

Костенюк В.В. *, Дорошенко А.В. *, Глауберман М.А. **

**Одесская государственная академия холода,
**ННВЦ при ОНУ имени И.И. Мечникова*

Математическая модель полимерного солнечного коллектора

Разработана математическая модель солнечного коллектора, основанного на использовании многоканальных многослойных полимерных структур, для прогнозирования результатов натурных испытаний разрабатываемых солнечных систем. Модель обеспечивает анализ тепловых потерь, обусловленных механизмами конвекции и радиации, оптимизацию, как принципиальной компоновки полимерных солнечных коллекторов, так и геометрических размеров всех основных элементов. Показано, что расчетные и экспериментальные результаты находятся в хорошем соответствии.

1 Введение

Использование солнечной энергии для решения задач тепло- и хладоснабжения представляет особый интерес, т.к. дает возможность уменьшить долю традиционных источников энергии в этих областях. Развитие солнечной энергетики сдерживается высокой стоимостью солнечных систем. Создание «дешевого» и эффективного солнечного коллектора будет способствовать снижению себестоимости альтернативных систем.

Авторами [1, 2] был выполнен обзор полимерных материалов пригодных для использования в конструкции солнечного коллектора (СК), сконструированы опытные образцы и проведены их сравнительные испытания. На следующем этапе необходимо выполнить оптимизацию конструкции и решить задачу долгосрочного прогнозирования рабочих характеристик СК.

2 Моделирование процессов в полимерном коллекторе.

Конструкция и физическая модель полимерного солнечного коллектора. На рис. 1. показана конструкция и цепочка тепловых сопротивлений для полимерного СК. Основными элементами конструкции СК являются: абсорбер (теплоприемник), прозрачное покрытие (прозрачная изоляция), тепловая изоляция и корпус. Прозрачное покрытие (ПП) и абсорбер выполнены из плит сотового поликарбоната.

Солнечное излучение проходит через ПП, отражаясь на каждой границе раздела сред (у одной сотовой плиты их 4), достигает абсорбера и частично поглощается. Часть солнечной энергии отражается от абсорбера обратно в окружающую среду. Под действием солнечного излучения поверхность абсорбера нагревается и передает тепловую энергию теплоносителю, который проходит в каналах абсорбера. Тепловая энергия теряется из коллектора теплопроводно-

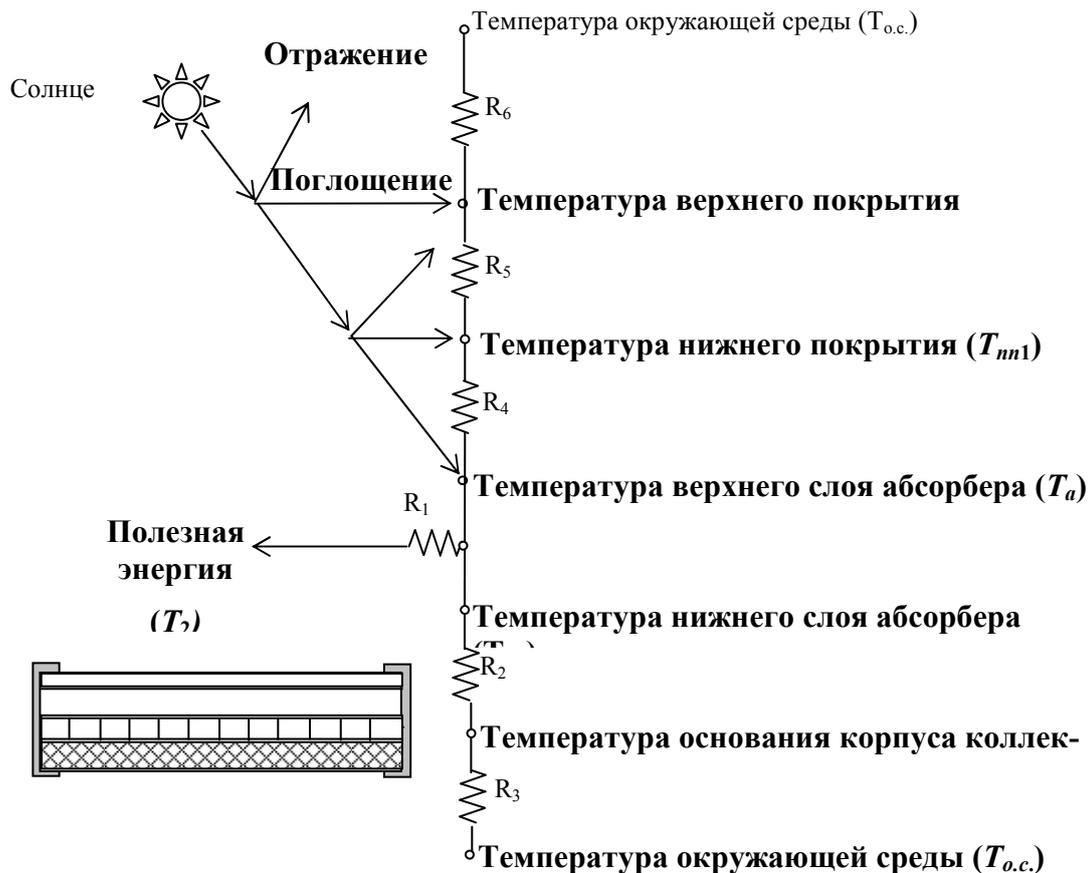


Рис. 1 Характерная тепловая цепь для полимерного солнечного коллектора

$R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ – коэффициенты тепловых сопротивлений, $(m^2 \cdot K)/Вт$; $T_a, T_{a1}, T_{nn1}, T_{nn2}$ – температуры в характерных точках солнечного коллектора, K ; T_2 – температура теплоносителя на выходе из коллектора, K ; T_{oc} – температура окружающей среды, K .

стью, конвекцией и излучением. Каждое тепловое сопротивление находится по формуле 1:

$$R = \frac{1}{\alpha_{кон} + \alpha_{рад}}, \quad (1)$$

где R – тепловое сопротивление, $(m^2 \cdot K)/Вт$; $\alpha_{кон}$, $\alpha_{рад}$ – коэффициенты конвективной и радиационной теплоотдачи соответственно, $Вт/(m^2 \cdot K)$.

Математическая модель. При составлении математической модели были сделаны следующие допущения:

- режим работы солнечного коллектора стационарный;
- теплоноситель равномерно распределяется по каналам абсорбера;
- теплофизические свойства элементов СК не зависят от температуры;
- температура теплоносителя меняется только по длине каналов абсорбера.

Определим термическое сопротивление от стенки абсорбера к теплоносителю (R_1). Режим движения жидкости в каналах абсорбера ламинарный (при характерных значениях расхода и геометрии использованных каналов). Коэффициент теплоотдачи от стенки абсорбера к теплоносителю можно найти из критериальной зависимости [3]:

$$\overline{Nu}_{дж} = 1.4 \cdot \left(Re_{дж} \frac{d}{l} \right)^{0.4} \cdot Pr_{ж}^{0.33} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0.25} \quad (2)$$

где $\overline{Nu}_{дж}$, $Re_{дж}$, $Pr_{ж}$, Pr_c – среднее значение числа Нуссельта, число Рейнольдса, число Прандтля при температуре жидкости и стенки, соответственно; d , l – эквивалентный диаметр и длина каналов, соответственно.

Конвективная составляющая термического сопротивления от абсорбера к прозрачному покрытию (R_4) определяется по формуле [3]:

$$\alpha_{кон4} = \frac{\lambda_z}{\delta_{вз}} \varepsilon_k, \quad \varepsilon_k = 0.18 \cdot (Gr_z \cdot Pr_z)^{0.25}, \quad (3)$$

где λ_z – теплопроводность воздуха, Вт/(м·К); $\delta_{вз}$ – величина воздушного зазора, м; Gr_z – число Гразгофа.

Радиационная составляющая определяется по формуле [4]:

$$\alpha_{рад4} = \sigma \cdot \frac{(T_a^2 + T_{nn1}^2)(T_a + T_{nn1})}{\frac{1}{\varepsilon_a} + \frac{1}{\varepsilon_{nn}} - 1}, \quad (4)$$

где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴); ε_a , ε_{nn} – степень черноты абсорбера и ПП.

Составляющие термического сопротивления ПП (R_5) также находятся по формулам (3 и 4).

Коэффициенты теплоотдачи от ПП к окружающей среде (для определения R_6) находят по формулам 5, 6 и 7[4]:

$$\alpha_{кон5} = 5.7 + 3.8v, \quad (5)$$

$$\alpha_{кон5} = \varepsilon_{nn} \sigma (T_{nn2}^2 + T_n^2) (T_{nn2} + T_n), \quad (6)$$

$$T_n = 0.0552 \cdot T_{о.с.}^{1.5}, \quad (7)$$

где v – скорость ветра, м/с; T_n – температура небосвода, К.

Термическое сопротивление R_2 равно отношению толщины тепловой изоляции к теплопроводности материала изоляции. Термическое сопротивление R_3 определяется по формуле 5 (радиационная составляющая не учитывается т.к. её вклад незначительный).

Для определения количества солнечной энергии, поглощенной абсорбером необходимо найти нормальную приведенную поглощательную способность $(\tau\alpha)_{en}$. Методика для расчета этой величины представлена в [4]. Для нашего случая $(\tau\alpha)_{en} = 0.7$ (использование сотовой панели толщиной 4 мм.).

Для нахождения значений температур в характерных точках СК (4 значения) и температуры теплоносителя на выходе из СК необходимо записать сис-

тему из 5 линейно независимых уравнений. Для этого воспользуемся следующими соображениями:

- должен выполняться тепловой баланс СК, т.е. поглощенная абсорбером энергия равна сумме полезной энергии и тепловых потерь через прозрачную и тепловую изоляцию;
- тепловой поток, теряемый через прозрачную изоляцию постоянен для последовательных участков цепочки тепловых сопротивлений;
- тепловой поток, отводимый от абсорбера в направлении дна коллектора, равен сумме полезного теплового потока и тепловых потерь через дно абсорбера.

Запишем систему линейных уравнений:

$$\begin{aligned} Q_{пол} + D_{np} + D_{мен} + D_{бок} &= I \cdot (\tau\alpha)_{en} \cdot F_a, \\ D_{np4} - D_{np5} &= 0, \quad D_{np5} - D_{np6} = 0, \\ \frac{T_a - \bar{T}_{жс}}{R_1(T_a, \bar{T}_{жс})} \cdot F_a - Q_{пол} - D_{мен} &= 0, \\ \frac{\bar{T}_{жс} - T_{a1}}{R_1(\bar{T}_{жс}, T_{a1})} \cdot F_a - D_{мен} &= 0, \end{aligned}$$

где $Q_{пол}$, D_{np} , $D_{мен}$, $D_{бок}$ – полезная энергия, тепловые потери через прозрачную, тепловую и боковую изоляции, Вт; I – интенсивность солнечной радиации в плоскости СК, Вт/м²; F_a – площадь абсорбера, м²; $\bar{T}_{жс}$ – средняя температура жидкости, К.

$$\begin{aligned} D_{np} &= \frac{T_a - T_{nn1}}{R_4} \cdot F_a = \frac{T_{nn1} - T_{nn2}}{R_5} \cdot F_a = \frac{T_{nn2} - T_{o.c.}}{R_6} \cdot F_a = \frac{T_a - T_{o.c.}}{R_4 + R_5 + R_6} \cdot F_a, \\ D_{мен} &= \frac{T_{a1} - T_{o.c.}}{R_2 + R_3} \cdot F_a, \quad D_{бок} = \frac{(T_a + T_{nn2})/2 - T_{o.c.}}{R_2 + R_3} \cdot F_a. \end{aligned}$$

В результате решения описанной системы уравнений мы находим значения средних температур в характерных точках и температуру теплоносителя на выходе из СК. Программа создана для имитации натуральных испытаний в соответствии с нормативными методиками. При проведении испытаний единственным регулируемым параметром является температура теплоносителя на входе в СК, поэтому в модели реализован механизм нахождения значений температур в характерных точках при различных значениях температуры теплоносителя на входе. Принципиальная схема работы программы показана на рис. 2.

Т.к. для моделирования использована система линейных алгебраических уравнений, можно оценить чувствительность системы уравнений к значениям свободных членов (найти обусловленность системы уравнений). Свободные члены системы уравнений выражаются через значения интенсивности солнечной радиации, температуры теплоносителя на входе, температуры окружающей среды и термических сопротивлений элементов солнечного коллектора. Значение коэффициента обусловленности составляет 70-80. Это говорит о том, что если мы хотим определить значения температур в характерных точках с по-

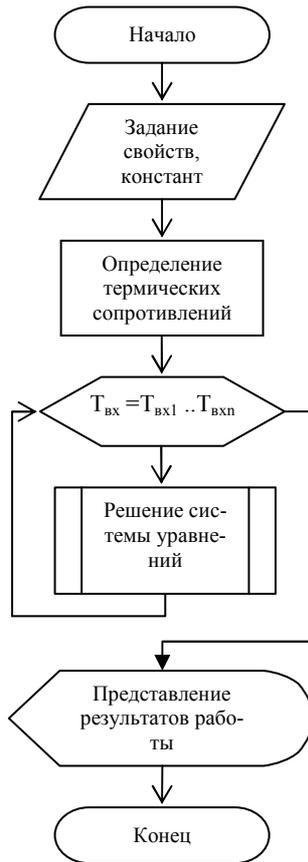


Рис. 2 Блок-схема работы математической модели

грешностью 20%, то свободные члены уравнений должны определяться с погрешностью 0.25%.

3 Сравнение результатов работы математической модели с экспериментальными данными.

Для того, чтобы убедиться в достоверности расчетных данных, их необходимо сравнить с существующими экспериментальными. В результате эксперимента для испытываемых СК строится зависимость КПД от приведенной температуры. КПД находится по формуле (8), а приведенная температура по формуле (9).

$$\eta = \frac{Q_{пол}}{I \cdot F_a}, \quad (8)$$

$$T_{пр} = ((T_1 + T_2) / 2 - T_{o.c}) / I, \quad (9)$$

где T_1 – температура теплоносителя на входе, K .

Ранее в ОГАХ были выполнены работы по экспериментальному изучению тепловых характеристик полимерных солнечных коллекторов [2]. Также для сравнения экспериментальных и расчетных данных были взяты экспериментальные данные по работе [5].

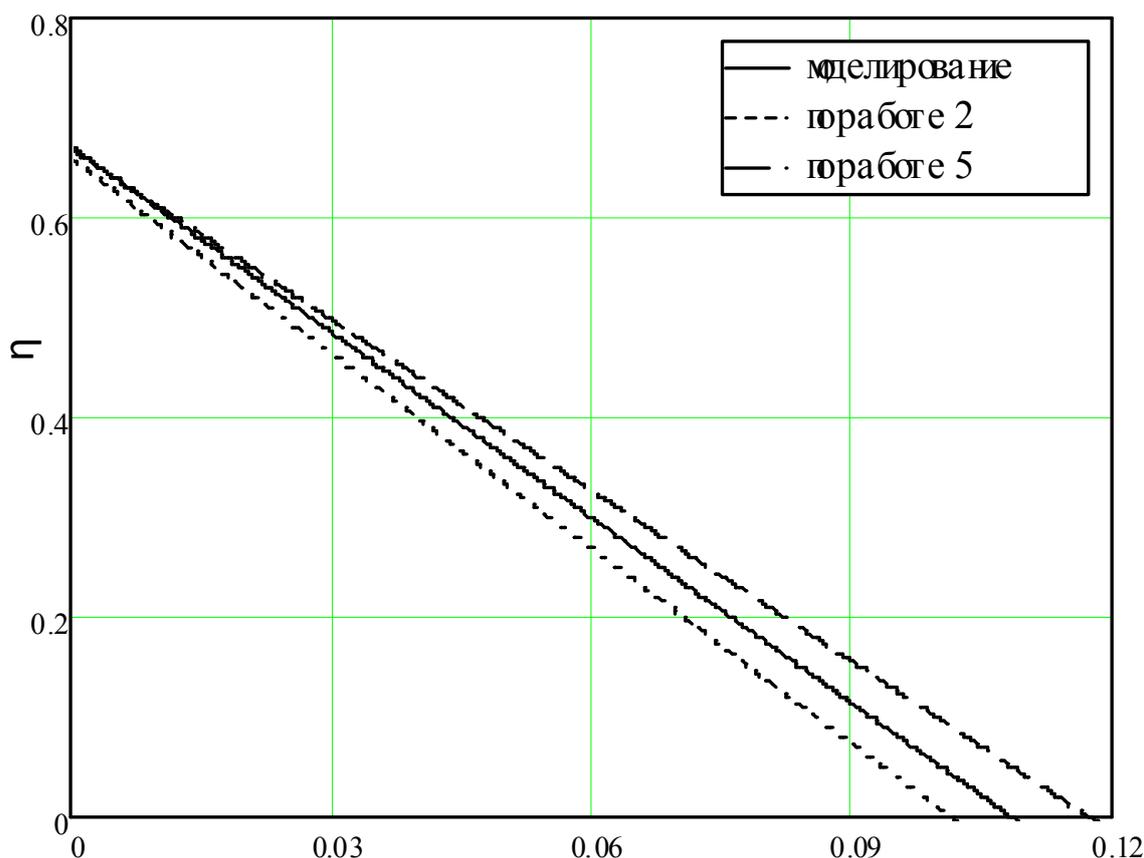


Рис.3. Сравнение расчетных данных с экспериментальными

На рис. 3 показаны результаты эксперимента и моделирования. При таком представлении зависимости КПД от приведенной температуры получается прямая линия. Как видно, значения оптических КПД практически совпали (пересечение прямой с осью ординат), а значения суммарных коэффициентов тепловых потерь (угол наклона прямых) отличается на 5% [2] и 8% [5].

Заключение.

Создание адекватной математической модели для полимерного СК позволяет:

- делать прогноз тепловой эффективности, разрабатываемых СК;
- определить вклад отдельных элементов в показатели суммарной эффективности СК;
- оптимизировать конструктивные особенности новых модификаций СК.

В дальнейшем планируется усовершенствовать математическую модель СК для учета неравномерности распределения теплоносителя и прогнозирование долгосрочной эффективности.

Литература:

1. Горин А.Н., Дорошенко А.В., Глауберман М.А. Солнечная энергетика. (Теория, разработка, практика). – Донецк: Норд-Пресс, 2008. 374 с.

2. *Шестопалов К.О.* Теплотехнічні характеристики полімерних сонячних колекторів для систем теплопостачання. Автореф. Дис. канд.техн.наук: 17.10.2005 / Одес. Гос. Акад. Хол. – 2005.
3. *Михеев М.А., Михеева И.М.* Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. 344 с илл.
4. *Daffi, J.A., Beckman, Y.A.* Heat processes with the use of solar energy, Moscow, 1977. – Mir, PP. 566
5. *Сулейманов М.Ж.* Экспериментальное исследование теплотехнических характеристик солнечных коллекторов и водонагревательных установок. Автореф. Дис... канд.техн.наук: 2007 / Объед. И-т. Высок. Темпер. РАН – М. 2007. – 28 с.

Костенюк В. В., Дорошенко О. В., Глауберман М. А.

Математична модель полімерного сонячного колектора

АНОТАЦІЯ

Розроблена математична модель полімерного сонячного колектора, створеного з багатоканальних багатошарових структур, для прогнозування результатів експериментальних досліджень сонячних систем, що розробляються. Модель забезпечує аналіз теплових втрат, що обумовленні механізмами конвекції та випромінювання, оптимізацію, як принципової компоновки полімерних сонячних колекторів, так і геометричних розмірів всіх основних елементів. Продемонстровано, що розрахункові та експериментальні дані добре співпадають.

Kosteniuk V.V., Doroshenko A. V., Glauberman M.A.

Mathematical model of a polymeric solar collector

SUMMARY

Mathematical model of a polymeric solar collector, which based on polymeric multichannel sandwiches, for test results prediction is presented. Model can be used for estimation of convective and radiation heat losses, optimizing solar collector's construction and construction of solar collector elements. The results demonstrate that test data and calculation data correlate well.