

для животноводческих, птицеводческих и звероводческих зданий и сооружений имеющих зачастую сложности с поддержанием нормируемых параметров микроклимата.

Литература

1. Халиков, Д. А. Классификация теплоизоляционных материалов по функциональному назначению / Д. А. Халиков // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–6. – С. 1287–1291.

2. Классификация теплоизоляционных материалов по функциональному назначению [Электронный ресурс] // *Научный журнал «Фундаментальные исследования»* – Режим доступа: <https://metasold.com/bezopastnost/tipy-sovremennyx-teploizolyacionnyx-materialov.html>. – Дата доступа 25.10.2022.

4. Какие существуют современные теплоизоляционные материалы в строительстве [Электронный ресурс] // *Строительный портал* – Режим доступа: <http://myprofnastil.ru/blog/2021/12/15/kakie-sushhestvuet-sovremennye-teploizolyacionnye-materialy-v-stroitelstve/>. – Дата доступа 14.02.2023.

5. Обзор рынка органических теплоизоляционных материалов [Электронный ресурс] // *Интернет издание «Кровли» портал*. – Режим доступа: <https://krovlirossia.ru/rubriki/materialy-i-technologii/teploizolyacionnye-materialy/obzor-rynka-organicheskix-teploizolyacionnyx-materialov/>. – Дата доступа 14.02.2023.

УДК 697.7

Солнечный воздухонагреватель с высокоэффективным матричным абсорбером

Орзиматов Ж. Т.¹, Абдулхаев З. Э.¹, Маматисаев Г. И.¹, Пехота А. Н.²

¹ Ферганский политехнический институт
Фергана, Республика Узбекистан,

² Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В статье описана разработанная физико-математическая тепловая модель работы солнечного воздухонагревательного коллектора с воздухопроницаемым матричным абсорбером из проволочной металлической путанки, а также полученные аналитические решения модели для граничных условий первого и второго рода.

Системы солнечного теплоснабжения (ССТ) получили широкомасштабное практическое применение в теплоснабжении жилых и общественных зданий. В 2019 г. общая площадь установленных солнечных коллекторов (СК) в составе различных ССТ составила в мире 684 млн м² [1]. Это в основном жидкостные СК

используемые для подогрева воды горячего водоснабжения и специальных незамерзающих теплоносителей (антифризов) эксплуатируемых в круглогодичных системах теплоснабжения.

Однако, следует отметить, что в современной гелиотехнике наряду с жидкостными солнечными коллекторами [2] широко применяют воздушные солнечные коллекторы (ВСК). По данным на начало 2019 года во всем мире было установлено 1 084 МВт ВСК, что составляет 1 548 143 м² остекленных и неостекленных коллекторов [1]. Годовой объем мирового рынка ВСК в 2018 году находился в диапазоне 30 МВт (43 280 м²). Анализ показывает, что основными пользователями является Северная Америка, Австралия и Япония.

При этом основным производителем такого оборудования является Канада, где производится более половины мирового количества ВСК. В Европе самая большая воздушная гелиоустановка была сооружена в г. Свидница (Польша) с перфорированным абсорбером с площадью 2000 м². Она отапливает цеха завода с объемом помещений 55000 м². В солнечную погоду температура нагретого воздуха составляет от 30 °С, а в облачную нагревает до 10 °С [4]. Стоимость таких гелиоустановок 100–120 евро/м², срок окупаемости – 5 лет.

По конструкции абсорбера различают два класса ВСК [3; 4]:

- с воздухопроницаемыми матричными абсорберами;
- с воздухо непроницаемыми плоскими абсорберами, обтекаемый с передней или, чаще всего, с его тыльной стороны.

Воздушный коллектор с воздухопроницаемым матричным абсорбером состоит из поглотителей из пористого материала с открытыми порами. К примеру, это могут быть слои черных пористых текстильных материалов или пенопластовые пластины, которые размещают на пути воздуха как воздушные фильтры. Излучение солнца поглощается не только в поверхностном слое абсорбера, но и в его объеме. Между прозрачным покрытием и абсорбером оставляют щель переменной ширины для подачи воздуха к абсорберу. Когда воздух фильтруется через абсорбер, тот отдает свое тепло воздуху.

Противоположность матричным представляют коллекторы с обтекаемым плоским абсорбером из герметичного материала, как правило, листового металла. Воздух в таких коллекторах устремляется параллельно обтекаемому абсорберу либо вдоль передней поверхностей абсорбера, либо только вдоль его тыльной поверхности.

Разработанный экспериментальный солнечный воздушонагреватель [5] содержит теплоизолированный корпус с прозрачным покрытием и плоский поглотитель, выполненный в виде воздухопроницаемой структуры, разделяющей корпус на верхний подающий и нижний отводящий воздушные каналы, снабженные соответственно коллектором, обеспечивающим подачи холодного и коллектором отбора горячего воздуха.

В экспериментальном солнечном воздухонагревателе в процесс теплообмена включается вся развитая поверхность воздухопроницаемой структуры, выполненной в виде металлической проволочной путанки. При этом контактная поверхность теплообмена при малых диаметрах проволоки увеличивается более, чем на порядок. Кроме того, за счет многократного переотражения внутри металлической проволочной путанки уменьшаются потери отраженной солнечной радиации от лучепоглощающей поверхности, а многократное изменение направления движения воздуха внутри самой путанки обеспечивает интенсификацию процесса теплообмена путем увеличения турбулизации воздушного потока.

Это обеспечивает интенсивный теплообмен во всем объеме поглотителя, снижение температуры конструкции, а, следовательно, и снижение тепловых потерь воздухонагревателя в окружающую среду и повышение его КПД [6].

Рассмотрим показанный на рис. 1 воздухопроницаемый матричный абсорбер из металлической проволочной путанки с постоянным коэффициентом теплопроводности λ_c . Размеры абсорбера в направлениях y и z велики и температурное поле внутри абсорбера можно считать одномерным; последнее справедливо и для температуры охлаждающей жидкости, т. е.

$$t = t(x) \text{ при } 0 \leq x \leq \delta \text{ и } t_{ж} = t_{ж}(x) \text{ при } -\infty \leq x \leq 0.$$

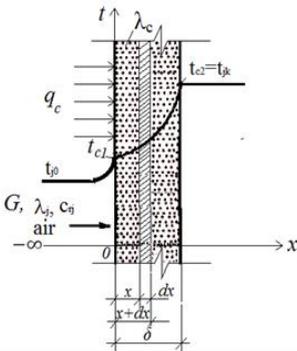


Рис. 1. Расчетная схема воздухопроницаемого матричного абсорбера из металлической проволочной путанки

На поверхности абсорбера при $x = \delta$ температура стенки равна t_{c2} , которая в свою очередь равна конечной температуре охлаждающей жидкости $t_{ж0}$ температура нагнетаемой вдоль оси Ox через абсорбер жидкости при $x \rightarrow -\infty$ равно $t_{ж0}$. Температуры t_{c2} и $t_{ж0}$ известны. Задан удельный массовый расход охлаждающей жидкости G , $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, теплоемкость $c_{рж}$ и теплопроводность $\lambda_{ж}$ которой постоянны. Необходимо найти распределение температуры в таком пористом абсорбере.

Для равномерной пористости можно считать, что на единице поверхности, нормальной к направлению потока жидкости, сечение для прохода жидкости $f_{ж} = p$, а сечение твердого скелета, участвующего в теплопроводности, равно $f_c = 1 - f_{ж} = 1 - p$. Отметим также, что если удельный массовый расход натекающей жидкости равен G , то массовый расход внутри абсорбера будет равен G/p .

Плотность теплового потока за счет теплопроводности самого абсорбера в сечениях x и $x + dx$ запишется (рис. 1) в виде

$$q_x = -\lambda_c \frac{dt}{dx}(1-p),$$

$$q_{x+dx} = -\lambda_c \frac{d}{dx} \left(t + \frac{dt}{dx} dx \right) (1-p).$$

В условиях стационарного режима изменения теплового потока на участке dx произойдет вследствие теплообмена между твердым телом и протекающей через поры жидкостью, т. е.

$$dq = q_x - q_{x+dx} = Gc_{пж} dt$$

или

$$-\lambda_c \frac{dt}{dx}(1-p) + \lambda_c \frac{dt}{dx}(1-p) + \lambda_c \frac{d^2 t}{dx^2}(1-p) dx = Gc_{пж} dt.$$

Следовательно, для области $0 \leq x \leq \delta$ дифференциальное уравнение запишется как

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \frac{Gc_{пж}}{\lambda_c(1-p)} \frac{dt}{dx} = 0. \quad (1)$$

Если обозначить

$$\frac{Gc_{пж}}{\lambda_c(1-p)} = \xi_c,$$

то соотношение (1) запишется [7]:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \xi_c \frac{dt}{dx} = 0. \quad (2)$$

Аналогичным образом можно получить дифференциальное уравнение и для области $-\infty \leq x \leq 0$:

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - \xi_{ж} \frac{dt}{dx} = 0, \quad (3)$$

где

$$\xi_{\text{ж}} = \frac{Gc_{p\text{ж}}}{\lambda_{\text{ж}}}.$$

Общее решение уравнения (2) имеет вид:

$$t = C_1 e^{\xi_{\text{ж}} x} + C_2.$$

Постоянные C_1 и C_2 определяются из граничных условий: при $x = 0$, $t = t_{c1}$ и при $x = \delta$, $t = t_{c2}$.

После определения постоянных C_1 и C_2 получаем для области $0 \leq x \leq \delta$:

$$t = t_c + \frac{t_{c2} - t_{c1}}{e^{\xi_{\text{ж}} \delta} - 1} (e^{\xi_{\text{ж}} x} - 1). \quad (4)$$

Для уравнения (3) общее решение имеет вид:

$$t_{\text{ж}} = C_3 e^{\xi_{\text{ж}} x} + C_4.$$

Это уравнение должно удовлетворять граничным условиям для потока жидкости: при $x = -\infty$, $t_{\text{ж}} = t_{\text{ж}0}$; при $x = 0$, $\lambda_{\text{ж}} \frac{dt_{\text{ж}}}{dx} = \lambda_c (1-p) \frac{dt}{dx}$.

Из граничных условий находим, что $C_4 = t_{\text{ж}0}$ и

$$C_3 = \frac{t_{c2} - t_{c1}}{e^{\xi_{\text{ж}} \delta} - 1}.$$

Тогда решение для (3) запишется как

$$t_{\text{ж}} = t_{\text{ж}0} + \frac{t_{c2} - t_{c1}}{e^{\xi_{\text{ж}} \delta} - 1} e^{\xi_{\text{ж}} x}, \quad (-\infty \leq x \leq 0). \quad (5)$$

На основании (5) из уравнения (4) можно исключить неизвестную температуру t_{c1} . При $x = 0$: $t_{\text{ж}} = t_{c1} = t_{\text{ж}0} + (t_{c2} - t_{\text{ж}0}) e^{-\xi_{\text{ж}} \delta}$.

Подставив это значение t_{c1} в уравнение (4), получим окончательное выражение для распределения температуры в пористой пластине ($0 \leq x \leq \delta$):

$$\frac{t - t_{ж0}}{t_{c2} - t_{ж0}} = e^{-\xi_c \delta \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)}. \quad (6)$$

Если безразмерную температуру абсорбера $(t - t_{ж0}) / (t_{c2} - t_{ж0})$ обозначить через Θ , уравнение (6) можно записать в следующем виде:

$$\Theta = e^{-\xi_c \delta \left(1 - \frac{x}{\delta}\right)}.$$

Средняя температура в пористой пластине для заданного значения $\xi_c \delta$, определяемая интегралом $\bar{\Theta} = 1 / \delta \int_0^{\delta} \Theta dx$, равна

$$\bar{\Theta} = \frac{\bar{t} - t_{ж0}}{t_{c2} - t_{ж0}} = \frac{1}{\xi_c \delta} \left(1 - e^{-\xi_c \delta}\right). \quad (7)$$

Если в качестве параметра выбрать безразмерный комплекс $\xi_c \delta$, зависимость (7) можно представить, как показано на рис. 2.

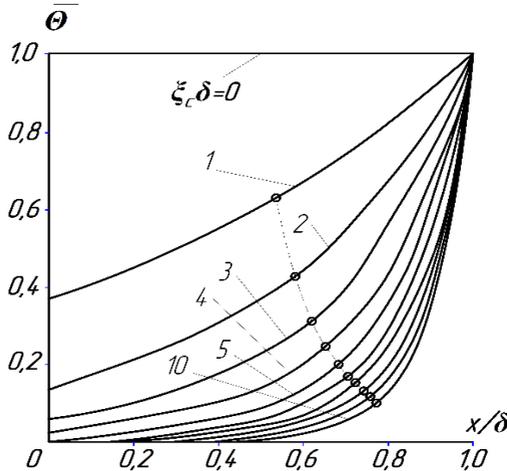


Рис. 2. Распределение безразмерной средней температуры $\bar{\Theta}$ в матричном воздухопроницаемом абсорбере из металлической проволочной путанки в зависимости от безразмерного комплекса $\xi_c \delta$

На основе выполненных исследований сделаны следующие выводы:

1. Разработана конструкция солнечного воздухонагревательного коллектора с воздухопроницаемым матричным абсорбером, отличающаяся повышенной тепловой эффективностью.

2. Предложена физико-математическая модель процесса теплообмена, происходящего в матричном воздухопроницаемом абсорбере из металлической проволочной путанки, включающая дифференциальные уравнения с граничными условиями первого и второго рода.

3. Полученные решения дифференциальных уравнений позволяют рассчитать безразмерную среднюю температуры $\bar{\Theta}$ в матричном воздухопроницаемом абсорбере из металлической проволочной путанки в зависимости от безразмерного комплекса $\xi_c \delta$, который учитывает в себя пористость абсорбера p , его толщину δ , коэффициент теплопроводности λ_c , удельный массовый расход воздуха G и его теплоемкость $c_{pж}$. Данные решения позволяют осуществлять конструктивные и поверочные расчеты разработанного солнечного воздушного коллектора.

Литература

1. Weiss, W. «Solar Heat Worldwide» Global Market Development and Trends in 2019. Detailed Market Figures 2018. 2020 edition / W. Weiss, M. Spörk-Dür // Available: www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/Solar-Heat-Worldwide-2020.pdf. – 86 p.

2. Бутузов, В. А. Солнечные коллекторы. Тенденции совершенствования конструкций // В. А. Бутузов и [др.] // Альтернативная энергетика и экология, 2009. – Т. 78, № 10. – С. 41–51.

3. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.

4. Даффи, Дж. Основы солнечной теплоэнергетики. Пер. с англ.: учебно-справочное руководство / Дж. Даффи, У. Бекман. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2013. – 888 с.

5. Патент № FAP 01588. Солнечный воздухонагреватель / Ю. К. Рашидов, Ж. Т. Орзиматов, К. Ю. Рашидов // Бюл. 2021 – Т. 239, № 6. – с. 85.

6. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

7. Madaliev, M. E. Comparison of finite-difference schemes for the first order wave equation problem / M. E. Madaliev [et al.] (2022, October) // In AIP Conference Proceedings (Vol. 2637, No. 1, p. 040022). AIP Publishing LLC.