

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕПЛООБМЕНА В СОЛНЕЧНОМ ВОЗДУШНОМ КОЛЛЕКТОРЕ  
ТРАНСПИРАЦИОННОГО ТИПА**

***И.К.Жмакин, кандидат технических наук  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
электрификации сельского хозяйства, г. Москва***

***Л.И.Жмакин, доктор технических наук  
Д.Г.Иванов, аспирант\*  
Московский государственный университет  
дизайна и технологии, г. Москва***

*Описана экспериментальная установка и методика исследования теплообмена в транспирационном солнечном коллекторе с плоским пористым абсорбером из нетканого материала. Приведены опытные данные по коэффициентам объемной теплоотдачи в абсорбере и его теплотехническим характеристикам в зависимости от скорости воздуха.*

***Транспирационный солнечный коллектор, плоский пористый абсорбер, нетканый материал, фильтрация воздуха, коэффициент объемной теплоотдачи.***

Для солнечного нагрева воздуха перспективны транспирационные коллекторы, т.е. радиационно-конвективные теплообменники, в которых организована фильтрация воздуха через пористый абсорбер [2]. Такой абсорбер может быть выполнен, например, из нетканого текстильного материала, полотно которого натянуто внутри корпуса и с одной стороны обогревается солнечным излучением. Поглощенное тепло переносится вглубь пористого слоя теплопроводным каркасом (волоконистой матрицей) и передается движущемуся в нем воздуху. Поскольку площадь контакта воздушного потока с развитой поверхностью микроканалов абсорбера обычно не определена, то интенсивность теплообмена в порах принято описывать с помощью объемного коэффициента теплоотдачи, имеющего размерность  $Вт/м^3\cdot гр$ . Найти же этот коэффициент можно только экспериментально.

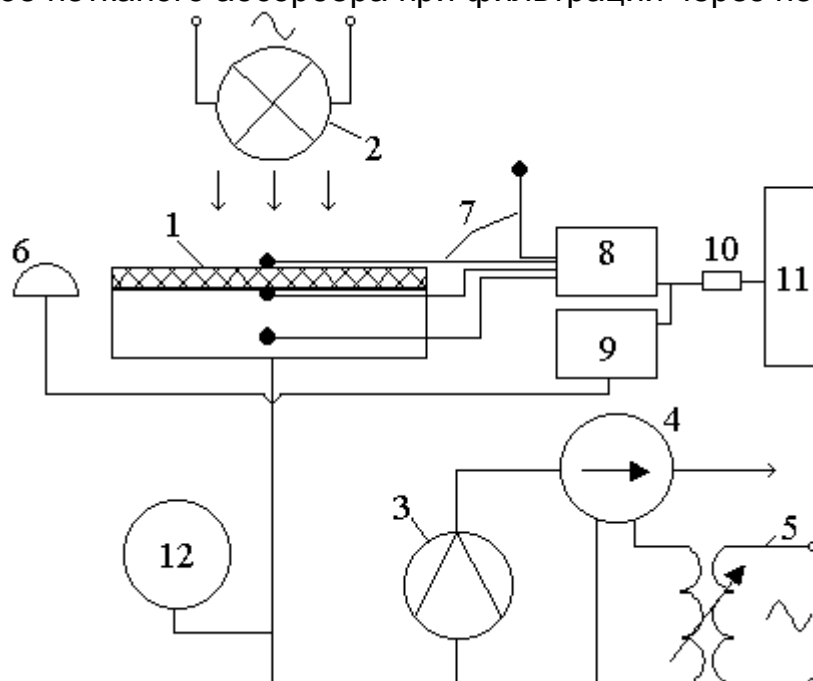
**Цель исследований** – разработка методики и экспериментальное определение коэффициентов объемной теплоотдачи и гидравлического сопротивления при движении воздуха в пористом абсорбере транспирационного солнечного коллектора в зависимости от скорости воздуха и интенсивности радиационного теплового потока.

---

\*Научный руководитель – доктор технических наук, профессор Л.И. Жмакин

© И.К.Жмакин, Л.И.Жмакин, Д.Г.Иванов, 2014

**Материалы и методика исследований.** На рис. 1 приведена схема опытной установки для исследования объемной теплоотдачи в плоском слое нетканого абсорбера при фильтрации через него воздуха.



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки**

Рабочий участок 1 установки выполнен из тонкой жести и имеет форму цилиндра диаметром 190 мм и высотой 60 мм. В его верхней части имеется сетка, на которой закреплен образец нетканого материала, а в днище цилиндра смонтирован патрубок для отвода воздуха. Радиационный тепловой поток создавался инфракрасной лампой 2, установленной на кронштейне. Фильтрацию воздуха обеспечивал вытяжной вентилятор 4, обороты которого регулировались автотрансформатором 5. Расход воздуха измерялся ротаметром 3, а перепад давления на образце находился с помощью микроманометра с наклонной трубкой 12 серии ММН-2400. Для измерения температур на поверхностях образца, а также температур воздуха до и после пористого слоя использовались хромель-копелевые термопары 7. Плотность лучистого потока определялась пиранометром 6 марки М-80. Сигналы с термопар и пиранометра поступали на промышленные контроллеры 8 и 9 типа ТРМ 138 и ТРМ 201. Эти контроллеры через преобразователь интерфейсов 10 АС3-М-220 были подключены к персональному компьютеру 11. Такая автоматизированная система измерений позволяла получать и архивировать большие массивы опытных данных с заранее заданным шагом по времени.

Эксперименты проводились на образцах нетканого материала с пористостью 96 %. Они имели форму дисков диаметром 170 мм и толщиной 5 и 8 мм, были изготовлены из полиэфирных волокон с линейной плотностью 0,82 текс и окрашены в черный цвет. Плотность теплового потока на поверхности образцов и скорость фильтрации воздуха изменялись в диапазонах 440...670 Вт/м<sup>2</sup> и 0,002...0,007 м/с, соответственно.

Для определения степени черноты облучаемой поверхности образцов использовался инфракрасный пирометр TPT 64P фирмы «Agema infrared systems», который имел устройство, задающее степень черноты объекта. Изменяя настройку этого устройства, добивались равенства показаний термометра и пирометра. На основании таких измерений степень черноты образцов составила  $0,9 \pm 0,02$ .

Коэффициенты объемной теплоотдачи находились обратным методом теории теплообмена. Для этого привлекалась математическая модель, описывающая распределения температур в пористой нетканой матрице и движущемся через нее газе в одномерном приближении [1].

Эта модель включает дифференциальное уравнение теплопроводности пористой матрицы и уравнение энергии для газа.

$$\lambda_1 \frac{d^2 t_1}{dx^2} - \alpha_v (t_1 - t_2) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_2 c_p w \frac{dt_2}{dx} = \lambda_2 \frac{d^2 t_2}{dx^2} + \alpha_v (t_1 - t_2)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha_v$  – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>3</sup>·К);  $c_p$  – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К);  $t$  – температура, К;  $w$  – средняя скорость движения воздуха в микроканалах, м/с;  $x$  – координата поперек слоя нетканого материала. Индексы 1 и 2 относятся к матрице и газу, соответственно.

В этих уравнениях выражение  $\alpha_v (t_1 - t_2)$  можно рассматривать как некоторый источниковый член; он имеет размерность  $Вт/м^3$  и описывает сток тепла от матрицы к газу за счет теплообмена между ними. Средняя скорость воздуха в микроканалах связана со скоростью фильтрации  $w_\phi$  выражением  $w = w_\phi / \Pi$ , где  $\Pi$  – пористость.

Система дифференциальных уравнений (1) решалась численно конечно-разностным методом на равномерной сетке. В вариантных расчетах плотность лучистого потока, поступающего на образец, температура воздуха на входе и теплофизические параметры сред считались известными, а коэффициент объемной теплоотдачи выбирался так, чтобы расчетные значения температур на поверхностях нетканого материала совпадали с экспериментальными.

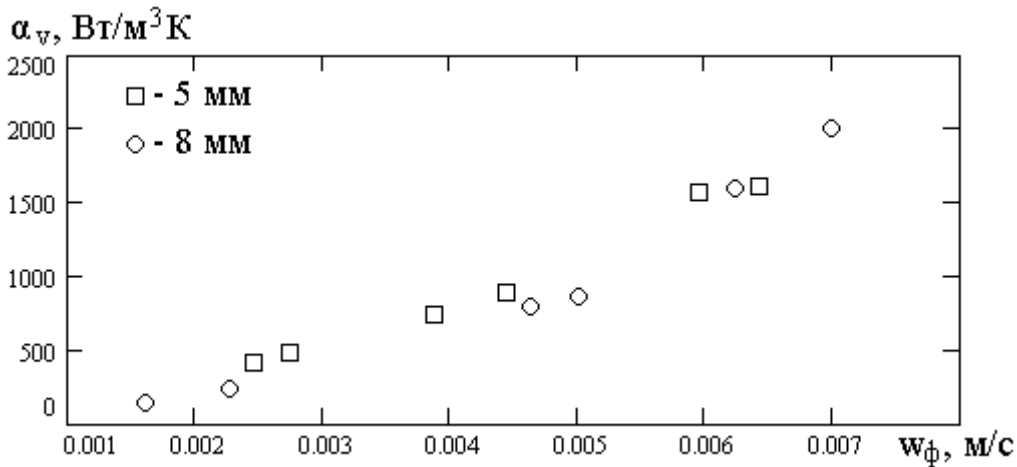
**Результаты исследований.** Полученные с помощью этой методики коэффициенты объемной теплоотдачи для образцов различной толщины показаны на рис. 2 в зависимости от скорости фильтрации воздуха.

Обработка данных, приведенных на этом рисунке, в безразмерной форме позволила получить следующее критериальное уравнение

$$\overline{Nu}_d = 0,085 Re_d^{1,67}, \quad (2)$$

в котором числа Нуссельта и Рейнольдса определены по среднему диаметру волокон  $d$  пористой среды, т.е.

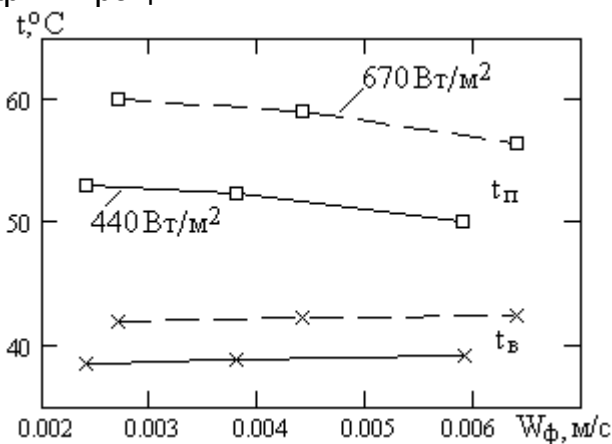
$$\overline{Nu_d} = \frac{\alpha_v d^2}{\lambda_\theta}; \quad Re_d = \frac{w d}{\nu_\theta} . \quad (3)$$



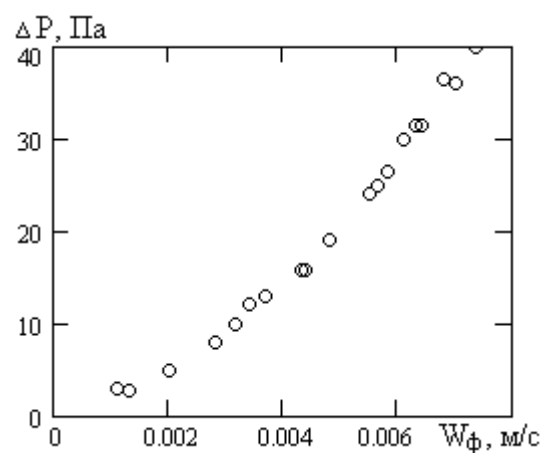
**Рис. 2. Коэффициенты объемной теплоотдачи в нетканом материале**

Таким образом, уравнение (2) получено для условий внешнего теплообмена, когда в пористом теле рассматривается наружное обтекание воздухом его элементарных волокон.

На рис. 3 показаны температуры ( $t_\Pi$ ) на внешней (облучаемой) поверхности нетканого абсорбера толщиной 5 мм и температуры прошедшего через него воздуха ( $t_B$ ) в зависимости от скорости фильтрации; данные приведены для двух значений интенсивности лучистого теплового потока. При этом температура воздуха на входе в абсорбер составляла +23 °С. На рис. 4 представлены опытные данные по гидравлическому сопротивлению абсорбера толщиной 5 мм для различных скоростей фильтрации.



**Рис. 3. Температуры облучаемой поверхности абсорбера и подогретого воздуха**



**Рис. 4. Гидравлическое сопротивление нетканого абсорбера**

Простейшие расчеты показали, что в экспериментах на описанной выше лабораторной установке КПД преобразования радиационного теплового потока в теплоту был низким и не превышал 25 %. Это обусловлено значительными тепловыми потерями, т.к. корпус рабочего участка не имел ни теплоизоляции, ни прозрачного покрытия над абсорбером. В натуральных образцах транспирационных воздушных коллекторов эти недостатки будут устранены, что позволит существенно повысить их теплотехническое совершенство.

### **Выводы**

Проведено экспериментальное исследование теплообмена в солнечном воздушном коллекторе транспирационного типа с пористым абсорбером из нетканого материала. Определены температуры на поверхностях абсорбера и температуры воздуха при различных скоростях его фильтрации и плотностях радиационного потока; измерено также гидравлическое сопротивление абсорбера. Обратным методом теории теплообмена найдены коэффициенты объемной теплоотдачи в нетканом абсорбере солнечного коллектора.

### **Список литературы**

1. Жмакин И.К. Моделирование теплопереноса в солнечном воздушном коллекторе транспирационного типа / И.К. Жмакин, Л.И. Жмакин, Д.Г. Иванов / Науковий вісник НУБІП України. – К., 2014. – Вип. 194, ч. 1. –С. 31–36.
2. Duffie J.A, Beckman W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 2 Ed., J.Wiley □ Sons, USA, 1991. – 919 p.

*Описано експериментальну установку і методику дослідження теплообміну в транспіраційному сонячному колекторі з плоским пористим абсорбером з нетканого матеріалу. Наведено дослідні дані щодо коефіцієнтів об'ємної тепловіддачі в абсорбері та його теплотехнічних характеристик залежно від швидкості повітря.*

***Транспіраційний сонячний колектор, плоский пористий абсорбер, нетканий матеріал, фільтрація повітря, коефіцієнт об'ємної тепловіддачі.***

*The experimental unit and the method have been described concerned the heat transfer investigations in transpired solar collector provided with flat porous absorber fabricated from nonweave material. The data obtained on coefficients of volume heat transfer and some thermal characteristics of the absorber depending on air velocities have been presented.*

***Transpired solar collector, flat porous absorber, nonweave material, air filtration, coefficient of volume heat transfer.***