



УДК 697.973

DOI: 10.17673/Vestnik.2021.04.20

А. А. НАДЕЕВ
А. В. БАРАКОВ
Д. А. ПРУТСКИХ

К РАСЧЕТУ АППАРАТА ВОДОИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА

TO THE CALCULATION OF THE APPARATUS OF WATER-EVAPORATIVE AIR COOLING

Использование в системах вентиляции и кондиционирования воздуха метода испарительного охлаждения позволяет существенно сократить расход энергии при их эксплуатации. В работе описана конструкция и принцип работы аппаратов водоиспарительного охлаждения воздуха, в которых в качестве насадки применяется псевдооживленный слой дисперсного материала, непрерывно циркулирующий в рабочей камере. Описан испытательный образец воздухоохладителя, приведены параметры его насадки. Приведена методика его экспериментального исследования и применяемые измерительные приборы. Приведены полученные по опытным данным критериальные соотношения для коэффициента эффективности воздухоохладителя, гидравлического сопротивления рабочей камеры и межфазного коэффициента теплоотдачи.

Ключевые слова: воздухоохладитель, насадка, коэффициент эффективности, гидравлическое сопротивление, коэффициент теплоотдачи

Одним из резервов энергосбережения, как известно, является использование возобновляемых источников энергии. Способ водоиспарительного охлаждения, основанный на термодинамической неравномерности атмосферного воздуха, позволяет существенно сократить расход энергии в системах вентиляции и кондиционирования воздуха [1, 2].

Основным элементом аппаратов водоиспарительного охлаждения воздуха является

The use of evaporative cooling in ventilation and air conditioning systems can significantly reduce energy consumption during their operation. The paper describes the design and principle of operation of water-evaporative air cooling apparatus, in which a fluidized bed of dispersed material is used as a packing, which is continuously circulating in the working chamber. A test sample of an air cooler is described, the parameters of its packing are given. The technique of its experimental research and the used measuring instruments are presented. The criterion ratios for the efficiency factor of the air cooler, the hydraulic resistance of the working chamber and the interfacial heat transfer coefficient are given.

Keywords: air cooler, packing, efficiency coefficient, hydraulic resistance, heat transfer coefficient

теплообменная секция (насадка). В воздухоохладителях применяются насадки различного вида (например, подвижные и неподвижные), выполненные из различных материалов и имеющие различные геометрические и теплофизические характеристики.

Одним из видов является насадка, представляющая собой циркулирующий по кольцевому каналу слой псевдооживленного дисперсного материала [3]. Она обладает высокой

удельной поверхностью контакта взаимодействующих фаз и, следовательно, высокой интенсивностью тепло- и массообмена между ними. Материал данной насадки – устойчивые к коррозии частицы различной формы с эквивалентным диаметром от 1 до 6 мм, что определяет их высокую смачиваемость. Такая насадка имеет низкую стоимость и позволяет осуществлять непрерывную регенеративную передачу теплоты от одного потока воздуха к другому.

Принципиальная схема воздухоохладителей с дисперсной насадкой приведена на рис. 1 [4]. Их основным элементом является кольцевая рабочая камера 1, разделённая двумя перегородками 7 на «сухую» секцию 4 и «влажную» секцию 5. В перегородках выполнены переточные окна 8 для свободной циркуляции дисперсного материала (насадки) 9. Газораспределительное устройство 2 с наклонными лопатками 6 служит для формирования циркулирующего псевдооживленного слоя. Форсунки 3 предназначены для увлажнения материала во «влажной» секции рабочей камеры.

Воздухоохладители данного типа работают следующим образом. Дисперсный материал насадки располагается в рабочей камере аппарата. Его высота в псевдооживленном состоянии не должна превышать высоты переточных окон перегородки. При прохождении охлаждаемого и охлаждающего воздуха через газораспреде-

лительное устройство на его лопатках происходит формирование наклонных струй, которые переводят насадку к псевдооживленному состоянию. При этом происходит его перемещение (циркуляция) по кольцевому каналу рабочей камеры.

На входе во «влажную» секцию рабочей камеры насадка смачивается водой с помощью форсунок. При движении смоченной насадки к выходу из «влажной» камеры (ко входу с «сухую» камеру) она контактирует со вспомогательным (охлаждающим) потоком воздуха. При этом происходит испарение влаги с поверхности частиц, что приводит к уменьшению их температуры, т. е. реализуется испарительное охлаждение твёрдого материала [5]. Затем охлаждённые частицы насадки поступают в «сухую» камеру и в свою очередь снижают температуру основного (охлаждаемого) потока воздуха.

Однако известные в настоящее время результаты экспериментальных и теоретических исследований таких аппаратов [6] не позволяют их проектировать, что препятствует их распространению в промышленности. Исходя из вышесказанного данные экспериментальные исследования являются актуальными.

Для исследования процессов тепло- и массообмена в воздухоохладителях данного типа, а также их гидродинамических параметров был сконструирован испытательный образец.

Основным его элементом является рабочая камера, в которой осуществляется процесс охлаждения воздуха. Общий вид рабочей камеры воздухоохладителя показан на рис. 2. Она образована двумя соосно расположенными обечайками, имеющими высоту 0,5 мм и диаметры 0,4 и 0,2 м, соответственно для внешней и внутренней. Для визуального наблюдения за процессом псевдооживления внешняя обечайка изготовлена из органического стекла.

Рабочая камера разделена двумя вертикальными перегородками, имеющими переточные окна, на две равные части – «сухую» и «влажную» секции. Газораспределительное устройство аппарата представляет собой жалюзийную кольцевую беспровальную решётку с изменяемым углом наклона лопаток от 20 до 40° к горизонтальной плоскости. Отвод основного и вспомогательного потоков воздуха производится через двухсекционный газоотводящий патрубок.

Для подачи воздуха в исследуемый аппарат применялся высоконапорный центробежный вентилятор Ц10-28 № 4. Для управления его производительностью применялся преобразователь частоты Delta VFD150E43A. Расход воздуха измерялся термоанемометра-

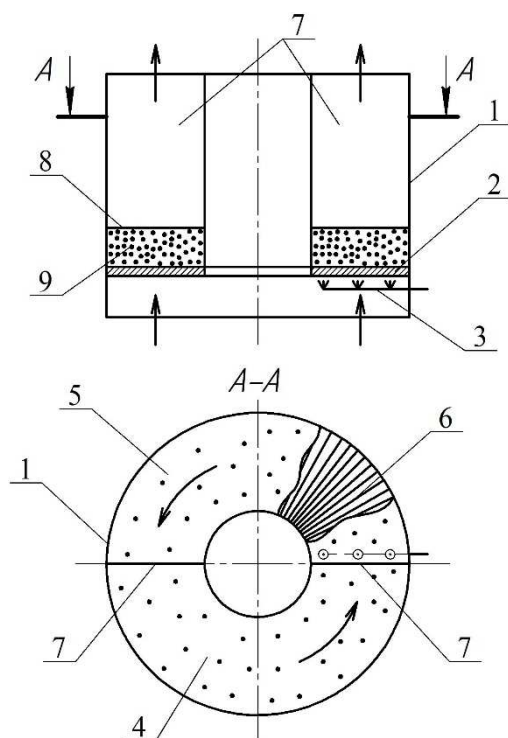


Рис. 1. Принципиальная схема аппарата



Рис. 2. Общий вид рабочей камеры воздухоохладителя

ми ТТМ-2/4-06. Температура воздуха в различных точках аппарата и температура впрыскиваемой воды измерялись с помощью датчиков температуры ТП-208. Потери давления в «сухой» и «влажной» камерах аппарата (гидравлическое сопротивление) измерялись датчиками дифференциального давления АИР-10Н. Все датчики были подключены к ПИД-регулятору ТРМ 148. Регистрация опытных данных осуществлялась с помощью SCADA-системы Owen Process Manager.

При проведении экспериментальных исследований в качестве насадки аппарата применялись два разных дисперсных материала. Первый материал – частицы из алюминиевого сплава плотностью $\rho_n = 2850 \text{ кг/м}^3$ и эквивалентным диаметром $d_s = 2,6; 2,9; 4,6; 5,0 \text{ мм}$. Второй материал – кварцевый песок, $\rho_n = 2650 \text{ кг/м}^3$, $d_s = 2,7; 3,2 \text{ мм}$. Масса дисперсного материала в рабочей камере изменялась от 0,5 до 4,0 кг. Для увлажнения материала применялись механические форсунки, позволяющие регулировать расход воды от 0,0004 до 0,0024 кг/с.

Экспериментальные исследования проводились по следующей методике. В рабочую камеру аппарата производилась загрузка дисперсного материала насадки, имеющей заданную массу. После включения вентилятора добивались устойчивой циркуляции насадки в «сухой» и «влажной» секциях путём регулирования расхода воздуха. Затем производилась подача воды в форсунки и осуществлялось смачивание материала насадки на входе во «влажную» секцию.

После установления квазистационарного режима работы аппарата производилась фиксация расхода основного и вспомогательного потоков воздуха и их температуры, измеряемой в 12 точках рабочей камеры. Также фиксировались потери давления при прохождении воздуха через псевдооживленный слой материала в «сухой» и «влажной» секциях. Суммарно было исследовано свыше 50 режимов работы воздухоохладителя, отличающихся типом и массой насадки, и расходом воздуха и воды.

По результатам экспериментов вычислялся коэффициент эффективности аппарата по формуле

$$\eta = \frac{t'_g - t''_{g\text{cp}}}{t'_g - t_m} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где t'_g – температура воздуха на входе в «сухую» камеру, °С; $t''_{g\text{cp}}$ – среднеинтегральная температура воздуха на выходе из «сухой» камеры, °С; t_m – температура «мокрого» термометра, °С.

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что основными параметрами воздухоохладителя, влияющими на его тепловую эффективность, являются масса (высота) насадки и температура воздуха в «сухой» секции рабочей камеры. Аппроксимация полученных экспериментальных данных методом наименьших квадратов позволила получить следующие эмпирические критериальные соотношения:

– коэффициент эффективности воздухоохладителя

$$\eta = 7,06 \cdot \left(\frac{w_g}{w_g^{\text{min}}} \right)^{1,02} \cdot \left(\frac{h_0}{d_s} \right)^{0,94}, \quad (2)$$

где w_g – скорость воздуха на входе в рабочую камеру, м/с; w_g^{min} – минимальная скорость воздуха, при которой начинается движение насадки, м/с; h_0 – насыпная высота насадки, м.

Соотношение (2) справедливо для диапазонов параметров $1,2 \leq w_g/w_g^{\text{min}} \leq 2,6; 2,8 \leq h_0/d_s \leq 5,1$;

– межфазный коэффициент теплоотдачи в воздухоохладителе

$$\text{Nu} = 0,22 \cdot \text{Re}^{0,75}. \quad (3)$$

Соотношение (3) справедливо для диапазонов $1,2 \leq \text{Re} \leq 2,6$;

– гидравлическое сопротивление рабочей камеры воздухоохладителя

$$\text{Eu} = 0,07 \cdot \text{Re}^{-0,15} \cdot \left(\frac{h_0}{d_s} \right)^{0,94} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_g} \right)^{0,65}, \quad (4)$$

где ρ_g – плотность воздуха в «сухой» камере, кг/м³.

Соотношение (4) справедливо для следующих диапазонов: $1925 \leq Re \leq 3230$; $2,8 \leq h_0 / d_3 \leq 5,1$; $2300 \leq \rho_n / \rho_s \leq 2500$.

Среднеквадратическое отклонение экспериментальных данных от расчётных по формулам (2) – (4) для указанных диапазонов не превышает 12 %.

Вывод. Результаты экспериментальных исследований показали работоспособность воздухоохладителя предложенной конструкции. Полученные соотношения могут быть использованы для расчёта и конструирования аппаратов водоиспарительного охлаждения воздуха циркулирующим псевдооживленным слоем дисперсного материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кокорин О.Я. Испарительное охлаждение для целей кондиционирования воздуха. М.: Стройиздат, 1965.

2. Дорошенко А.В., Лисогурская О.А., Розум М.В. Перспективы использования испарительного охлаждения в холодильной технике // Проблемы региональной энергетики. 2013. № 2 (22). С. 79–92.

3. Агапов Ю.Н., Бараков А.В., Дубанин В.Ю. и др. Энергосберегающие теплотехнологические установки с центробежным псевдооживленным слоем // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 3. С. 9–12.

4. Патент РФ на полезную модель № 59786/27.12.06 / Агапов Ю.Н., Бараков А.В., Наумов А.М. Воздухоохладитель.

5. Trojosky M. Rotary drums for efficient drying and cooling // *Drying Technology*. 2019. Vol. 37(5). P. 632–651.

6. Бараков А.В., Дубанин В.Ю., Кожухов Н.Н. и др. К расчёту воздухоохладителя косвенно-испарительного типа с центробежным псевдооживленным слоем насадки // Энергосбережение и водоподготовка. 2011. № 5 (65). С. 69–70.

REFERENCES

1. Kokorin O.Y. *Isparitel'noe okhlazhdenie dlya tseley konditsionirovaniya vozdukha* [Evaporative Cooling for Air Conditioning Purposes]. Moscow: Stroyizdat, 1965.

2. Doroshenko A.V., Lisogurskaya O.A., Rozum M.V. Prospects for the use of evaporative cooling in refrigeration. *Problemy regional'noy energetiki* [Regional energy problems], 2013, no. 2(22), pp. 79-92. (in Russian)

3. Agapov Y.N., Barakov A.V., Dubanin V.Y. et al. Energy-saving heating plants with centrifugal fluidized bed. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Voronezh State Technical University Bulletin], 2011, no. 7(3), pp. 9-12. (in Russian).

4. Patent RUS № 59786/ 27.12.06. Agapov Y.N., Barakov A.V., Naumov A.M. *Vozdukhookhladitel'*.

5. Trojosky M. Rotary drums for efficient drying and cooling. *Drying Technology*, 2019, no. 37(5), pp. 632-651. doi: 10.1080/07373937.2018.1552597

6. Barakov A.V., Dubanin V.Y., Kozhukhov N.N. et al. To the calculation of an indirect-evaporative air cooler with a centrifugal fluidized bed of packing. *Energosberezhenie i vodopodgotovka* [Energy saving and water treatment], 2011, no. 5(65), pp. 69-70. (in Russian).

Об авторах:

НАДЕЕВ Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики Воронежский государственный технический университет
394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
тел. 8(473)2437662
E-mail: anadeev@cchgeu.ru

NADEEV Aleksandr A.

PhD of Engineering Science, Associate Professor of the Theoretical and Industrial Heat Power Engineering Chair
Voronezh State Technical University
394006, Russia, Voronezh, 20 let Oktyabrya str.,84,
tel. 8(473)2437662
E-mail: anadeev@cchgeu.ru

БАРАКОВ Александр Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики Воронежский государственный технический университет
394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
тел. 8(473)2437662
E-mail: abarakov@cchgeu.ru

BARAKOV Aleksandr V.

Doctor of Engineering Science, Professor of the Theoretical and Industrial Heat Power Engineering Chair
Voronezh State Technical University
394006, Russia, Voronezh, 20 let Oktyabrya str.,84,
tel. 8(473)2437662
E-mail: abarakov@cchgeu.ru

ПРУТСКИХ Дмитрий Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической и промышленной теплоэнергетики Воронежский государственный технический университет
394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84
тел. 8(473)2437662
E-mail: dprutskikh@cchgeu.ru

PRUTSKIKH Dmitry A.

PhD of Engineering Science, Associate Professor of the Theoretical and Industrial Heat Power Engineering Chair
Voronezh State Technical University
394006, Russia, Voronezh, 20 let Oktyabrya str.,84,
tel. 8(473)2437662
E-mail: dprutskikh@cchgeu.ru

Для цитирования: *Надеев А.А., Бараков А.В., Прутских Д.А.* К расчету аппарата водоиспарительного охлаждения воздуха // Градостроительство и архитектура. 2021. Т.11, № 4. С. 164–168. DOI: 10.17673/Vestnik.2021.04.20.
For citation: *Nadeev A.A., Barakov A.V., Prutskikh D.A.* To the Calculation of the Apparatus of Water-Evaporative Air Cooling. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2021. Vol. 11, no. 4. Pp. 164–168. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2021.04.20.