. Дорошенко А. Глауберман М.
11. Nielsen J.E., Bezzel E., 1996, "Duct Plate" Solar Collectors in plastic materials, Solar Energy Laboratory, Danish Technological Institute J Rekstad, 1997, SolarNor AS and General Electric Plastics, Solar Collectors in plastic materials from Norway.

О.В. Дорошенко, М.О. Глауберман, Е.Т. Роговська.

Сонячні плоскі колектори на основі полімерних матеріалів

АНОТАЦІЯ

Розроблено концепцію та теоретичні основи одного із типів нового покоління сонячних плоских колекторів для систем тепло- й холодозабезпечення на основі використання багат шарових і багатоканальних структур із полімерних матеріалів. Проведено моделювання робочих процесів з урахуванням механізму теплових втрат, які обумовлені конвекцією та радіацією. Проведені експериментальні дослідження.

A.V. Doroshenko, M.A. Glauberman, E.T. Rogovskaia

Flat plate solar collectors based on polymeric materials

SUMMARY

Circuit decisions for solar systems of a heat supply and new generation of the flat solar collectors SC based on use of polymeric materials in a design of an absorber and a transparent covering are developed. The comparative experimental researches which have confirmed high the characteristics developed SC and solar systems are lead.