

УДК 536.25

Г. С. МАРШАЛОВА¹, А. Б. СУХОЦКИЙ², Е. С. ДАНИЛЬЧИК¹, А. Н. СКРЫПНИК³

ВЛИЯНИЕ ПОПЕРЕЧНОГО ШАГА УСТАНОВКИ ТРУБ НА ТЕПЛОТДАЧУ В РЕЖИМЕ СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ТРУБНЫХ ПУЧКОВ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

¹Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси²Белорусский государственный технологический университет³Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева

(Поступила в редакцию 10.02.2020)

Проведены экспериментальные исследования теплоотдачи в режиме смешанной конвекции воздуха для четырехрядных трубных пучков шахматной компоновки с поперечными шагами установки труб $S_1 = 58$ и 64 мм, на основании которых получены критериальные уравнения расчета теплоотдачи в виде зависимостей $Nu = f(Gr)$. Установлено, что в зависимости от геометрических параметров установка вытяжной шахты способствует усилению теплоотдачи по сравнению с режимом свободной конвекции для четырехрядного пучка с шагом $S_1 = 58$ мм – в 1,3–2,44 раза, с шагом $S_1 = 64$ мм – в 1,03–1,77 раза. Определена относительная пограничная высота, при которой пучок с шагом 58 мм, несмотря на большее аэродинамическое сопротивление, становится эффективнее, чем пучок с шагом 64 мм, так как за счет более тесной компоновки воздух более интенсивно проходит через межреберное пространство и нагревается в нем, что ведет к росту гравитационного напора шахты.

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) являются эффективными промышленными теплообменниками, широко распространенными в химической, нефтехимической [1], целлюлозно-бумажной промышленности, на металлургических производствах, в энергетике [2], в системах воздушного отопления [3], на газовых компрессорных станциях для охлаждения энергоносителей и конденсации отработавшего пара, на тепловых электростанциях для охлаждения рециркуляционной воды в воздушно-конденсационных установках [4] и т. д. В настоящее время по данным [5] в странах Евразийского экономического союза эксплуатируется около 52000 АВО с установленной мощностью $1,93 \cdot 10^6$ кВт.

Интенсификации эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения посвящено большое количество научных трудов. Авторами работ установлено, что с понижением температуры охлаждающего воздуха до определенной величины существует возможность частичного или полного отключения вентиляторов АВО при

обеспечении заданной тепловой мощности аппарата [6]. Достичь экономии энергии возможно, увеличив время эксплуатации АВО с частично или полностью выключенными вентиляторами, интенсифицировав теплообмен с помощью установки вытяжной шахты над трубным пучком. При этом АВО будет использоваться в режиме смешанной конвекции, когда вынужденный и свободный конвективный теплообмен играют равнозначную роль и никаким из этих процессов невозможно пренебречь [7]. Также применение вытяжной шахты позволит исключить рециркуляцию воздуха в аппарате и повысить срок службы вентиляторов с приводами.

Для режима вынужденной конвекции воздуха в [8; 9] проводились исследования по изучению влияния поперечного шага на конвективный теплообмен пучков АВО. Исследованное авторами [8] первое поколение пучков АВО характеризовалось компактностью, и для труб с коэффициентом $\varphi = 15,2$ применялись следующие шаги установки труб: $S_1 = S_2' = 0,058$ м. В пучках АВО второго поколения [9] рекомендовалось применять разбивку труб по вершинам равностороннего треугольника с шагами $S_1 = S_2' = 0,06345-0,0647$ м для $\varphi = 15,2; 20-22$. В третьем поколении пучков [9] для $\varphi = 15,2; 20-22$ использовалась также разбивка труб по вершинам равностороннего треугольника с шагами $S_1 = S_2' = 0,064$ м.

Влиянию компоновочных параметров труб в пучке при свободной конвекции посвящены исследования [6], согласно которым для $\varphi = 16,8$ при $58 \leq S_1 \leq 64$ мм средняя теплоотдача для горизонтальных пучков быстро повышается, а при $64 \leq S_1 \leq 100$ мм темп роста теплоотдачи снижается. Работ по влиянию компоновочных параметров оребренных труб в пучке при смешанной конвекции найти не удалось, что делает актуальными проводимые исследования.

В настоящее время наиболее типичной компоновкой труб в пучках промышленных АВО является шахматная равносторонняя с шагами $S_1 = 0,058$ и $0,064$ м при $\varphi = 20-22$.

Цель работы – экспериментальное исследование теплоотдачи в режиме смешанной конвекции воздуха для четырехрядных трубных пучков шахматной компоновки с поперечными шагами установки труб $S_1 = 58$ и 64 мм.

Исследования теплоотдачи проводились для пучков, 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 составил $\varphi = 21$.

Для организации смешанной конвекции над теплообменным пучком устанавливалась вытяжная шахта двух видов – 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 тепловых потерь 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: $d_{отв} = 0,105, 0,137; 0,160; 0,205$ м, которые изготавливались из фанеры толщиной 0,01–0,015 м, а для снижения тепловых потерь покрывались слоем минерального волокна толщиной 0,004 м.

Экспериментальные исследования проводились методом полного теплового моделирования. Применялся обогрев оребренных труб вставными теплоэлектронагревателями. Центральная труба в пучке являлась калориметром. Схема экспериментальной установки, конструкция трубы-калориметра и ее оснащение температурными датчиками, аппаратурное оформление установки измерительными приборами, методика исследования и порядок проведения опытов изложены в [10]. Во время проведения опытов температура поверхности трубы-калориметра у основания ребер (среднеарифметическая температура по показаниям термопар) изменялась в интервале $t_{ст} = 30\text{--}165$ °С, температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 17\text{--}26$ °С, подводимая к калориметру электрическая мощность $W = 7\text{--}250$ Вт.

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

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_{ст} - t_0)F},$$

где Q_k – конвективный тепловой поток, Вт; $F = \pi d_0 \phi$ – площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, м².

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

$$Q_k = W - Q_{л} - Q_{п},$$

где W – электрическая мощность, подводимая к калориметру, Вт; $Q_{л}$ – тепловой поток, отведенный излучением от трубы к воздуху, Вт [6]; $Q_{п}$ – тепловые потери через торцы труб и токоподводы, Вт [11].

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

$$Nu = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda},$$

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

где λ, ν – коэффициенты теплопроводности, Вт/(м · К), и кинематической вязкости м²/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – коэффициент температурного расширения, К⁻¹.

Определяющей температурой для расчета теплофизических свойств воздуха является температура окружающего воздуха t_0 , °C.

На рис. 1 представлены полученные экспериментальные данные по теплоотдаче четырехрядных горизонтальных оребренных пучков с шагами $S_1 = 58$ мм (рис. 1, а, б) и $S_1 = 64$ мм (рис. 1, в, г) в режимах свободной и смешанной конвекции воздуха.

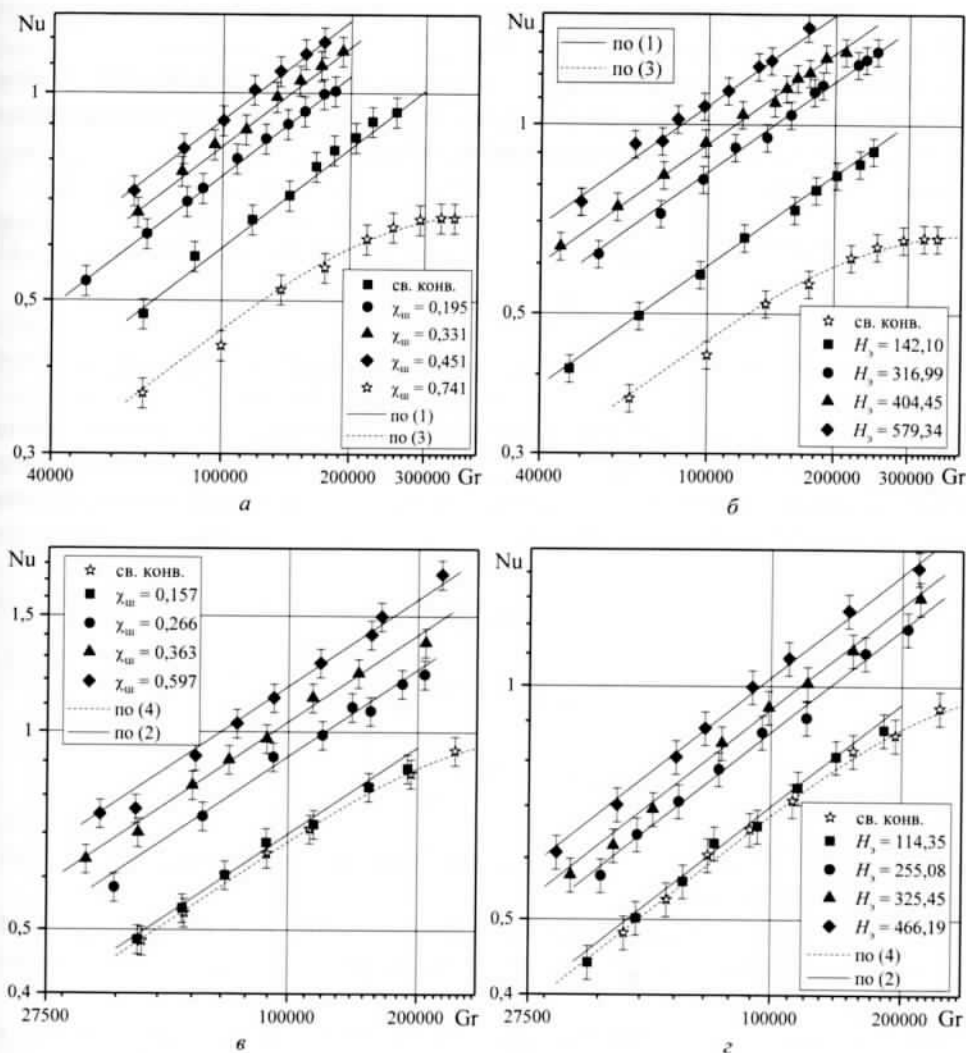


Рис. 1. Теплоотдача в режимах свободной и смешанной конвекции воздуха четырехрядного горизонтального оребренного пучка с $S_1 = 58$ и 64 мм: а, в – при $H_{\text{эв}} = \text{const}$; б, г – при $\chi_{\text{эв}} = \text{const}$

Для четырехрядного пучка с $S_1 = 58$ и 64 мм в режиме свободной конвекции наблюдается снижение темпа роста Nu с увеличением Gr при $Gr > 200000$, что связано с увеличением подъемной силы пропорциональной $(t_{cr} - t_0)$, которая не способна сохранить одинаковой степень роста скорости обтекания воздухом межреберного пространства трубы из-за возросшего аэродинамического сопротивления.

В зависимости от геометрических параметров установка вытяжной шахты способствует усилению теплоотдачи по сравнению с режимом свободной конвекции для четырехрядного пучка с шагом $S_1 = 58$ мм – в 1,3–2,44 раза, с шагом $S_1 = 64$ мм – в 1,03–1,77 раза.

Обобщение экспериментальных данных, представленных на рис. 1, по теплоотдаче в режиме смешанной конвекции для четырехрядного пучка проводилось с отклонением менее $\pm 5\%$ по следующим формулам:

для шага $S_1 = 58$ мм

$$Nu = Gr^{0,48} 0,006093(1,1 - \exp(-4,68\chi_{ш}))(1,3 - \exp(-0,0021H_3)), \quad (1)$$

для шага $S_1 = 64$ мм

$$Nu = Gr^{0,44} 0,00717(1,1 - \exp(-4,68\chi_{ш}))(1,7 - \exp(-0,00304H_3)), \quad (2)$$

где $\chi_{ш} = f_{отв} / f_{сж}$ – коэффициент сужения площади сечения выходной шахты по отношению к сжатому сечению пучка; $f_{отв} = \pi d_{отв}^2 / 4$ – площадь выходного отверстия вытяжной шахты, m^2 ; $H_3 = H / d_3$ – относительная высота вытяжной шахты; d_3 – эквивалентный диаметр пучка [2]:

$$d_3 = \frac{2s}{2h + s} S_1 \chi,$$

$$\chi = 1 - \frac{1}{S_1} \left(d_0 + 2 \frac{h\Delta}{s} \right),$$

$$f_{сж} = \ln S_1 \left[1 - \left(\frac{1}{S_1} \right) d \right],$$

где χ – коэффициент загромождения оребренными трубами поперечного сечения пучка для прохода воздуха [2].

Уравнение (1) действительно при $Gr = 28000-320000$, $H_3 = 142-580$, $\chi_{ш} = 0,14-0,75$; уравнение (2) – $Gr = 30000-230000$, $H_3 = 114-467$, $\chi_{ш} = 0,157-0,597$, без учета гейзерных течений [12].

На рис. 1 данные по теплоотдаче в режиме свободной конвекции с отклонением, не превышающим 5% , обобщались следующим уравнением (в виде пунктирной линии):

для шага $S_1 = 58$ мм

$$Nu = 1,81 \cdot 10^{-3} Gr^{0,48} (1 - \exp(-5,8 \cdot 10^5 / Gr)), \quad (3)$$

для шага $S_1 = 64$ мм

$$Nu = 4,3 \cdot 10^{-3} Gr^{0,44} (1 - \exp(-6,1 \cdot 10^5 / Gr)). \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) действительны в интервалах $Gr = 60000-400000$ и $Gr = 40000-300000$ соответственно. При этом характер кривых совпадает с исследованиями свободной конвекции на оребренных биметаллических трубных пучках в [6].

Для сравнения эффективности применения вытяжной шахты для пучков с шагами $S_1 = 58$ (закрашенные символы) и 64 мм (незакрашенные символы) на рис. 2 построены зависимости $Nu = f(f_{отв})$ при $H = 0,52$ м (рис. 2, а) и $Nu = f(H)$ при $d_{отв} = 0,105$ м (рис. 2, б), а на рис. 3 построены зависимости изменения температуры потока воздуха в шахте от изменения температуры основания оребренной трубы (рис. 3, а) и числа Рейнольдса от числа Грасгофа (рис. 3, б).

Гравитационный напор, создаваемый шахтой, определяется следующими факторами: ее высотой и аэродинамическим сопротивлением, температурой (плотностью) потока воздуха в шахте.

Пучок с шагом 58 мм имеет большое аэродинамическое сопротивление, по сравнению с пучком с шагом 64 мм, но за счет более тесной компоновки воздух более интенсивно проходит через межреберное пространство и нагревается в нем, что ведет к росту гравитационного напора шахты.

Увеличение $f_{отв}$ приводит к снижению аэродинамического сопротивления шахты и росту расхода потока воздуха. Увеличение H приводит к росту гравитационного напора шахты и также увеличению расхода потока воздуха. Принципиальное отличие заключается в том, что при увеличении $f_{отв}$ возникают обратные

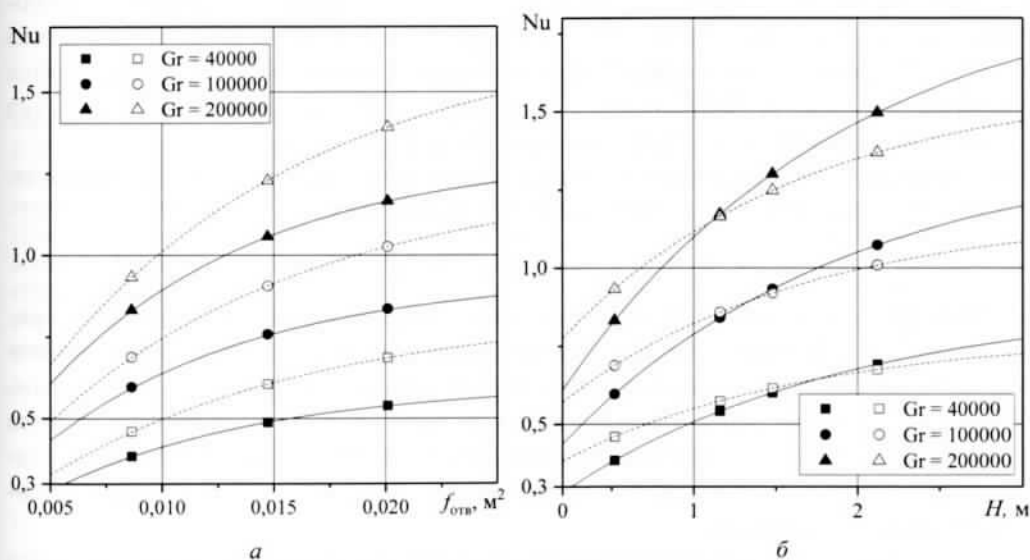


Рис. 2. Теплоотдача пучка в зависимости от коэффициента сужения площади сечения выходной шахты (а) и относительной высоты вытяжной шахты (б)

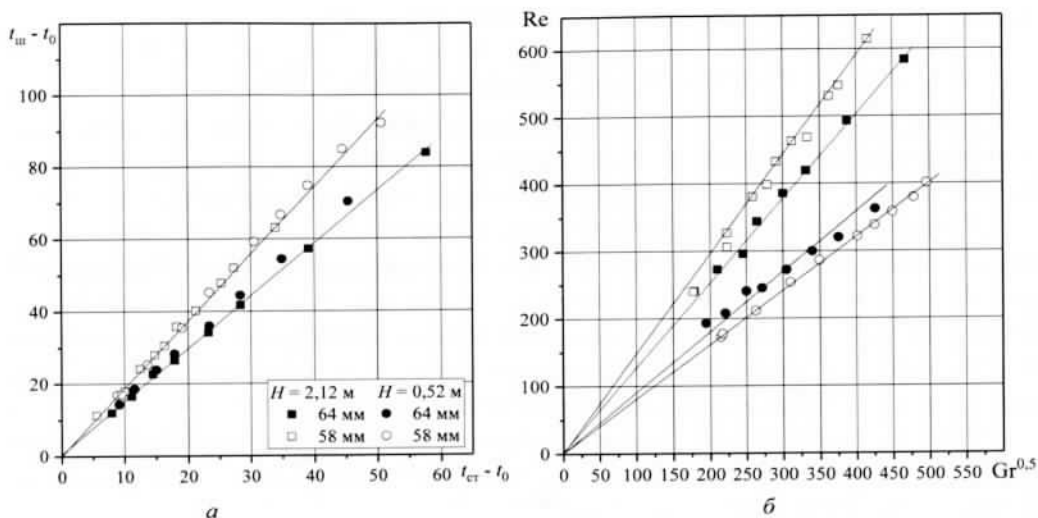


Рис. 3. Зависимости изменения температуры потока воздуха в шахте от изменения температуры основания оребренной трубы (а) и числа Рейнольдса от числа Грасгофа (б)

потоки воздуха в шахту (гейзерные течения [12]), которые особенно интенсивные для пучка с большим аэродинамическим сопротивлением с шагом 58 мм. В результате темп увеличения расхода более значителен для пучка с шагом 64 мм (рис. 2, а). При увеличении H за счет роста аэродинамического сопротивления шахты гейзерные течения не возникают, а более интенсивный нагрев воздуха в пучке с шагом 58 мм (рис. 3, а) вызывает дополнительный рост гравитационного напора. В результате темп увеличения расхода более значителен для пучка с шагом 58 мм и при некотором $H^{кр}$ коэффициенты теплоотдачи пучков становятся равными (рис. 2, а). А при большей высоте шахты тепловая эффективность пучка с шагом 58 мм выше, чем у пучка с шагом 64 мм (рис. 3, б).

Определено, что относительная пограничная высота при $\chi_{ин} = \text{const}$ зависит только от числа Грасгофа и определяется из выражения

$$H_3^{кр} = 55200(\text{Gr} + 4,79 \cdot 10^6)^{-0,3}.$$

Заключение. Проведено экспериментальное исследование теплоотдачи в режиме смешанной конвекции воздуха для четырехрядных трубных пучков шахматной компоновки с поперечными шагами установки труб $S_1 = 58$ и 64 мм. Получены критериальные уравнения для расчета средней теплоотдачи пучков в режиме свободной и смешанной конвекции. Определены оптимальные диапазоны параметров вытяжной шахты эффективного применения этих пучков в режиме смешанной конвекции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований (гранты Т19РМ-076 и 19-58-04-006Бел_мол_а).

Литература

1. Шмеркович В. М. Применение аппаратов воздушного охлаждения при проектировании нефтеперерабатывающих и нефтехимических заводов. М., 1971. – 110 с.
2. Бессонный А. Н., Кунтыш В. Б. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения. СПб., 1996. – 512 с.
3. Гусев В. М., Ковалев Н. И., Попов В. П., Потрошков В. А. Теплотехника, отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Л., 1981. – 343 с.
4. Kong Y., Wang W., Zuo Z. et al. // Applied Thermal Engineering. 2019. Vol. 154. P. 505–518.
5. Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Самородов А. В. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 12. С. 3–6.
6. Самородов А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / А. В. Самородов. – Архангельск, 1999. – 176 с.
7. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. М., 1983. – 400 с.
8. Письменный Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребранных труб. Киев, 2004. – 244 с.
9. Кунтыш В. Б. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 1997. № 4. С. 43–44.
10. Сидорик Г. С. // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесн. хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1. С. 85–93.
11. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. // Тр. БГТУ. Сер. 2. Хим. технол., биотехн., геоэколог. 2017. № 1. С. 68–74.
12. Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С. // Инженерно-физический журн. 2019. Т. 92, № 3. С. 619–625.

G. S. MARSHALOVA, A. B. SUKHOTSKI, E. S. DANIL'CHIK, A. N. SKRIPNIK

TRANSVERSE TUBE PITCH INFLUENCE ON HEAT TRANSFER IN THE MIXED CONVECTION MODE OF THE AIR COOLING APPARATUS BUNDLES

Summary

Experimental studies of heat transfer in the mixed air convection mode were made for four-row tube bundles of a checkerboard layout with transverse tube pitch $S_1 = 58$ and 64 mm, on the basis of which the criterion equations for calculating heat transfer in the form of dependences $Nu = f(Gr)$ were obtained. It was established that, depending on the geometric parameters, the installation of the exhaust shaft improves heat transfer compared to the free convection mode for a four-row bundle with a tube pitch $S_1 = 58$ mm – 1.3–2.44 times, with a tube pitch $S_1 = 64$ mm – 1.03–1.77 times. The relative boundary height is determined at which a bundle with a pitch of 58 mm, despite a greater aerodynamic drag, becomes more efficient than a bundle with a pitch of 64 mm, since due to a closer arrangement, the air passes more intensively through the intercostal space and heats up in it, which leads to the growth of the gravitational pressure of the mine.