

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА 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 математическая модель теплообмена в транспирационном солнечном коллекторе с плоским пористым абсорбером из нетканого материала. Проведен расчет температурных полей в абсорбере, теплопроизводительности и эффективности коллектора в зависимости от скорости воздуха и интенсивности солнечной радиации.

Транспирационный солнечный коллектор, плоский пористый абсорбер, нетканый материал, фильтрация воздуха, эффективность коллектора.

Воздушные солнечные коллекторы способны обеспечить умеренный подогрев атмосферного воздуха с последующей подачей его в разнообразные сушильные установки, системы отопления зданий, горелки теплогенераторов [6]. Известны коллекторы конвективного и транспирационного типов. В первом – поток воздуха омывает непроницаемую поверхность абсорбера, нагреваемую солнечным излучением, а во втором – происходит фильтрационное движение воздуха сквозь пористую структуру абсорбера. Такой абсорбер может быть выполнен, например, в виде перфорированного металлического листа или слоев металлических сеток. Возможно также использование пористых текстильных материалов (тканей или нетканых полотен).

В транспирационных коллекторах лучистый тепловой поток переносится теплопроводностью вглубь пористого абсорбера и передается воздуху за счет объемной теплоотдачи. Это позволяет заметно интенсифицировать процесс подогрева благодаря сильно развитой поверхности теплообмена [5–10].

Цель исследований – разработка математической модели транспирационного воздушного коллектора с текстильным абсорбером и расчет его теплотехнических характеристик при различных внешних условиях.

Материалы и методика исследований. На рис. 1 показана принципиальная схема коллектора, а на рис. 2 – расчетная схема теплопереноса в пористом абсорбере.

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

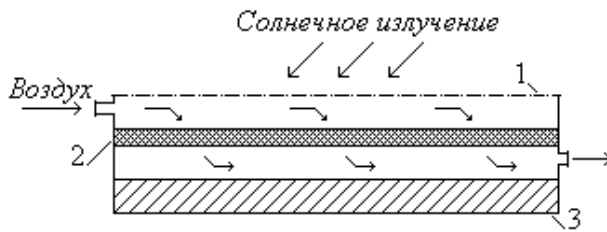


Рис. 1. Схема транспирационного коллектора:
1 – прозрачное покрытие; 2 – пористый абсорбер; 3 - теплоизоляция

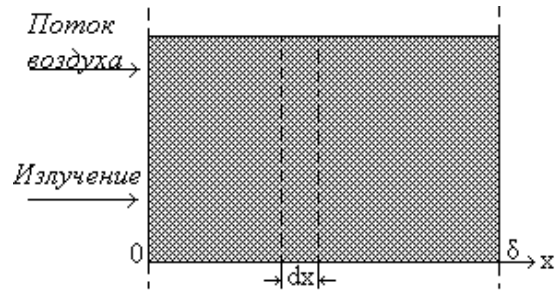


Рис. 2. Расчетная схема абсорбера

Перенос теплоты между взаимопроникающими средами в пористом абсорбере воздушного коллектора рассматривался в стационарном одномерном приближении. Были приняты допущения об изотропности теплопроводности материала абсорбера и независимости его теплофизических свойств, а также свойств воздуха от температуры. Тогда процесс теплообмена можно описать следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \lambda_1 \frac{d^2 t_1}{dx^2} - \alpha_v (t_1 - t_2) = 0; \\ \rho_2 c_{p2} w \frac{dt_2}{dx} = \lambda_2 \frac{d^2 t_2}{dx^2} + \alpha_v (t_1 - t_2), \end{cases} \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м³; α_v – объемный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м³·К); c_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К); t – температура, К; w – средняя скорость движения воздуха в микроканалах, м/с, связанная со скоростью фильтрации w_ϕ выражением $w = w_\phi / \Pi$, где Π – пористость материала абсорбера, x – координата поперек пористого слоя; индексы 1 и 2 относятся к пористой матрице и воздуху, соответственно.

Система (1) решалась численно; граничные условия (плотность теплового потока и температура воздуха) задавались на верхней облучаемой поверхности абсорбера, после чего рассчитывались распределения температур сред по толщине пористого слоя в зависимости от скорости фильтрации воздуха, а также теплопроизводительность и эффективность коллектора.

Модельные расчеты были проведены для опытного образца транспирационного воздушного коллектора со следующими конструктивными характеристиками: корпус из ПВХ профиля (размеры 1430x695x85 мм); прозрачное покрытие – лист сотового поликарбоната толщиной 4 мм; абсорбер – нетканое полотно (1360x620x5 мм) из полиэфирных волокон, плотно натянутое внутри корпуса и окрашенное в черный цвет.

Плотность теплового потока на обогреваемой стенке абсорбера определялась по уравнению

$$q_{cm} = E \eta_o - K_n (t_{cm} - t_o), \quad (2)$$

где E – интенсивность суммарной солнечной радиации, Вт/м²; η_o – оптический КПД коллектора; K_n – коэффициент теплопередачи через прозрачное покрытие, Вт/(м²·К); t_{cm} и t_o – температура абсорбера и окружающей среды соответственно, К. Расчеты показали, что коэффициент K_n зависит от скорости фильтрации воздуха, температуры абсорбера и скорости ветра; для опытного образца коллектора он изменялся в диапазоне 3,5–4,3 Вт/м²·К. Расчетное значение оптического КПД коллектора составило 0,72.

Для определения коэффициентов объемной теплоотдачи в пористых материалах известны эмпирические соотношения [2–4], расчеты по которым существенно различаются (в 3–7 раз). Нами использовалось критериальное уравнение, приведенное в [3]:

$$Nu = 0,004 Re Pr \quad (3)$$

В этом уравнении критерии Нуссельта и Рейнольдса определены по среднему диаметру волокон пористой среды: $Nu_d = \alpha_v d^2 / \lambda_g$; $Re_d = wd / \nu_g$, т.е. в пористой среде рассматривается внешний теплообмен при наружном обтекании волокон воздухом. Коэффициенты объемной теплоотдачи, рассчитанные по соотношению (3), изменялись в интервале (10^3 – 10^4) Вт/м²·К.

Эффективный коэффициент теплопроводности волокнистого абсорбера вычислялся по рекомендованному в работе [1] уравнению, полученному с помощью теории обобщенной проводимости:

$$\lambda = \lambda_{me} \left[\Pi^2 \lambda_g / \lambda_{me} + (1 - \Pi^2) + \frac{4\Pi(1 - \Pi)\lambda_g / \lambda_{me}}{1 + \lambda_g / \lambda_{me}} \right], \quad (4)$$

где λ_g и λ_{me} – коэффициенты теплопроводности воздуха и монолитного волокнообразующего полимера; Π – пористость. Расчетные значения эффективной теплопроводности абсорбера уменьшались с увеличением его пористости и в диапазоне $0,5 < \Pi < 0,8$ составляли 0,10–0,05 Вт/м²·К, что соответствовало опытным данным.

Результаты исследований. На рис. 3 приведены температурные поля в абсорбере с пористостью $\Pi=0,6$, рассчитанные при различных интенсивностях солнечного излучения и скоростях фильтрации воздуха. Во всех случаях температура воздуха на входе в коллектор составляла 20 °С.

Выше было отмечено, что плотность теплового потока на верхней стенке абсорбера определялась по формуле (2) с учетом тепловых потерь. В этой формуле присутствует неизвестная температура поверхности абсорбера. Её значением вначале задавались, а затем уточняли в ходе итерационного процесса. После расчета температурных распределений находились удельная теплопроизводительность и КПД коллектора:

$$q_{y\partial} = g_2 c_{p2} (t_2^{6bx} - t_2^{6x}); \quad \eta = q_{y\partial} / E, \quad (5)$$

где $g_2 = \rho_2 w \phi$ – удельный расход воздуха в абсорбере, кг/м²·с. Для двух режимов, показанных на рис. 3, значения удельной теплопроизводительности и КПД составили $q_{y\partial}=470$ Вт/м²; $\eta=0,59$ и $q_{y\partial}=320$ Вт/м²; $\eta=0,64$, соответственно.

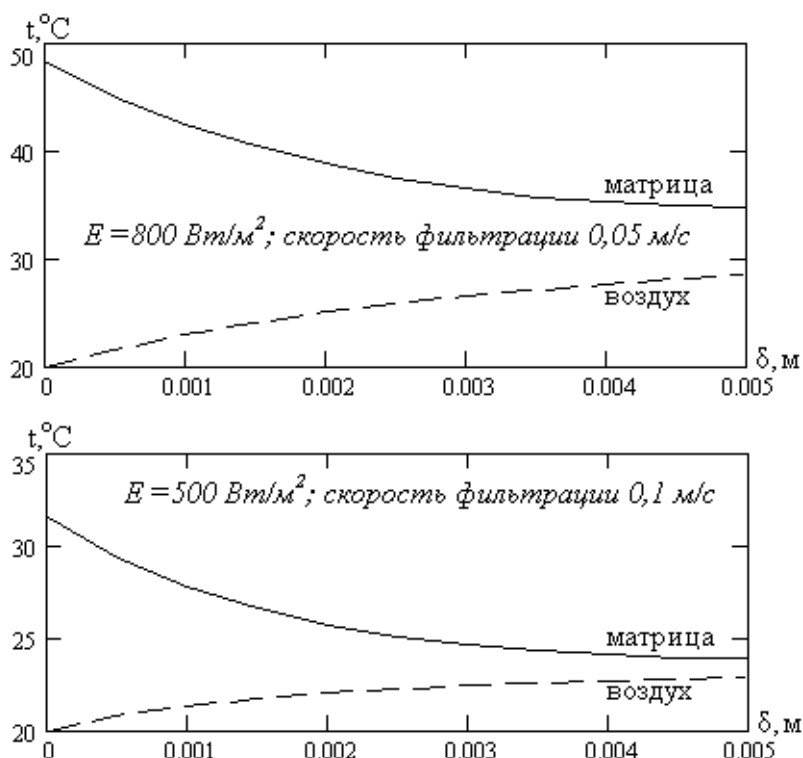


Рис. 3. Распределение температур в пористом абсорбере при $\Pi=0,6$

Рассмотренная на рис. 1 схема транспирационного воздушного коллектора может условно считаться «прямоточной», т.к. в ней направления теплового и воздушного потоков в абсорбере совпадают. Нами были проведены расчеты и для «противоточного» варианта, когда потоки тепла и воздуха в абсорбере противоположны. Полученные результаты показаны на рис. 4.

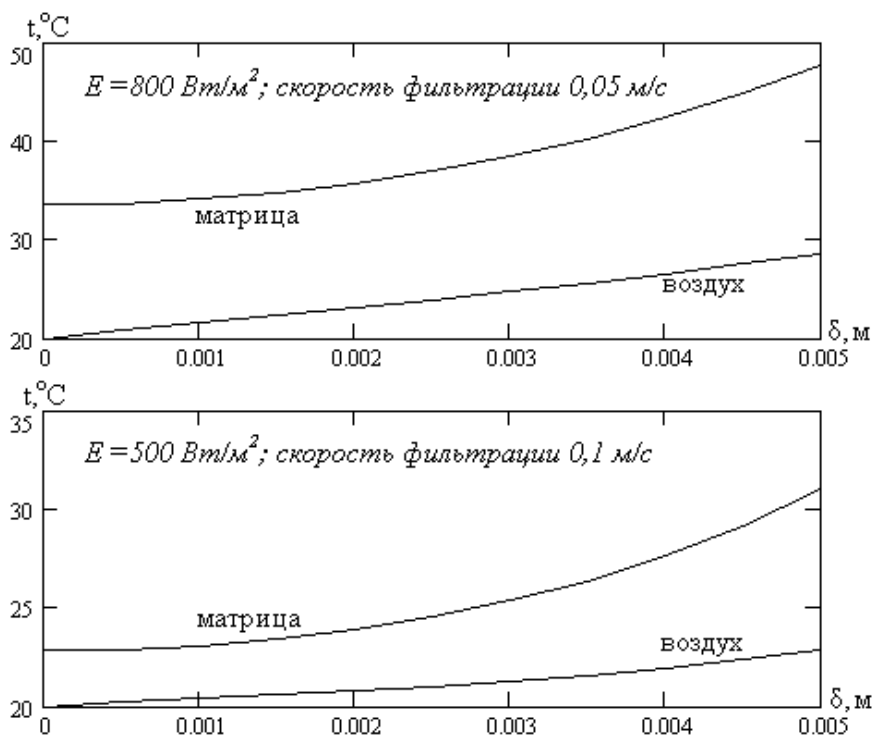


Рис. 4. Температурные поля в пористом абсорбере при $\Pi=0,6$

Удельная теплопроизводительность и КПД транспирационного коллектора в «противоточном» варианте оказались на 1–1,5 % выше, чем в «прямоточном». Однако такое различие находится в пределах погрешности вычислений и в дальнейшем может не учитываться.

В работе проанализировано влияние теплопроводности пористого абсорбера на эффективность нагрева воздуха. Для этого был проведен расчет температурных полей при фильтрации воздуха в абсорбере из латунной сетки. В данном случае на всех режимах удельная выработка тепла в коллекторе повышалась на 4,5–5,4 %, а температурное поле абсорбера приближалось к равномерному. Благодаря увеличению среднего температурного напора между пористой матрицей и движущимся через нее воздухом возрастал и передаваемый тепловой поток.

Выводы

Математическое моделирование подтвердило достаточно высокую эффективность воздушного солнечного коллектора транспирационного типа с текстильным абсорбером. Расчеты гидравлических сопротивлений абсорбера с пористостью $\Pi = 0,6$ показали, что падение давления в нем при скорости фильтрации воздуха 0,1 м/с составляет 18 Па. В этих условиях мощность, необходимая для привода вентилятора, не превышает 2,5 Вт.

Полученные в работе расчетные результаты нуждаются в экспериментальной проверке.

Список литературы

1. Дульнев Г.Н. Теплопроводность смесей и композиционных материалов / Г.Н. Дульнев, Ю.П. Заричняк. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
2. Зейгарник Ю.А. Опытные данные по теплоотдаче и гидравлическому сопротивлению в неупорядоченных пористых структурах / Ю.А. Зейгарник, Ф.П. Иванов, Н.П. Икрянников // Теплоэнергетика. – 1991. – №2. – С. 33–38.
3. Пелевин Ф.В. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в пористых сетчатых материалах / Ф.В. Пелевин // Тр. 2-й Российской нац. конф. по теплообмену. – М., 1998. – Т.5. – С. 254–257.
4. Теплообменные устройства газотурбинных и комбинированных установок / [под ред. А.И.Леонтьева]. – М: Машиностроение, 1985. – 360 с.
5. Arulanandam S. J., K.G.T. Hollands and E. Brundett. (1999). A CFD Heat Transfer Analysis of the Transpired Collector Under No-Wind Conditions, Solar Energy, V. 67, 1999. – P. 93–100.
6. Duffie J.A, Beckman W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 2 Ed., J.Wiley & Sons, USA, 1991. – 919 p.
7. Dymond C. and C. Kutscher. Development of a Flow Distribution and Design Model for Transpired Solar Collectors, Solar Energy, V. 60, 1997. –P. 291–300.
8. Gawlik K.M., Christensen C.B., Kutscher C.F., A Numerical and Experimental Investigation of Low-conductivity Unglazed Transpired Solar Air Heaters, J. of Solar Energy Engineering V. 127, 2005. – P. 153–155.
9. Fleck B.A., R.M. Meier and M.D. Matovic. (2002). A Field Study of the Wind Effects on the Performance of an Unglazed Transpired Solar Collector, Solar Energy, V. 73, 2002. – P. 209–216.

10.Kutscher C.F., C.B. Christensen and G.M. Barker. Unglazed Transpired Solar Collectors: Heat Loss Theory, J. of Solar Energy Engineering, V. 115, 1993. – P. 182–188.

Описано математичну модель теплообміну в транспіраційному сонячному колекторі з плоским пористим абсорбером з нетканого матеріалу. Проведено розрахунок температурних полів в абсорбері, теплопродуктивності та ефективності колектора залежно від швидкості повітря та інтенсивності сонячної радіації.

Транспіраційний сонячний колектор, плоский пористий абсорбер, нетканий матеріал, фільтрація повітря, ефективність колектора.

A mathematical model have been described concerned the heat transfer in transpired solar collector provided with flat porous absorber fabricated from nonweave material. The temperature distributions in the absorber as well, as the collector's capacities and efficiencies have been calculated depending on air velocities and the solar radiation intensities.

Transpired solar collector, flat porous absorber, nonweave material, air filtration, collector's efficiency

УДК 62-533.65

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНЮВАННЯ ВПЛИВУ СВІТЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НА РІСТ І РОЗВИТОК РОСЛИН У СПОРУДАХ ЗАКРИТОГО ГРУНТУ

**В.В Козирський, доктор технічних наук
І.М.Болбот, кандидат технічних наук
Ю.О. Батанов, аспірант***

Розглянуто математичну модель оцінювання впливу світлозабезпечення на ріст та розвиток рослин у системі рослина-ґрунт-повітря. Модель описує якісні показники росту і розвитку рослини, що знаходиться в тісній взаємодії з динамікою параметрів навколишнього середовища в спорудах закритого ґрунту.

Математична модель, світлозабезпечення, фотосинтез, інтенсивність освітлення, світловий потік, фотосинтетично-активна радіація, пряма і розсіяна радіація, споруда закритого ґрунту.

Практичний досвід експлуатації автоматичних систем керування в тепличних господарствах дозволяє зробити висновок, що світлозабезпе-

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В.В Козирський

© В.В Козирський, І.М.Болбот, Ю.О. Батанов, 2014