

УДК 44.31.35

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СРЕДНЕЙ ТЕПЛОТДАЧИ ЧЕТЫРЕХРЯДНОГО ПУЧКА В РЕЖИМАХ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ И ПРИ ЕЕ ИНТЕНСИФИКАЦИИ С ПОМОЩЬЮ ВЫТЯЖНОЙ ШАХТЫ*Данильчик Е.С.^{1,2}, Миронов³ А.А.**katya.156.156@gmail.com*Научные руководители: А.Б. Сухоцкий¹, к.т.н., доцент,И.А. Попов³, д.т.н., профессор¹*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск,*²*Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова**Национальной академии наук Беларуси, г. Минск*³*Казанский национальный исследовательский технический**университет им. А.Н. Туполева–КАИ, г. Казань)*

В статье представлены результаты экспериментального исследования средней теплоотдачи шахматного четырехрядного пучка биметаллических оребренных труб с коэффициентом оребрения $\phi = 19,3$ в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты, получены обобщающие уравнения подобия в виде $Nu = f(Ra, \chi_{ш})$ с погрешностью 5–18%, $Nu = f(Ra, H_{п-ш})$ – 5%. Установлено, что интенсификация свободно-конвективного теплообмена воздуха с помощью шахты 1 с $H = 0,52$ м позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи четырехрядного пучка в 1,1–2,3 раза, шахты 1 с $H = 1,04$ м в 1,5–3 раза и шахты 2 в 1,3–2 раза.

Широкое применение атмосферного воздуха, как дешевого и доступного теплоносителя, в процессах охлаждения технологических сред в различных отраслях промышленности обусловило появление целого ряда теплообменников воздушного охлаждения (ТВО), отличающихся друг от друга конструктивными особенностями и функциональным назначением.

Теплообменники воздушного охлаждения в основном функционируют в режиме вынужденной конвекции, в результате на привод вентиляторов затрачивается большое количество электроэнергии. Одним из способов энергосбережения при эксплуатации ТВО является перевод их в режим функционирования при свободной конвекции с полным или частичным отключением электропривода вентиляторов при понижении температуры охлаждающего воздуха, обеспечивая при этом заданный тепловой режим. Достичь еще большей экономии энергии возможно, увеличив время эксплуатации ТВО в данном тепловом режиме, интенсифицировав теплообмен с помощью установки вытяжной шахты над трубным пучком.

Цель работы – экспериментальное исследование средней теплоотдачи четырехрядного пучка в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты и обобщение полученных результатов с помощью уравнений подобия.

Экспериментальное исследование теплоотдачи в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты проводилось на четырехрядном шахматном горизонтальном пучке с равносторонней компоновкой, собранного из биметаллических оребренных труб со спиральными накатными ребрами следующих геометрических параметров: наружный диаметр оребрения $d = 56$ мм; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26,8$ мм; высота ребра $h = 14,6$ мм; шаг ребра $s = 2,5$ мм; средняя толщина ребра $\Delta = 0,5$ мм; коэффициент оребрения трубы $\phi = 19,3$. Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь, длина трубы $l_{п} = 330$ мм (теплоотдающая длина $l = 300$ мм). Диаметр несущей трубы $d_{н} = 25$ мм, толщина стенки $\delta = 2$ мм.

Интенсификация режима свободной конвекции воздуха осуществлялась с помощью установки над пучком двух типов вытяжных шахт: шахты 1 и шахты 2.

Для изучения влияния площади выходного отверстия шахты на интенсивность теплоотдачи использовалась шахта 1 со следующими геометрическими параметрами: при высотах шахты $H = const = 0,52$ и $1,04$ м на ее выходе устанавливались крышки с круглым отверстием площадью $f_{отв} = 0,0087; 0,0147; 0,0201$ и $0,0330$ м², а также с прямоугольным отверстием $-f_{отв} = 0,050; 0,069; 0,1185$ (без крышки) м². Т.е. при исследованиях с этой шахтой также учитывалось влияние ее высоты. С помощью шахты 2 исследовалось влияние высоты шахты на интенсивность теплоотдачи при $f_{отв} = const = 0,0087$ м². Изучались следующие высоты вытяжной шахты: $H = 0,52; 1,16; 1,48; 2,12$ м [1].

Экспериментальное исследование проводилось методом полного теплового моделирования. Применялся обогрев оребренных труб вставными теплоэлектронагревателями. Центральные трубы каждого ряда пучка являлись калориметрами, на них измерялись значения мощности и температуры стенки у основания ребер для определения приведенного среднего коэффициента теплоотдачи конвекцией [2]. В ходе проведения экспериментов электрическая мощность, подводимая к оребренным трубам, изменялась в диапазоне $W = 6-155$ Вт, средняя температура стенки калориметров $t_{ст} = 25-165$ °С и средняя температура в шахте 1 – $t_{ш} = 26-145$ °С, в шахте 2 – $t_{ш} = 32-92$ °С, а температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 16-25$ °С. Скорость воздуха в сжатом сечении пучка составляла около $w = 0,1-0,6$ м/с.

По данным измерений рассчитывался средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности оребренной трубы α_k , Вт/(м²·°С). При его определении учитывалась лучистая составляющая $Q_{л}$, Вт и составляющая потерь $Q_{п}$, Вт [1, 3, 4]. Экспериментальные данные обрабатывали и представлялись в виде чисел подобия Нуссельта $Nu = \alpha_k \cdot d_0 / \lambda$ и Релея $Ra = \beta \cdot g \cdot d_0^3 (t_{ст} - t_0) / (\nu \cdot a)$, где $\beta = 1 / (t_0 + 273)$ – коэффициент температурного расширения воздуха, 1/°С и g – ускорение свободного падения, м/с². Коэффициенты теплопроводности λ , Вт/(м·°С), кинематической вязкости ν , м²/с, и температуропроводности a , м²/с, принимали по температуре окружающей среды t_0 , °С. В качестве определяющего размера был принят диаметр трубы по основанию ребер d_0 , м.

На рис. 1 представлена теплоотдача четырехрядного горизонтального пучка в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью вытяжной шахты: а) и б) при различных значениях площади выходного отверстия вытяжной шахты с $H = 0,52$ и $1,04$ м; в) при различных значениях высоты вытяжной шахты с $f_{отв} = 0,0087$ м².

Экспериментальные данные по теплоотдаче четырехрядного пучка в режиме свободной конвекции (индекс 0), представленные на рис. 1 (в виде пунктирной линии), с отклонением, не превышающим $\pm 5\%$, аппроксимированы уравнением вида, которое действительно в интервале изменения $Ra = 37\,500-250\,000$

$$Nu_0 = 0,0052 \cdot Ra^{0,44} \cdot \left(1 - \exp\left(-4,4 \cdot 10^5 / Ra\right)\right). \quad (1)$$

Усовершенствовав уравнение (1), с учетом обобщения полученных результатов по теплоотдаче четырехрядного пучка при установке над пучком шахты 1, представленных на рис. 1 а–б, получим уравнение, обобщающее результаты исследованных режимов теплоотдачи (Nu / Nu_0) [5]:

а) При обобщении данных по теплоотдаче с шахтой 1 с помощью зависимости степенного вида с экспоненциальным отклонением получим

$$Nu = C_{\chi_{ш}} \cdot Nu_0 = C_{\chi_{ш}} \cdot A_0 \cdot Ra^n \left(1 - \exp(-B / Ra)\right), \quad (2)$$

б) При обобщении данных по теплоотдаче с шахтой 1 с помощью традиционной зависимости при темпе роста теплоотдачи $B \rightarrow \infty$ (экспоненциальным членом можно пренебречь), уравнение примет вид

$$Nu = C_{\chi_{ш}} \cdot A_0 \cdot Ra^n, \quad (3)$$

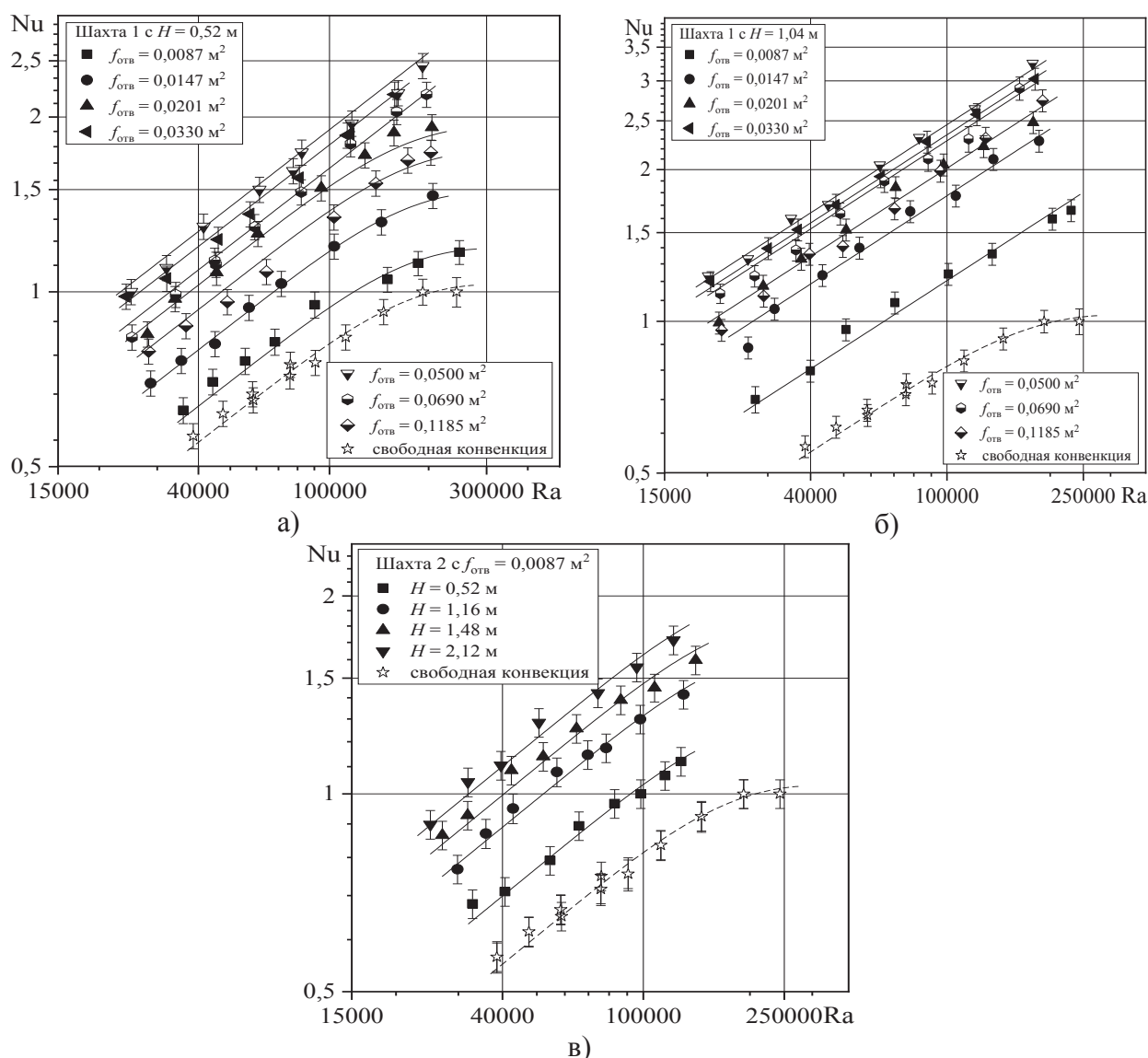


Рис. 1. – Теплоотдача четырехрядного пучка в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации с помощью установки над пучком а), б) шахты 1 и в) шахты 2

где в (2) и (3)

$$C_{\chi_{ш}} = A / A_0 = \left(1 + \exp \left(- \frac{\chi_{ш}}{\chi_{ш}^{opt} - \chi_{ш}^0} \right) \left(\frac{\chi_{ш}}{\chi_{ш}^0} - 1 \right) \right), \quad (4)$$

где Nu и Nu_0 – число Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи) при исследованиях теплоотдачи с шахтой и без шахты (свободная конвекция); $C_{\chi_{ш}}$ – поправочный коэффициент на сужение площади выходного отверстия вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка $\chi_{ш}$; A_0 – коэффициент при свободной конвекции; n – показатель степени функции; важно отметить, что для четырехрядного пучка труб с коэффициентом оребрения $\phi = 19,3$ в исследуемых режимах теплоотдачи, этот показатель совпадает; $\chi_{ш}^{opt}$ – оптимальный коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка, при котором значение числа Нуссельта максимально ($Nu = Nu_{max}$); $\chi_{ш}^0$ – нулевой коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка, при котором

значение числа Нуссельта равно его значению при свободной конвекции пучка ($Nu = Nu_0$, $C_{\chi_{ш}} = 1$).

Полученные данные по теплоотдаче четырехрядного пучка при установке шахты 1 с $H = 0,52$ м, представленные на рис. 1 а, с отклонением, не превышающим $\pm 5-18\%$, обобщались:

а) для $\chi_{ш} = 0,15-0,35$ и $2,06$ ($f_{отв} = 0,0087 - 0,0201$ и $0,1185 \text{ м}^2$) – с помощью зависимостей (2) и (4), на рис. 1 а (прямые линии с загибом в конце), где $\chi_{ш}^{opt} = 0,817$, $\chi_{ш}^0 = 0,150$, $A_0 = 0,0052$, $n = 0,44$ и $B = 4,4 \cdot 10^5$.

б) для $\chi_{ш} = 0,58-1,20$ ($f_{отв} = 0,033 - 0,069 \text{ м}^2$) – с помощью зависимостей (3) и (4), на рис. 1 а (прямые линии), где $\chi_{ш}^{opt} = 0,817$, $\chi_{ш}^0 = 0,150$, $A_0 = 0,0052$, $n = 0,44$.

Экспериментально установлено (рис. 1 б (прямые линии)), что для всех $\chi_{ш} = 0,15-2,06$, при установке шахты 1 с $H = 1,04$ м, которая в два раза выше шахты с $H = 0,52$ м, интенсивность теплоотдачи четырехрядного пучка увеличивается, следовательно, растет темп роста теплоотдачи B . Результаты экспериментального исследования, представленные на рис. 1 б, обобщались с помощью зависимостей (3) и (4), с отклонением, не превышающим $\pm 5\%$ (только без крышки ($f_{отв} = 0,1185 \text{ м}^2$) – 20%), где $\chi_{ш}^{opt} = 0,767$, $\chi_{ш}^0 = 0,100$, $A_0 = 0,0052$, $n = 0,44$.

Расчетные параметры в уравнениях (2)–(4) по теплоотдаче четырехрядного пучка при установке шахты 1 с $H = 0,52$ м и $H = 1,04$ м справедливы в диапазоне $Ra = 20\ 000-250\ 000$.

Результаты экспериментального исследования по теплоотдаче четырехрядного пучка при установке шахты 2 с $f_{отв} = 0,0087 \text{ м}^2$, представленные на рис. 1 в (прямые линии с загибом в конце), с отклонением, не превышающим $\pm 5\%$, обобщались с помощью зависимости

$$Nu = d \cdot H_{п-ш}^k \cdot Ra^n \left(1 - \exp\left(-B \cdot 10^5 / Ra\right) \right), \quad (5)$$

где $d = 0,0141$; $k = 0,32$, $n = 0,44$ – постоянные коэффициенты для исследуемого четырехрядного пучка труб;

$H_{п-ш} = \frac{H}{d_0} \cdot \frac{S_1}{d_0} \cdot \frac{\chi}{z \cdot \varphi \cdot \pi}$ – относительная высота системы пучок-шахта, χ – коэффициент

загромождения оребренными трубами поперечного сечения пучка для прохода воздуха; z – число рядов в пучке, шт.

Уравнение (5) действительно в интервале изменения $Ra = 24\ 000-135\ 000$, $H_{п-ш} = 0,09-0,38$.

Согласно данным рис. 1 а и в, как для свободной конвекции воздуха, так и при установке шахты 1 с $H = 0,52$ м при $f_{отв} = 0,0087 - 0,0330$ и $0,1185 \text{ м}^2$ и шахты 2 наблюдается снижение интенсивности роста теплоотдачи с увеличением мощности, подаваемой на пучок, в диапазоне чисел Релея $200\ 000 < Ra \leq 300\ 000$, вследствие возрастающего межреберного аэродинамического сопротивления. При этом, для трех отверстий с максимальной теплоотдачей шахты 1 с $H = 0,52$ м (рис. 1 а, $f_{отв} = 0,033 - 0,069 \text{ м}^2$), а также шахты 1 с $H = 1,04$ м (рис. 3.13 б), на исследованном интервале чисел Релея, темп роста теплоотдачи $B \rightarrow \infty$, а диапазон снижения интенсивности теплоотдачи смещается в сторону больших чисел Релея.

Интенсификация свободно-конвективного теплообмена воздуха с помощью шахты 1 с $H = 0,52$ м позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи четырехрядного пучка в 1,1–2,3 раза, шахты 1 с $H = 1,04$ м в 1,5–3 раза и шахты 2 в 1,3–2 раза.

Оценка влияния площади выходного отверстия шахты $f_{отв}$ и коэффициента сужения шахты $\chi_{ш}$ шахты 1 с $H = 0,52$ и $1,04$ м на интенсивность теплоотдачи четырехрядного пучка при постоянном числе Релея $Ra = 100\ 000$ представлена на рис. 2.

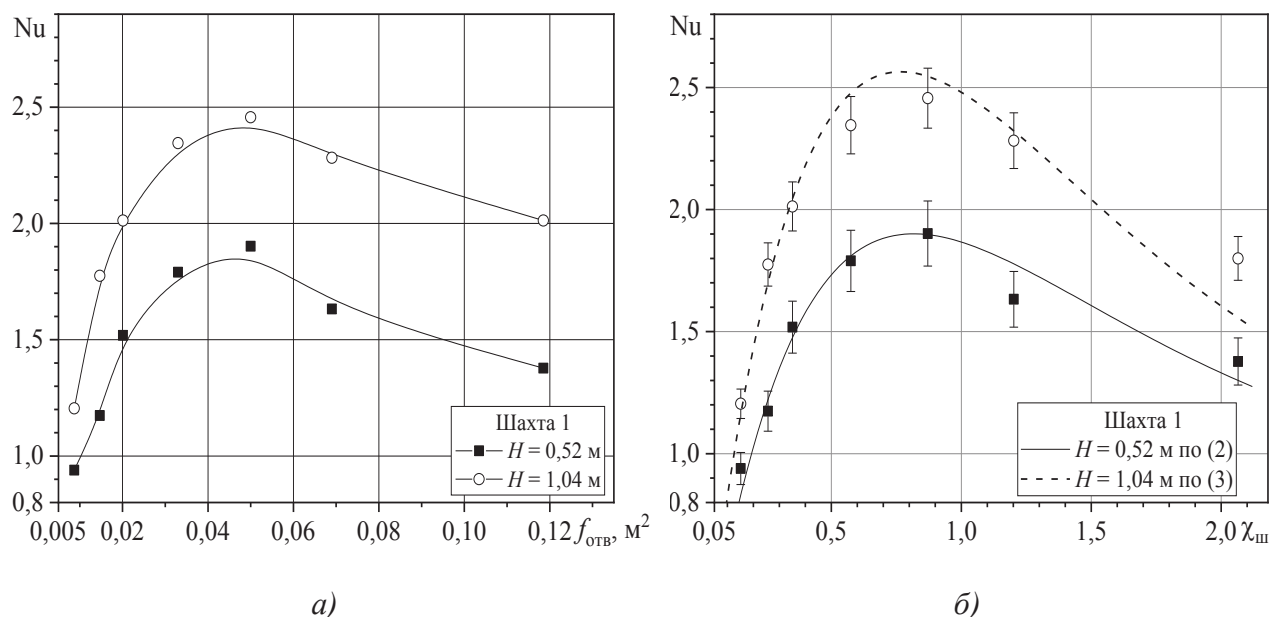


Рис. 2. – Влияние площади выходного отверстия шахты $f_{отв}$ (а) и коэффициента сужения шахты $\chi_{ш}$ (б) на интенсивность теплоотдачи четырехрядного пучка в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью шахты 1, высотой $H = 0,52$ и $1,04$ м при $Ra = 100\,000$

Согласно рис. 1 а, б и 2 с увеличением площади выходного отверстия вытяжной шахты интенсивность теплоотдачи четырехрядного пучка возрастает, что обусловлено снижением аэродинамического сопротивления шахты и ростом расхода потока воздуха через пучок. После достижения для шахты 1 с $H = 0,52$ м – $\chi_{ш}^{opt} = 0,817$, с $H = 1,14$ м – $\chi_{ш}^{opt} = 0,767$ интенсивность теплоотдачи пучка снижается из-за обратных потоков холодного воздуха в шахту, а далее стремиться к теплоотдаче пучка при свободной конвекции воздуха ($Nu \rightarrow Nu_0$) [5]. Максимальная теплоотдача четырехрядного пучка с шахтой 1 высотой $H = 0,52$ и $1,04$ м характерна при установке крышки с $f_{отв} = 0,0500$ м² при $\chi_{ш} = 0,87$, причем при увеличении высоты шахты 1 в два раза, она возрастает в 1,3–1,45 раза.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T21PM-019) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 20-58-04002 Бел_мол_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С. Конвективная теплоотдача однорядных пучков из труб с накатными алюминиевыми ребрами различной высоты при малых числах Рейнольдса // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64. № 4. С. 336–348.
2. Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С. Исследование свободноконвективного теплообмена оребренной трубы и однородного пучка при различных углах наклона труб к горизонтальной плоскости // Труды БГТУ. Сер. 1, Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2. С. 272–279.
3. Данильчик Е.С., Сухоцкий А.Б., Кунтыш В.Б. Экспериментальные исследования эффективности однорядного пучка из биметаллических оребренных труб с различной высотой оребрения при свободно-конвективном теплообмене с воздухом // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т.22. №5. С. 128–141.
4. Сухоцкий А.Б., Маршалова Г.С., Данильчик Е.С. Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63. № 4. С. 380–388.

5. Сухоцкий А.Б., Данильчик Е.С., Маршалова Г.С. Влияние межтрубного шага на конвективную теплоотдачу воздухоохлаждаемого пучка с вытяжной шахтой // Вестник фонда фундаментальных исследований. 2020. № 2. С. 160–169.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE AVERAGE HEAT TRANSFER OF A FOUR-ROW BUNCH IN THE MODES OF FREE CONVECTION AND WITH ITS INTENSIFICATION WITH THE HELP OF THE EXTRACTOR SHAFT

Danilchik E.^{1,2}, Mironov A.³

katya.156.156@gmail.com

Supervisors: A. Sukhotskii¹, PhD (Engineering), Associate Professor,

I. Popov³, DSc (Engineering), Professor

(¹Belarusian State Technological University, Minsk,

²A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk,

³Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev–KAI, Kazan)

The article presents the results of an experimental study of the average heat transfer of a staggered four-row bundle of bimetallic finned tubes with a ribbing coefficient $\phi = 19.3$ in the free convection mode and with its intensification using an exhaust shaft, generalizing similarity equations in the form $Nu = f(Ra, H_{п-ш})$ with an error of 5–18%, $Nu = f(Ra, H_{п-ш}) - 5\%$. It was found that the intensification of free-convective heat exchange of air using shaft 1 with $H = 0.52$ m makes it possible to increase the heat transfer rate of a four-row beam by 1.1–2.3 times, of shaft 1 with $H = 1.04$ m by 1.5–3 times and of shaft 2 by 1.3–2 times.

УДК 44.31.35

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЛОЩАДИ ВЫХОДНОГО ОТВЕРСТИЯ И ВЫСОТЫ ВЫТЯЖНОЙ ШАХТЫ НА СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ОРЕБРЕНИЯ ТРУБ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

Данильчик Е.С.^{1,2}

katya.156.156@gmail.com

Научные руководители: А.Б. Сухоцкий¹, к.т.н., доцент,

(¹Белорусский государственный технологический университет, г. Минск,

²Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова

Национальной академии наук Беларуси, г. Минск)

В статье представлены результаты экспериментального исследования средней теплоотдачи однорядного пучка биметаллических оребренных труб с различной высотой оребрения (коэффициент оребрения $\phi \approx 1-19,6$) в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты. Получено, что при увеличении площади выходного отверстия шахты 1 и высоты шахты 2 наблюдается рост интенсивности теплоотдачи.

Теплоутилизационные установки, в частности, воздухоохлаждаемые теплообменники (ВОТ) широко используются в топливно-энергетическом комплексе, воздушноотопительных агрегатах, приточно-вытяжной системе вентиляции зданий и сооружений, холодильной технике и т.д. Они в основном функционируют в режиме вынужденной конвекции, в результате на их привод затрачивается большое количество электроэнергии. Один из способов решения этой проблемы – перевод ВОТ в режим свободной конвекции с полным или частичным отключением электропривода вентиляторов, обеспечивая при этом заданный тепловой режим. Главными недостатками ВОТ являются малые коэффициенты теплопередачи