

4. Литун Д. С. Расчет уноса золы и потерь тепла с механическим недожогом в кипящем слое при сжигании биомассы // Изв. РАН. Энергетика. 2015. № 5. С. 90–102.
 5. Litoun D. S., Ryabov G. A. Modern State and Topical Issues of Studying Solid Fuel Particle Primary Fragmentation Processes as Applied to Biomass Combustion and Gasification in Fluidized and Dense Bed (Review) // Thermal Engineering. 2018. Vol. 65, No. 12. P. 875–884.
 6. Litoun D., Ryabov G., Pchelincev A. Fragmentation of biomass particles in fixed and fluidized bed combustion and gasification // IOP Conf. Series: J. of Physics. 2019. Vol. 1261. P. 012021.
 7. Пальченко Г. И., Рабинович О. С., Хорольская О. П., Василевич С. В., Бородуля В. А., Леккнер Б., Йоханссон Я. Э., Туллин К. Динамика изменения характеристик частиц натуральной и гранулированной древесины при термохимической конверсии в кипящем слое // VI Минский междунар. форум по тепломассообмену. 19–23 мая 2008 г.
 8. Dakic D. G., van der Honing and M. Valk. Fragmentation and swelling of various coals during devolatilization in a fluid bed // Fuel. 1989. Vol. 68. P. 911–916.
-

УДК 536.25

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБОБЩЕНИЕ
ДАННЫХ ПО КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧЕ МНОГОРЯДНЫХ
ОРЕБРЕННЫХ ТРУБНЫХ ПУЧКОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО
ОХЛАЖДЕНИЯ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ**

Г. С. Маршалова¹, А. Б. Сухоцкий²

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск*

²*УО «Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

В настоящее время из-за снижения качества и дефицита технической охлаждающей воды аппараты воздушного охлаждения (АВО) широко используются в процессах нефтехимии, целлюлозно-бумажной промышленности, в металлургии, энергетике, особенно в качестве воздушно-конденсационных установок в современных паровых турбинах, для систем отопления зданий и сооружений, в атомной энергетике в качестве системы аварийного расхолаживания реактора с воздушным теплообменником, в возобновляемой энергетике на геотермальных станциях, а также для охлаждения природного газа на магистральных трубопроводах.

В России и Беларуси эксплуатируется около 52 000 АВО с установленной мощностью привода вентиляторов порядка $2,1 \cdot 10^6$ кВт [1]. Таким образом, спрос на аппараты воздушного охлаждения в ближайшее время будет возрастать при улучшении показателей надежности, экономичности и эксплуатационных характеристик.

Основными эксплуатационными затратами АВО являются затраты на электроэнергию, потребляемую двигателями вентиляторов. В связи с этим для повышения экономичности эксплуатации воздухоохлаждаемых теплообменников предлагается периодическое выключение вентиляторов при достаточно низких температурах воздуха, т. е. применение свободной конвекции вместо вынужденной. В работе [2] отмечается, что при расчетной температуре воздуха и отключенных вентиляторах обеспечивается до 20–30% номинальной тепловой нагрузки аппарата, а при температурах ниже -25 °С – полная номинальная нагрузка.

При оснащении АВО дополнительными устройствами, усиливающими тягу, их теплопроизводительность может быть сохранена и при более высоких температурах окружающего

воздуха без потребления электроэнергии приводом вентилятора [2]. Одним из таких устройств является устанавливаемая над теплообменным пучком вытяжная шахта, которая способствует интенсификации теплообмена за счет дополнительного усиления свободного движения воздуха подъемными силами. При этом вклад в теплоотдачу свободной и вынужденной конвекции сопоставим. Такой режим теплоотдачи называется смешанной конвекцией [3]. Техническая реализация смешанной конвекции не требует значительных материальных затрат, а получаемый теплоперенос выше, чем при свободной конвекции, что обеспечивает значительную экономию энергоресурсов [4].

Аппараты воздушного охлаждения используются в составе технологических установок и линий, где существует необходимость строгого соблюдения температурных режимов, и промежуточное недоохлаждение способно вызвать существенное снижение производительности и причинить экономический ущерб по сравнению с экономией энергии [5]. В связи с этим, существует необходимость обеспечения точного регулирования температурных режимов АВО, которая напрямую зависит от достоверных данных по теплообмену для ребристых пучков в условиях смешанной конвекции. При этом требуются индивидуальные уравнения подобия для проведения инженерных расчетов АВО с вытяжной шахтой.

Цель работы – экспериментальные исследования и обобщение полученных данных по теплоотдаче одно- и многорядных равносторонних трубных пучков шахматной компоновки в режиме смешанной конвекции с помощью уравнений подобия.

Исследования проводились для пучков с числом рядов $z = 1, 2, 3, 4$, состоящих из биметаллических оребренных труб следующих параметров, мм: диаметр $d = 56,8$; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26,4$; высота, шаг, средняя толщина ребра соответственно $h = 15,2$; $s = 2,43$; $\Delta = 0,52$; теплоотдающая длина оребрения трубы $l = 300$; общая длина оребренной трубы $l = 330$. Коэффициент оребрения трубы $\phi = 21$. Компоновка пучка – шахматная равносторонняя, поперечный шаг установки труб $S_1 = 58$ мм.

Для создания режима смешанной конвекции над теплообменным пучком устанавливалось два вида вытяжных шахт – с регулируемой высотой и с регулируемым проходным сечением. Первым видом являлась шахта с прямоугольным основанием, переходящим через конфузор в цилиндрическую трубу диаметром 0,105 м, регулируемой высотой $H = 0,52; 1,16; 1,48; 2,10$ м. Для снижения тепловых потерь шахта снаружи покрыта слоем минерального волокна толщиной 0,02–0,03 м. Вторым видом являлась шахта с регулируемым проходным сечением, которая представляет параллелепипед из фанеры толщиной 0,004 м с прямоугольным внутренним основанием $0,383 \times 0,313$ м, высотой 0,52 м. Снаружи для снижения теплопотерь шахта покрыта слоем пенополиуретана толщиной 0,028 м и слоем минерального волокна толщиной 0,005 м. В выходном сечении шахты устанавливались крышки площадью $f_{кр} = 0,125$ м² с круглым отверстием различного диаметра: $d_{отв} = 0,09, 0,105, 0,137; 0,160; 0,187; 0,205$ м, которые изготавливались из фанеры толщиной 0,01–0,015 м, а для снижения теплопотерь покрывались слоем минерального волокна толщиной 0,004 м.

Экспериментальные исследования проводились методом полного моделирования. Применялся обогрев оребренных труб вставными теплоэлектронагревателями. Центральная труба в пучке являлась калориметром. Схема экспериментальной установки, конструкция трубы-калориметра и ее оснащение температурными датчиками, аппаратное оформление установки измерительными приборами, методика исследования и порядок проведения опытов изложены в [6]. Во время проведения опытов температура поверхности трубы-калориметра у основания ребер (среднеарифметическая температура по показаниям термопар) изменялась в интервале $t_{ст} = 30–165$ °С, температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 17–26$ °С, подводимая к калориметру электрическая мощность $W = 7–250$ Вт.

По данным измерений вычисляли средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности, Вт/(м²·К):

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_{ct} - t_0)F}, \quad (1)$$

где Q_k – конвективный тепловой поток, Вт; $F = \pi d_0 \varphi$ – площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, m^2 .

Тепловой поток Q_k , отведенный от трубы к воздуху конвекцией, рассчитывался из уравнения

$$Q_k = W - Q_{\text{л}} - Q_{\text{п}}, \quad (2)$$

где W – электрическая мощность, подводимая к калориметру, Вт; $Q_{\text{л}}$ – тепловой поток, отведенный излучением от трубы к воздуху, Вт [5]; $Q_{\text{п}}$ – тепловые потери через торцы труб и токоподводы, Вт [6].

Результаты эксперимента представлялись в виде зависимости числа Нуссельта от числа Рейнольдса и Грасгофа:

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}, \quad (3)$$

$$\text{Gr} = \frac{g \beta d_0^3 (t_{ct} - t_0)}{\nu^2}, \quad (4)$$

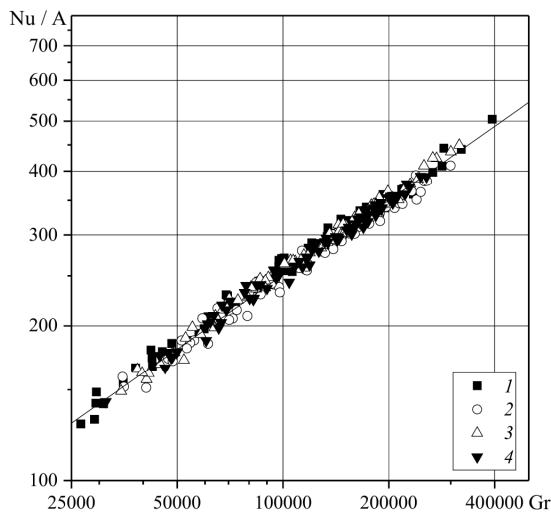
λ , ν – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м К), и кинематической вязкости m^2/c ; g – ускорение свободного падения, m/c^2 ; β – коэффициент температурного расширения, K^{-1} .

Результаты экспериментальных исследований теплоотдачи одно- и многорядных пучков в режиме смешанной конвекции воздуха представлены на рисунке в виде зависимости $\text{Nu}/A = f(\text{Gr})$. На основании полученной зависимости экспериментальные данные для одно- и многорядных пучков в режиме смешанной конвекции воздуха с погрешностью $\pm 5\%$ были обобщены уравнением вида

$$\text{Nu} = A \text{Gr}^{0,48}, \quad (5)$$

где A – коэффициент, зависящий от геометрических и конструктивных параметров пучка и вытяжной шахты, рассчитывающийся по формуле

$$A = (0,00313 + 0,07693 \cdot 0,45^z) \cdot (1,1 - \exp(-1,69 \cdot z^{0,72} \chi_{\text{ш}})) \times \\ \times (1,3 - \exp(-7,65 \cdot 10^{-4} \cdot z^{0,72} H / d_s)), \quad (6)$$



Теплоотдача одно- и многорядного оребренного пучка при смешанной конвекции: 1 – $z = 1$; 2 – 2; 3 – 3; 4 – 4

где d_3 – эквивалентный диаметр сжатого поперечного сечения пучка, м [7]; $\chi_{ш} = f_{отв}/f_{сж}$ – коэффициент сужения площади сечения выходной шахты по отношению к сжатому сечению пучка, $f_{отв} = \pi d_{отв}^2/4$ – площадь выходного отверстия вытяжной шахты, м²; $f_{сж}$ – площадь сжатого сечения пучка, м² [8].

Уравнения (5), (6) действительны в интервалах $Gr = 26\ 000\text{--}400\ 000$, $H/d_3 = 142\text{--}580$, $\chi_{ш} = 0,14\text{--}0,75$.

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных исследований получено обобщенное критериальное уравнение для расчета теплоотдачи одно- и многорядных равно-сторонних трубных пучков шахматной компоновки в режиме смешанной конвекции.

Литература

1. Кунтыш В. Б. и др. Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. №12. С. 3–6.
2. Аппарат воздушного охлаждения: пат. 9446 Респ. Беларусь, МПК 7 F 24 F 3/00, F 28 D 1/00 / В. Б. Кунтыш, А. Б. Сухоцкий, А. Ш. Миннигалеев, В. П. Мулин; заявитель Учреждение образования «Белорусский Государственный Технологический Университет». № u 20130091, заявл. 31.01.2013; опубл. 30.08.2013 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2013. № 9. С. 70.
3. Гехафт Б. и др. Свободно-конвективные течения, тепло- и массообмен ; пер. с англ. М.: Мир, 1991. – 528 с.
4. Кунтыш В. Б., Самородов А. В., Самылов А. И. Экспериментальная установка и методика исследования теплоотдачи пучков из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. Архангельск, 1998. Вып. 4. С. 139–149.
5. Самородов А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. Архангельск, 1999.
6. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесн. хоз-во, природопольз. и перераб. возоб. рес. 2018. № 1. С. 85–93.
7. Кунтыш В. Б. и др. Примеры расчетов нестандартизованных эффективных теплообменников; под ред. В. Б. Кунтыша и А. Н. Бессонного. СПб: Недра, 2000. – 300 с.
8. Маршалова Г. С. Экспериментальные исследования теплоотдачи четырехрядных пучков оребренных труб аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой // XXIV Ту-полевские чтения (школа молодых ученых): Междунар. молодёжная науч. конф. 7–8 ноября 2019 г.: сб. докл. Казань: изд-во ИП А. Р. Сагиева, 2019. Т. 2. С. 247–252.