

## ДВУХФАЗНЫЙ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ЯЧЕЙКАХ С КОСВЕННЫМ ИСПАРИТЕЛЬНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

М.В. Горбачев<sup>1</sup>, Х.К. Кхафаджи<sup>1</sup>, В.И. Терехов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Новосибирский государственный технический университет  
630073, Новосибирск, Россия*

<sup>2</sup> *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
630090, Новосибирск, Россия*

Испарительное охлаждение является одним из самых простых и эффективных способов охлаждения потоков воздуха. При прямом испарительном охлаждении, поток воздуха, находящийся в непосредственном контакте с пленкой воды, охлаждается за счет испарения. Данный способ испарительного охлаждения основан на термодинамической неравновесности атмосферного воздуха и психрометрической разности температур сухого и мокрого термометров. Установки данного типа относятся к возобновляемым энергетическим источникам для получения холода [1 – 3].

На рис. 1 показаны схемы косвенно-испарительных теплообменников, которые представляют собой два плоско - параллельных канала, высота которых равна  $d=6$  мм, длина  $l=50d$ . В нижнем канале протекает «сухой» поток воздуха, а стенки верхнего канала покрыты пленкой воды, в котором спутно (рис. 1,а) или встречно (рис. 1,б) по отношению к нижнему каналу движется влажный поток воздуха. С наружной стороны ячейки теплоизолированы; принимается, что толщина жидкой пленки на стенках мала и на гидродинамику потока в канале и термическое сопротивление она влияния не оказывает. Режим течения теплоносителей в обоих каналах принимался ламинарным.

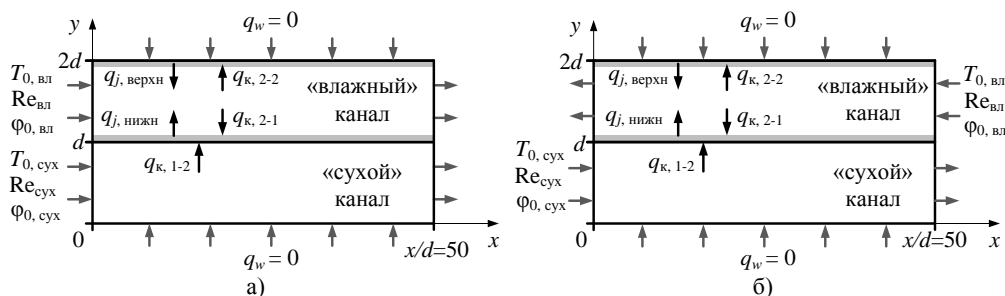


Рис. 1. Расчетные схемы ячеек с косвенно-испарительным охлаждением:  
а) проточного; б) противоточного типа

В сухом канале охлаждаемый поток воздуха передает явную теплоту  $q_{к, 1-2}$  через разделяющую стенку ячейки пленке воды. Последняя воспринимает теплоту от основного потока воздуха и, испаряясь во влажном канале, передает ему скрытую теплоту  $q_{j, нижн}$  и  $q_{j, верхн}$ . При этом температура вспомогательного потока при контакте с водой уменьшается, отдавая ей теплоту  $q_{к, 2-1}$  и  $q_{к, 2-2}$  в явном виде [4, 6, 7]. Теоретическим пределом охлаждения в рассматриваемых косвенно-испарительных ячейках является температура адиабатического насыщения.

Система дифференциальных уравнений, описывающих процессы испарения пленки воды и течения воздуха в каналах (в двумерном приближении), включает в себя уравнения: неразрывности, движения, энергии и диффузии [2, 5].

Полученная система дифференциальных уравнений совместно с граничными условиями решалась численно с использованием метода конечных объемов [2, 5]. При дискретизации использовалась равномерная сетка, оптимальный размер которой составлял 200x70 в продольном и поперечном направлениях, соответственно. Выходными данными моделирования являются основные параметры потоков: поля скоростей, температур, давлений, массовых концентраций, а также коэффициентов трения, теплоотдачи и массоотдачи.

На рис. 2 приведены профили температур для сухого и влажного каналов для прямоточной и противоточной схем течения теплоносителей. Откуда следует, что при противоточной схеме течения потоков воздуха (рис. 2,б) на выходе можно получить более низкую температуру сухого потока воздуха.

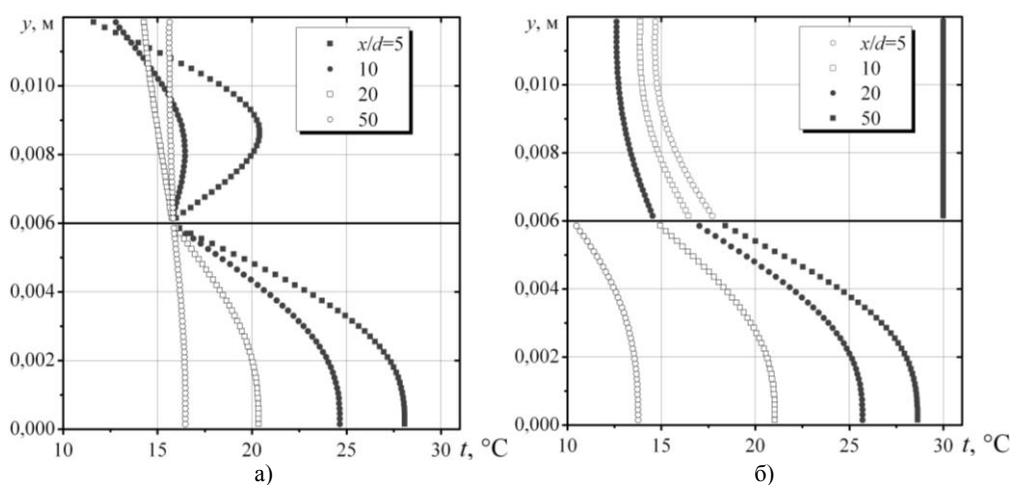


Рис. 2. Профили температур в ячейках с косвенно-испарительным охлаждением:  
 а) прямоточного; б) противоточного типа  
 ( $Re_{\text{сух}} = Re_{\text{вл}} = 100$ ;  $t_{0, \text{сух}} = t_{0, \text{сух}} = 30^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_{0, \text{сух}} = \varphi_{0, \text{сух}} = 0$ )

Следует так же отметить, что независимо от направления движения потоков теплоносителей воздух можно охладить на 15-20 °С, что практически вдвое меньше, чем при прямом адиабатическом охлаждении [6].

На рис. 3 графические зависимости изменения локальных значений удельных тепловых потоков по длине теплообменных ячеек. Видно, что при противоточной схеме течения теплоносителей в косвенно-испарительной ячейке значения теплового потока  $q_{k1-2}$  по длине канала всегда принимают положительные значения. Следовательно, для данной схемы течения теплоносителей имеется некоторый «задел» для охлаждения (при рассматриваемых параметрах). Таким образом, данная схема течения потоков воздуха более целесообразна для практического применения, однако этот вывод требует дополнительных исследований.

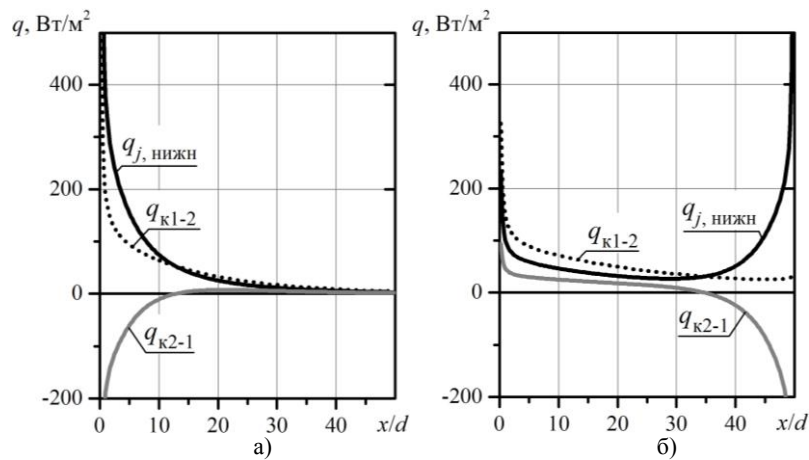


Рис. 3. Изменение удельных тепловых потоков по длине ячеек:  
 а) прямоточного; б) противоточного типа  
 ( $Re_{\text{сух}} = Re_{\text{вл}} = 100$ ;  $t_{0, \text{сух}} = t_{0, \text{сух}} = 30^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_{0, \text{сух}} = \varphi_{0, \text{сух}} = 0$ )

Разработанная математическая модель, описывающая процессы теплопереноса в ячейках с косвенно-испарительным охлаждением, позволяет проводить оптимизационный анализ сложной многопараметрической задачи. На основе численных расчетов выявлены зависимости основных параметров теплоносителей, к которым относятся как температурно-влажностные, так и зависимости изменения локальных значений удельных тепловых потоков от исходных параметров. Показано, что противоточная схема течения в косвенно-испарительных охлаждающих ячейках более эффективна по сравнению с прямоточной. Установлено, что воздухоохладители косвенно-испарительного типа обладают целым рядом положительных характеристик.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (проект 14-19-00402).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Терехов В.И., Кхафаджи Х.К., Горбачев М.В. Возможности методов испарительного охлаждения для применения в системах кондиционирования воздуха [Электронный ресурс] / В.И. Терехов, Х.К. Кхафаджи, М.В. Горбачев // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием, Новосибирск, 24 – 26 марта 2015 г. – Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2015. – С. 180-189. - 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). II Всероссийская научная конференция с международным участием «Энерго- и ресурсоэффективность малоэтажных жилых зданий».
2. Khafaji H.Q., Ekaid A.L., Terekhov V.I. A Numerical Study of Direct Evaporative Air Cooler Forced Lamina Convection between Parallel-Plates Channel with Wetted Walls// J. of Eng. Therm., 2015, Vol. 24, No. 2, pp. 113–122.
3. Anisimov S., Pandelidis D. Numerical study of the Maisotsenko cycle heat and mass exchanger, Int. J. Heat and Mass Transfer, 2014, Vol. 75, pp. 75–96.
4. Duan Z. etc. Indirect Evaporative Cooling: Past, Present and Future Potentials, Renew. Sust. Energy, 2012, vol. 16, pp. 6823–6850.
5. Patankar S.V. Numerical heat transfer in fluid flow. Hemisphere/McGraw-Hill, New York, USA, 1980. – 197 p.
6. Boyarschinov B.F., Volchkov E.P., Terekhov V.I. Heat and Mass Transfer with Liquid Evaporation into Gas Flow, Russian Journal of Eng. Thermoph., 1991, No.1, pp. 93-112.
7. Shah R.K., London A.L. Laminar flow forced convection in ducts. Academic Press, New York, USA, 1978.