

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.<sup>1,2</sup>, Mironov A.<sup>3</sup>*

*katya.156.156@gmail.com*

Supervisors: A. Sukhotskii<sup>1</sup>, PhD (Engineering), Associate Professor,

I. Popov<sup>3</sup>, DSc (Engineering), Professor

(<sup>1</sup>Belarusian State Technological University, Minsk,

<sup>2</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk,

<sup>3</sup>Kazan 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.<sup>1,2</sup>*

*katya.156.156@gmail.com*

Научные руководители: А.Б. Сухоцкий<sup>1</sup>, к.т.н., доцент,

(<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет, г. Минск,

<sup>2</sup>Институт 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

и существенные массо-габаритные характеристики. Поэтому актуальными являются исследования, связанные с разработкой методов интенсификации теплообмена, которые позволят увеличить площадь, изменить геометрию теплопередающей поверхности или изменить характер течения воздуха внутри теплообменных аппаратов для их эффективной эксплуатации в режиме свободной конвекции.

В работе были проведены экспериментальные исследования однорядного пучка из шести труб с поперечным шагом  $S_1 = 64$  мм. Геометрические размеры биметаллических оребренных труб со спиральными накатными ребрами следующие: 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  $\varphi = 19,3$  (I тип,  $h/s = 5,84$ ). Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь, длина трубы  $l_{\text{п}} = 330$  мм (теплоотдающая длина  $l = 300$  мм). Диаметр несущей трубы  $d_{\text{н}} = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм. Для изменения высоты оребрения трубы ее ребра стачивались путем шлифования с образованием новых типов труб, а компоновка однорядных пучков производилась с постоянным относительным поперечным шагом  $\sigma_1 = S_1/d = 1,14 = \text{const}$ : II тип –  $h/s = 4,80$ ,  $\varphi = 15,1$ ; III тип –  $h/s = 3,20$ ,  $\varphi = 9,4$ ; IV тип –  $h/s = 1,64$ ,  $\varphi = 4,8$ ; V тип –  $h/s = 0,80$ ,  $\varphi = 2,8$ ; VI тип – гладкая труба,  $h/s \rightarrow 0$ ,  $\varphi \rightarrow 1$ .

Для интенсификации свободно-конвективного теплообмена воздуха над однорядными пучками труб различных типов I–VI устанавливались два типа шахт – с регулируемым проходным сечением  $f_{\text{отв}} = 0,0087\text{--}0,0330$  м<sup>2</sup>, высотой  $H = 0,52$  м (шахта 1) и регулируемой высотой  $H = 0,52\text{--}2,12$  м с площадью выходного отверстия  $f_{\text{отв}} = 0,0087$  м<sup>2</sup> (шахта 2) [1].

Экспериментальное исследование проводилось методом полного теплового моделирования. Применялся обогрев оребренных труб вставными теплоэлектронагревателями. Центральная труба пучка являлись калориметрами, на ней 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  $W = 6\text{--}200$  Вт, средняя температура стенки калориметров  $t_{\text{ст}} = 30\text{--}190$ °С и средняя температура в шахтах 1 и 2  $t_{\text{ш}} = 23\text{--}111$ °С, а температура окружающего воздуха в камере  $t_0 = 16\text{--}25$ °С. Скорость воздуха в сжатом сечении пучка составляла около  $w = 0,1\text{--}1,2$  м/с.

По данным измерений рассчитывался средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности оребренной трубы  $\alpha_{\text{к}}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·°С). При его определении учитывалась лучистая составляющая  $Q_{\text{л}}$ , Вт и составляющая потеря  $Q_{\text{п}}$ , Вт [1, 3, 4]. Экспериментальные данные обрабатывали и представлялись в виде чисел подобия Нуссельта  $Nu = \alpha_{\text{к}} \cdot d_0 / \lambda$  и Релея  $Ra = \beta \cdot g \cdot d_0^3 (t_{\text{ст}} - t_0) / (v \cdot a)$ , где  $\beta = 1 / (t_0 + 273)$  – коэффициент температурного расширения воздуха, 1/°С и  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>. Коэффициенты теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·°С), кинематической вязкости  $\nu$ , м<sup>2</sup>/с, и температуропроводности  $a$ , м<sup>2</sup>/с, принимали по температуре окружающей среды  $t_0$ , °С. В качестве определяющего размера был принят диаметр трубы по основанию ребер  $d_0$ , м.

Для изучения влияния геометрических параметров вытяжной шахты на интенсивность теплоотдачи однорядного пучка (типы I–VI) при постоянном числе Релея  $Ra = 100\,000$  были построены зависимости:  $Nu = f(f_{\text{отв}})$  и  $Nu = f(H)$  – размерные,  $Nu = f(\chi_{\text{ш}})$  и  $Nu = f(H_{\text{п-ш}})$  – безразмерные, представленные на рис. 1.

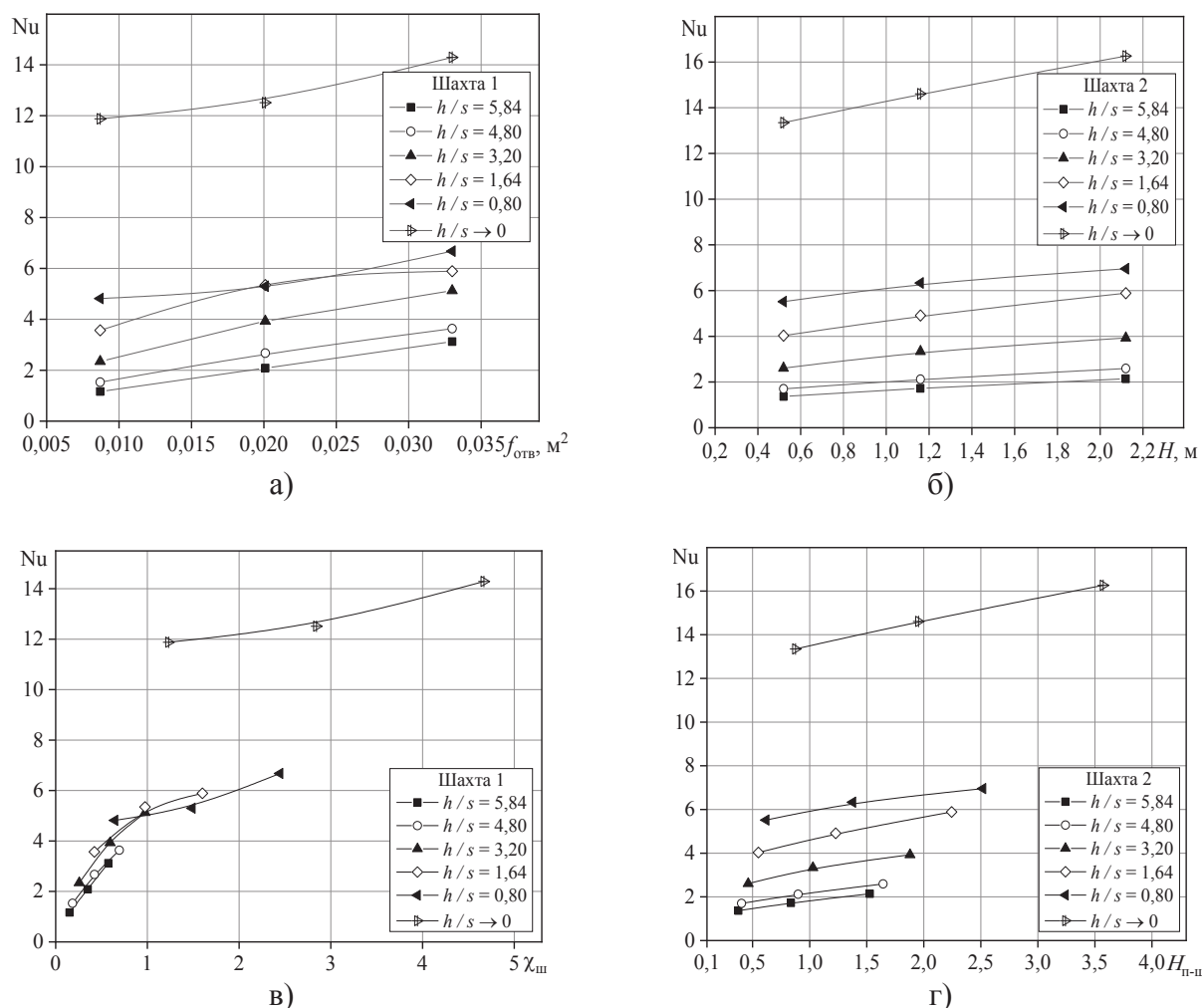


Рис. 1. – Влияние геометрических параметров вытяжной шахты на интенсивность теплоотдачи однорядного пучка (типы I–VI):  
 шахта 1 (с регулируемым проходным сечением, при  $H = 0,52$  м) – а), в)  
 и шахта 2 (с регулируемой высотой, при  $f_{отв} = 0,0087$  м<sup>2</sup>) – б), г) при  $Ra = 100\ 000$

Согласно данным, представленным на рис. 1, при увеличении площади выходного отверстия  $f_{отв}$  шахты 1 и высоты  $H$  шахты 2 наблюдается рост интенсивности теплоотдачи. Полученные результаты хорошо согласуются с данными работ [5] для однорядных пучков оребренных труб с  $\phi = 21$  в режиме смешанной конвекции воздуха.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант T21PM-019).

#### 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., Сидорик Г.С. Исследование смешанноконвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. №19. С. 3–11.

### EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT OF THE OUTLET AREA AND THE HEIGHT OF THE EXHAUST SHAFT ON THE FREE CONVECTIVE HEAT EXCHANGE OF A SINGLE BUNCH WITH DIFFERENT HEIGHT OF TYBE IN THE AIR FLOW

*Danilchik E.S.<sup>1,2</sup>*

*katya.156.156@gmail.com*

Supervisors: A. Sukhotskii<sup>1</sup>, PhD (Engineering), Associate Professor,  
(<sup>1</sup>Belarusian State Technological University, Minsk,

<sup>2</sup>A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus, Minsk)

The article presents the results of an experimental study of the average heat transfer of a single-row bundle of bimetallic finned tubes with different heights of finning (finning coefficient  $\phi \approx 1-19.6$ ) in the free convection mode, intensified using an exhaust shaft. It was found that with an increase in the area of the outlet of shaft 1 and the height of shaft 2, an increase in the intensity of heat transfer is observed.

УДК 621.564.2:621.577

### ДИОКСИД УГЛЕРОДА КАК ХЛАДАГЕНТ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

*Даутов Р.Р.*

*gluza.dautova@ya.ru*

Научный руководитель: А. Е. Кондратьев, к.т.н., доцент  
Казанский государственный энергетический университет, г. Казань

**Аннотация:** в работе представлены особенности применения диоксида углерода в качестве хладагента теплового насоса, изучены его основные достоинства по сравнению с традиционными холодильными агентами и целесообразность применения в системах теплоснабжения.

В настоящее время широкое применение в мировой практике альтернативных источников тепловой энергии постепенно ведет к вытеснению традиционных. Это объясняется возможностью получения дешевого тепла без вреда для окружающей среды, а также нескончаемыми запасами природных источников. Одним из таких энергоэффективных решений, применяемых для систем теплоснабжения, является тепловой насос (ТН). По принципу действия он представляет собой устройство, с помощью которого можно преобразовать тепло от источника с низким температурным уровнем в высокопотенциальную тепловую энергию [1].

Тепловой насос состоит из конденсатора, испарителя, расширительного клапана, и компрессора. Все эти конструктивные элементы соединены в один замкнутый контур. По