

УДК 536.25

**А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик**

Белорусский государственный технологический университет

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА  
ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ И ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ  
УГЛАХ НАКЛОНА ТРУБ К ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ**

Проанализированы исследования в области свободноконвективного теплообмена на биметаллических ребристых трубах и их пучках при различных углах наклона осей труб под углом  $\gamma$ , а также при различных углах наклона продольной оси пучка  $\omega$ .

Проведены экспериментальные исследования приведенных коэффициентов теплоотдачи в режиме свободной конвекции оребренной трубы и однорядного пучка из шести таких труб с шагом  $S_1 = 64$  мм при различных углах наклона  $\gamma$  осей труб к горизонтальной плоскости с коэффициентом оребрения труб  $\phi = 19,26$ . Исследовались углы  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$ .

Исследуемые биметаллические ребристые трубы имели следующие характеристики: материал несущей трубы – углеродистая сталь (наружный диаметр  $d_n = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм), материал накатной ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М. Геометрические параметры ребер:  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 56 \times 26,8 \times 14,6 \times 2,5 \times 0,5 \times 300$  мм.

Исследования проводились методом полного теплового моделирования на специально разработанном экспериментальном стенде.

Показано, что теплоотдача однорядного пучка выше, чем у оребренной трубы, что связано с изменением гидродинамики потока обтекания трубы и увеличением скорости воздуха, проходящего через трубу.

Установлено, что увеличение угла наклона охлаждаемых естественным потоком воздуха однорядных оребренных пучков приводит к снижению теплоотдачи, но отклонение от горизонтальной плоскости  $\pm 15^\circ$  не влияет существенно на их тепловую мощность.

**Ключевые слова:** свободноконвективный теплообмен, биметаллическая ребристая труба, однорядный оребренный пучок, различные углы наклона, коэффициент теплоотдачи, число Нуссельта, число Рэлея.

**A. B. Sukhotski, E. S. Danil'chik**

Belarusian State Technological University

**RESEARCH OF FREE-CONVECTIVE HEAT EXCHANGE FINNED TUBE  
AND SINGLE-RANGE BUNCH AT DIFFERENT ANGLE OF TUBES  
TOWARDS HORIZONTAL PLANE**

Analyzed research in the field of free-convective heat transfer on bimetallic finned tubes and their bunches at different angles of inclination of the tube axes at an angle  $\gamma$ , as well as at different angles of inclination of the longitudinal axis of the bunch  $\omega$ .

Experimental studies of reduced heat transfer coefficients in the free-convection mode of finned tube and single-range bunch of six such tubes with step  $S_1 = 64$  mm at different angles of inclination  $\gamma$  of tube axes to the horizontal plane with tube finning factor  $\phi = 19.26$ . Angles  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ , and  $90^\circ$  were investigated.

The bimetallic finned tubes under investigation had the following characteristics: the material of the supporting tube was carbon steel (outer diameter  $d_n = 25$  mm, wall thickness  $\delta = 2$  mm), the material of the knurled ribbed shell was aluminum alloy AD1M. The geometrical parameters of the ribs:  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 56 \times 26.8 \times 14.6 \times 2.5 \times 0.5 \times 300$  mm.

The studies were carried out by the method of complete thermal modeling on a specially designed experimental stand.

It is shown that the heat transfer of a single-range bunch is higher than that of a finned tube, which is associated with a change in the hydrodynamics of the flow around the tube and an increase in the velocity of air passing through the tube.

It has been established that an increase in the tilt angle of single-range finned bunch cooled by the natural air flow leads to a decrease in heat transfer, but a deviation from the horizontal plane of  $\pm 15^\circ$  does not significantly affect their thermal power.

**Key words:** free-convective heat transfer, bimetallic finned tube, single-range bunch, different angles of inclination, heat transfer coefficient, Nusselt number, Rayleigh number.

**Введение.** В последние десятилетия XX и в начале XXI века свободноконвективный теплообмен в различных отраслях техники и промышленности приобретает все большее распространение.

Использование режимов свободноконвективного теплообмена обеспечивает энергосбережение, улучшение охраны окружающей среды и повышает в ряде случаев надежность эксплуатации энергетических установок. Все это очень актуально в эпоху ресурсо- и энергосбережения, в которой мы сейчас находимся.

Областью применения свободно-конвективных процессов являются химическая и нефтехимическая промышленность, энергетические установки (в теплообменниках воздушного охлаждения, в радиаторах охлаждения масла крупных силовых электротрансформаторов, при воздушном охлаждении мощных полупроводниковых преобразователей энергии и т. д.), компрессорные станции с трубопроводами, охлаждение многих нагруженных электроприборов, нагрев агента сушки влажных материалов, системы вентиляции и воздушного отопления зданий и т. д. [1, 2].

Свободноконвективный теплообмен является сложным процессом, особенно на оребренных поверхностях, так как состоит из двух равнозначных составляющих: конвективной и лучистой. Поэтому для расчета свободноконвективной теплоотдачи принято использовать критериальные уравнения, полученные экспериментально. Теоретические методы описания и расчета сложны, громоздки, а иногда и неосуществимы.

Также сложность в изучении свободноконвективного теплообмена заключается в отсутствии целостного мнения о выборе характерного размера и определяющей температуры. Все это приводит к различию полученных значений коэффициентов теплоотдачи вследствие сложности выбора достоверной методики их определения.

В работе [3] проводились всесторонние экспериментальные исследования порядной и средней свободноконвективной теплоотдачи биметаллических ребристых труб (БРТ) с накатными алюминиевыми ребрами следующих параметров: с коэффициентом оребрения труб  $\phi = 16,8$ ,  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 55,6 \times 26,5 \times 14,55 \times 2,91 \times 0,75 \times 300$  мм; с коэффициентом оребрения труб  $\phi = 21$ ,  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 56,9 \times 26,36 \times 15,27 \times 2,44 \times 0,55 \times 400$  мм. Для обоих типов труб материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М. Диаметр несущей трубы  $d_n = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм. Материал несущей трубы для  $\phi = 16,8$  – латунь; для  $\phi = 21$  – сталь 10.

Из труб с  $\phi = 16,8$  собирались шахматные равносторонние пучки с шагами разбивки труб

$S_1 = S_2' = 58-100$  мм и числом поперечных рядов  $z = 2-4$  и  $z = 5$  с шагом  $S_1 = S_2' = 64$  мм, а также одиночная ребристая труба и однорядные пучки при этих же шагах труб. Угол наклона  $\gamma$  осей труб к горизонтальной плоскости в двух-, трех-, четырех- и пятирядных пучках составлял  $\gamma = 0-60^\circ$ , а для одиночной трубы и однорядного пучка еще дополнительно исследовался  $\gamma = 90^\circ$ . Также рассматривались равносторонние шахматные четырехрядные пучки с шагом  $S_1 = S_2' = 64$  мм при угле наклона продольной оси пучка  $\omega = 0, 15, 30, 45, 60^\circ$ .

Из труб с  $\phi = 21$  собирались горизонтальные шахматные равносторонние пучки с шагом разбивки труб  $S_1 = S_2' = 64$  мм и числом поперечных рядов  $z = 2-3$ . А четырехрядный пучок с таким же шагом труб исследовался еще под различными углами наклона к горизонтальной плоскости  $\gamma = 0-60^\circ$ . Также рассматривались одиночная оребренная труба и однорядный пучок с шагом  $S_1 = 64$  мм.

В результате были предложены расчетные критериальные уравнения для порядной и средней теплоотдачи исследованных пучков с учетом всего диапазона конструкторско-компоновочных характеристик пучков, имевших  $Ra = (0,3-4,0) \cdot 10^5$ .

Интервал применимости  $Ra = (0,3-4,0) \cdot 10^5$ . А также предложены зависимости поправочных коэффициентов с учетом углов наклона  $\gamma$  и  $\omega$ .

В работе [4] исследовалась свободноконвективная теплоотдача коридорных пучков, которые собирались из таких же промышленных биметаллических труб с коэффициентом оребрения труб  $\phi = 16,8$ , что и в работе [3]. Было исследовано два варианта компоновки коридорных пучков. На моделях двух-, трех- и четырехрядных пучков с шагами  $S_1 = 70$  мм,  $S_2 = 61$  мм и  $S_1 = 76$  мм,  $S_2 = 64$  мм были проведены опыты с наклоном осей труб под углом  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60^\circ$  к горизонтальной плоскости. На двух- и трехрядных пучках с шагами  $S_1 = 70$  мм,  $S_2 = 61$  мм выполнены опыты при различных углах наклона продольной оси пучка  $\omega = 0, 30, 45, 60^\circ$ . По результатам экспериментальных исследований было получено обобщенное критериальное уравнение для проектирования широкого круга теплообменных аппаратов с различной конфигурацией пучка. Интервал применимости  $Ra = (0,2-0,76) \cdot 10^5$ . Определено, что теплоотдача двухрядных коридорных пучков имеет максимум при углах наклона  $\gamma = 15^\circ$ , четырехрядных – при  $\gamma = 30^\circ$ , при этом угол наклона осей труб по отношению к горизонтальной плоскости  $\gamma$  практически не влияет на теплоотдачу трехрядных пучков. Для всех моделей исследованных пучков характерен ярко выраженный максимум теплоотдачи при угле наклона продольной оси

пучка  $\omega = 30^\circ$ . Теплоотдача пучков при  $\omega = 15^\circ$  и  $\omega = 45^\circ$  практически не отличается.

В работе [5] были проведены экспериментальные исследования свободноконвективной теплоотдачи двухрядных наклонных коридорных пучков с коэффициентом оребрения труб  $\phi = 16,8$ , собранных из БРТ следующих параметров:  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 55,65 \times 26,63 \times 14,51 \times 2,91 \times 0,75 \times 300$  мм. Число поперечных рядов труб в пучке составляло  $z = 5$ . Несущая труба – латунь Л68 (наружный диаметр  $d_n = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм), накатное оребрение – алюминиевый сплав АД1М. Опыты проведены на двух моделях пучков, с шагами  $S_1 = 70$  мм,  $S_2 = 61$  мм и  $S_1 = 76$  мм,  $S_2 = 64$  мм, оси труб которых располагались при следующих углах наклона  $\gamma$  к горизонтальной плоскости:  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60^\circ$ . Исследованные коридорные пучки сравнивались с наклонными шахматными пучками с разбивкой труб по равностороннему треугольнику  $S_1 = S_2' = 70$  мм и  $S_1 = S_2' = 76$  мм [3], где  $S_2'$  – диагональный шаг пучка. Установлено, что теплоотдача шахматных пучков при том же числе Релея ( $Ra = 150\,000$ ) выше, чем в коридорных. Для горизонтальных пучков это различие доходит до 30%, но с ростом угла наклона  $\gamma$  теплоотдача шахматных и коридорных пучков приближается к одним и тем же значениям.

В [6] рассмотрена свободноконвективная теплоотдача одиночной биметаллической ребристой трубы при различных углах наклона  $\gamma$  оси трубы к горизонтальной плоскости ( $\gamma = 0, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$ ) с коэффициентом оребрения  $\phi = 21$  следующих параметров:  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 56 \times 26 \times 15 \times 2,5 \times 0,5 \times 300$  мм. Несущая труба – углеродистая сталь (наружный диаметр  $d_n = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм), накатное оребрение – алюминиевый сплав АД1М. В результате экспериментальных исследований были построены графики зависимости чисел подобия Нуссельта  $Nu$  от Рэлея  $Ra$  при различных углах наклона  $\gamma$ .

В работах [3, 6] теплофизические свойства воздуха  $\lambda, \nu, \rho, c_p, \beta$  определяли по температуре окружающего воздуха в камере  $t_0$ . В работах [4, 5]  $\lambda, \nu, \rho, c_p$  определяли по температуре стенки ребренной трубы  $t_{ст}$ , а  $\beta$  – по температуре окружающего воздуха в камере  $t_0$ . За определяющий размер принимался диаметр трубы по основанию ребер  $d_0$ .

Цель настоящей работы – экспериментальные исследования приведенных коэффициентов теплоотдачи в режиме свободной конвекции ребренной трубы и однорядного пучка при различных углах наклона  $\gamma$  осей труб к горизонтальной плоскости с коэффициентом оребрения труб  $\phi = 19,26$  и анализ полученных данных.

**Основная часть.** Объектом исследования являлась биметаллическая ребристая труба со

спиральными накатными ребрами и однорядный пучок, состоящий из шести трубок, расположенных с шагом  $S_1 = 64$  мм при различных углах наклона  $\gamma$  к горизонтальной плоскости. А именно исследовались углы  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$ .

Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь. Диаметр несущей трубы  $d_n = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм. Геометрические параметры оребрения: наружный диаметр ребра  $d = 56$  мм; диаметр по основанию ребра  $d_0 = d - 2h = 26,8$  мм; высота ребра  $h = 14,6$  мм; шаг ребра  $s = 2,5$  мм; средняя толщина ребра  $\Delta = 0,5$  мм; коэффициент оребрения трубы  $\phi = 19,26$ . Полная длина биметаллической трубы с торцевыми участками  $l_n = 330$  мм, теплоотдающая длина  $l = 300$  мм.

Исследования проводились методом полного теплового моделирования на специально разработанном экспериментальном стенде (рис. 1) [7] для исследования свободноконвективного теплообмена.

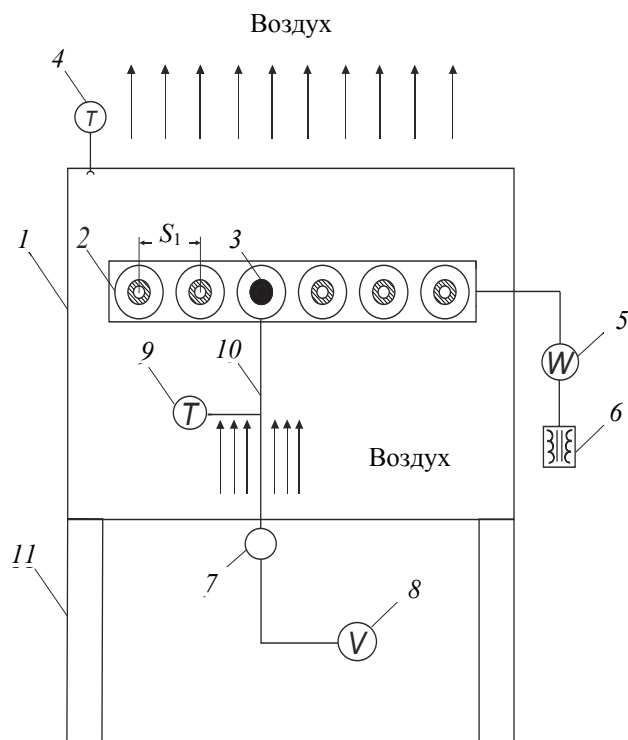


Рис. 1. Экспериментальный стенд для исследования свободной конвекции: 1 – камера; 2 – исследуемая ребристая поверхность (ребристая труба или однорядный пучок); 3 – калориметрическая труба; 4 – лабораторный термометр; 5 – ваттметр; 6 – трансформатор; 7 – переключатель; 8 – вольтметр; 9 – сосуд Дьюара; 10 – хромель-алюмелевые термопары; 11 – опоры

В центре стендовой камеры 1 размером  $0,8 \times 0,8 \times 1$  м размещалась исследуемая ребристая

поверхность 2 (оробренная труба или однорядный пучок) из обогреваемых переменным электрическим током труб. Одиночная оробренная труба и центральная труба в однорядном пучке являлась калориметром 3, на которой были установлены основные средства измерения. Показания хромель-алюмелевых термопар 10 и 4-спайной медь-константановой дифференциальной термобатареи (для измерения торцевых потерь оробренной трубы), заложенных на наружной поверхности трубы-калориметра, фиксировались с помощью вольтметра 8 (модель GDM-78341 класса точности 0,25), подключенного через переключатель 7. Холодный спай всех термопар помещался в сосуд Дьюара 9.

Подвод теплового потока к оробренным поверхностям обеспечивался за счет установки внутри оробренных труб трубчатых электронагревателей (ТЭНов), которые подключались параллельно к регулируемому масляному трансформатору 6 (модель АОМН-40-220-75). Мощность, подводимая к оробренной трубе или к однорядному пучку, измерялась ваттметром 5 (модель К 505 класса точности 0,5). Температура воздуха  $t_0$  внутри камеры измерялась двумя ртутными лабораторными термометрами 4 со шкалой 0–50°C и ценой деления 0,1°C, расположенными в диагонально противоположных ее углах. Ртутные шарики термометров защищались от излучения пучка экранами из алюминиевой фольги.

Исследуемый угол наклона  $\gamma$  трубы и пучка, образованный их осями и горизонтальной поверхностью, обеспечивался в экспериментальной камере с помощью системы растяжек.

Теплота от оробренных поверхностей конвекцией и излучением передавалась атмосферному воздуху, который за счет разности плотностей нагретого и холодного воздуха поднимался вверх в окружающую среду.

Конструкция опытной трубы-калориметра, с помощью которой проводились все основные измерения, представлена на рис. 2. Внутри биметаллической ребристой трубы 1, указанной выше, вставлялся трубчатый электронагреватель (ТЭН) 2 со следующими параметрами: диаметр – 12,5 мм, материал оболочки – углеродистая сталь, спираль 3 – проволока с высоким омическим сопротивлением, наполнитель – электротехнический периклаз марки ППЭ мощностью 320 Вт. С помощью центровочного кольца 4 обеспечивалась центральное расположение ТЭНа в трубе. А с целью устранения внутренних конвективных токов воздуха и равномерного прогрева трубы между ТЭНом и стальной стенкой трубки засыпался кварцевый песок 5 дисперсным составом 0,16–0,32 мм. Торцы трубок фиксировались высокотемпературной силиконовой замазкой 6.

В остальных трубах пучка установка ТЭНов была аналогичная.

Для измерения средней температуры поверхности калориметра у основания ребер заложено пять хромель-алюмелевых термопар 7 вдоль образующей трубы, сдвинутых относительно друг друга на угловое расстояние 45°. Термопары были заложены у основания ребер вдоль образующей трубы по винтовой линии на половине окружности трубы, считая, что вторая половина имеет симметричное поле температур. Чувствительные спаи термопар зачеканены свинцовой пластиной в профрезерованные канавки размером 4×0,8×0,8 мм в стенку накатной ребристой оболочки. Провода хромель-алюмелевых термопар имеют диаметры: хромелевый – 0,16 мм, алюмелевый – 0,12 мм. Предварительно термопары были протарированы с точностью 0,1°C.

При исследовании оробренной трубы торцевые ее участки защищались фторопластовыми втулками 9 наружным диаметром  $d_{вт} = 45$  мм, длиной  $l_{вт} = 35$  мм и глубиной  $b_{вт} = 25$  мм (рис. 2, а). С целью измерения торцевых потоков тепла на поверхности обеих втулок с противоположных сторон закреплены по два спая общей 4-спайной медь-константановой дифференциальной термобатареи 10. Провода медь-константановой термопары имеют диаметры: медный – 0,2 мм, константановый – 0,2 мм. Предварительно термопара была также протарирована с точностью 0,1°C.

При исследовании однорядного пучка торцевые участки труб защищались теплоизолирующим коробом 11 с минеральной ватой 12 (рис. 2, б). Длина короба составила  $l_k = 30$  мм (длина минеральной ваты  $l_{м.в} = 19$  мм), а высота  $h_k = 65$  мм.

Во время экспериментального исследования оробренной трубы и однорядного пучка электрическая мощность, подводимая к трубе, изменялась в пределах  $W = 9–260$  Вт, температура стенки у основания ребер составляла  $t_{ст} = 35–255$ °C, а температура окружающего воздуха в камере  $t_0 = 18,5–25,5$ °C. Теплофизические свойства воздуха  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\rho$ ,  $c_p$ ,  $\beta$  определяли по температуре окружающего воздуха в камере  $t_0$ . За определяющий размер был принят диаметр трубы по основанию ребер  $d_0$ .

По данным измерений рассчитывался средний приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией, отнесенный к полной наружной поверхности, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

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

где  $Q_k$  – тепловой поток, отведенный конвекцией от трубы воздуху, Вт;  $F = \pi d_0 l \phi$  – площадь

теплоотдающей оребренной поверхности,  $m^2$ ;  
 $t_{ст}$  – средняя температура поверхности стенки у основания ребер трубы (среднеарифметическая температура по показаниям термопар),  $^{\circ}C$ .

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

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

где  $W$  – электрическая мощность, подводимая к калориметру, Вт;  $Q_{л}$  – тепловой поток, отведенный излучением от трубы к воздуху, Вт [3, 8, 9];  $Q_{п}$  – тепловые потери через торцы труб и токопроводы, Вт.

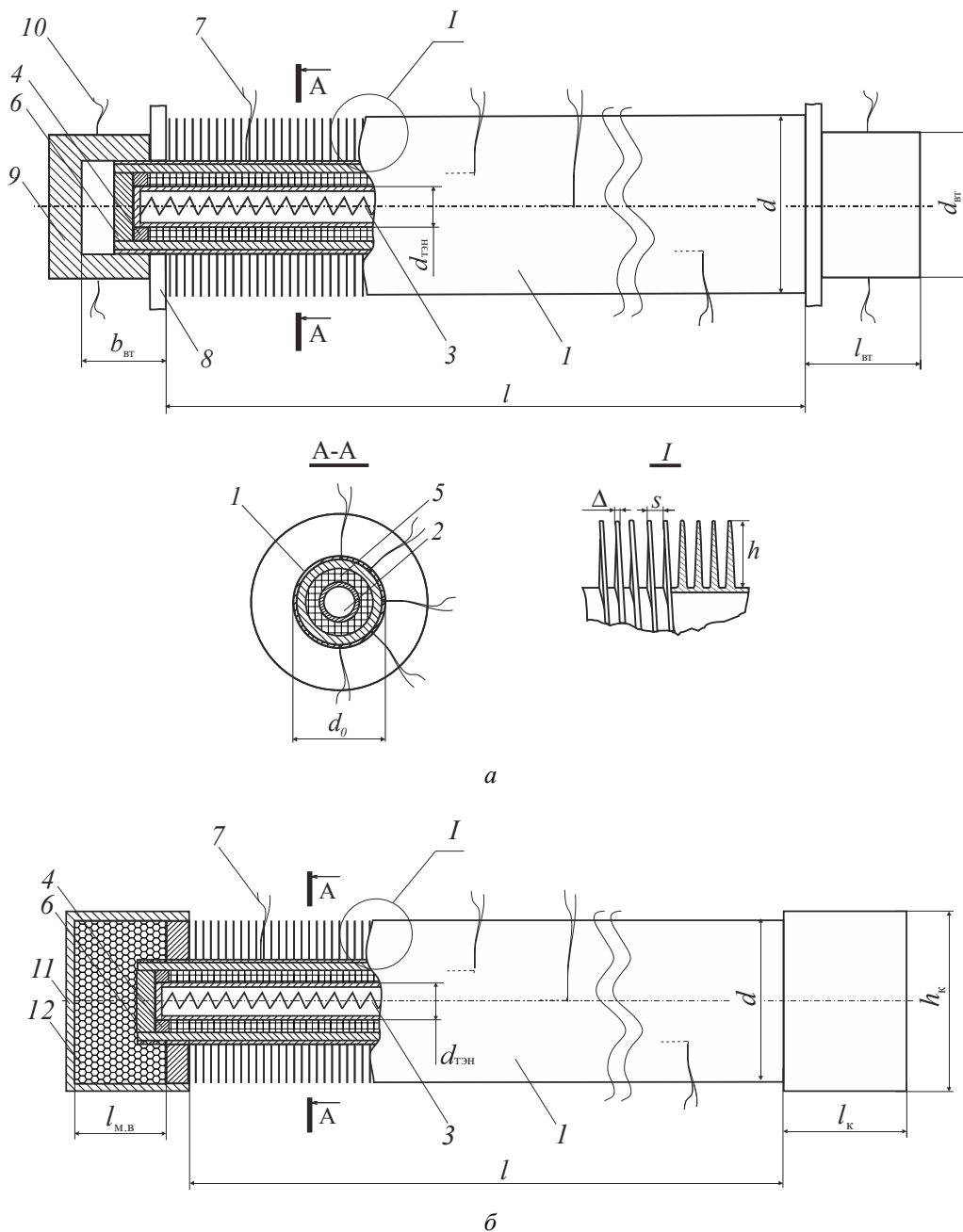


Рис. 2. Общий вид калориметрической трубы:

*a* – при исследовании оребренной трубы; *б* – при исследовании однорядного пучка:

1 – биметаллическая ребристая труба; 2 – трубчатый электронагреватель (ТЭН);

3 – спираль ТЭНа; 4 – центровочное кольцо; 5 – кварцевый песок; 6 – высокотемпературная силиконовая замазка; 7 – хромель-алюмелевые термопары; 8 – трубная доска из МДФ;

9 – фторопластовая втулка; 10 – 4-спайная медь-константановая дифференциальная термобатарея;

11 – теплоизолирующий короб; 12 – минеральная вата

Торцевые тепловые потери калориметра  $Q_p$ , как в случае защиты торцов труб фторопластовыми втулками, так и в случае защиты их теплоизолирующим коробом с минеральной ватой, определяли по результатам предварительных опытов на теплоизолированной трубе.

Результаты эксперимента представлялись в числах подобия Рейля и Нуссельта:

$$Ra = Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot \beta \cdot d_0^3 \cdot (t_{ст} - t_0)}{\nu \cdot a}; \quad (3)$$

$$Nu = \alpha_k \cdot \frac{d_0}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $Gr$  – число Грасгофа;  $Pr$  – число Прандтля;  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения,  $K^{-1}$ ;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/c$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(К \cdot м)$ .

Результаты экспериментальных исследований оребренной трубы и однорядного пучка с шагом  $S_1 = 64$  мм при различных углах наклона  $\gamma$  к горизонтальной плоскости представлены на рис. 3.

Из графиков на рис. 3 следует, что теплоотдача однорядного пучка выше, чем у оребренной трубы, что связано с изменением гидродинамики потока обтекания трубы и увеличением скорости воздуха, проходящего через трубу.

На рис. 3, а показано, что увеличение угла наклона оребренной трубы от 0 до 60° сопровождается монотонным снижением теплоотдачи, а при вертикальном расположении трубы ( $\gamma = 90^\circ$ ) снижение теплоотдачи приобретает иной характер, что связано со слабой циркуляцией воздуха в межреберных полостях, и конвективный поток преимущественно отводится лишь с торцевых поверхностей ребер. При этом теплоотдача при  $\gamma = 15^\circ$  очень близка к полученным ее значениям при  $\gamma = 0^\circ$ , а теплоотдача вертикальной оребренной трубы приблизительно в 2 раза хуже теплоотдачи горизонтальной трубы.

На рис. 3, б показано, что характер снижения теплоотдачи однорядного пучка от 0 и 15 до 45° один, а для 60 и 90° другой, что объясняется иной гидродинамикой потока пучка труб по сравнению с одиночной трубой. Это можно объяснить ухудшением условий обтекания воздухом межреберного пространства. Очень интересен тот факт, что при  $\gamma = 0^\circ$  и  $\gamma = 15^\circ$  теплоотдача практически одинакова ( $\pm 1,0-1,5\%$ ). При этом ее значения при  $\gamma = 30^\circ$  также приближаются к значениям при  $\gamma = 0^\circ$  и  $\gamma = 15^\circ$ , что ведет к уменьшению габаритов теплообменного пучка в про-

странстве. Теплоотдача же вертикального однорядного пучка хуже теплоотдачи горизонтального однорядного пучка приблизительно в 2,7 раза.

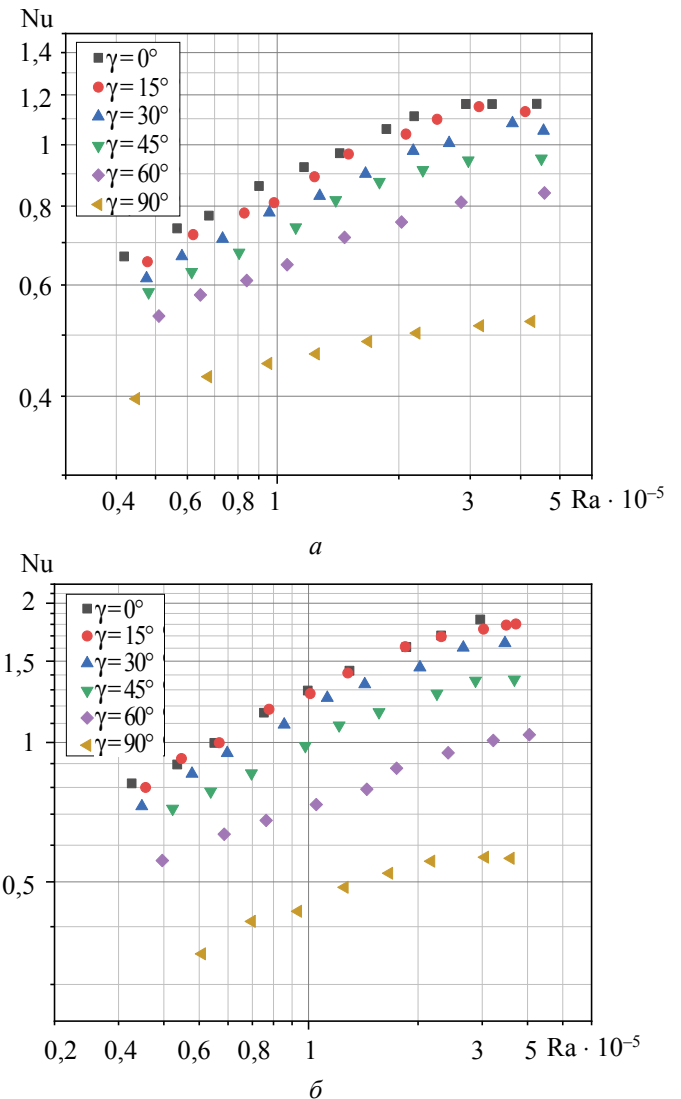


Рис. 3. Свободноконвективная теплоотдача оребренной трубы (а) и однорядного пучка с шагом  $S_1 = 64$  мм (б) при различных углах наклона  $\gamma$  к горизонтальной плоскости

**Заключение.** Проведены экспериментальные исследования и анализ приведенной свободноконвективной теплоотдачи оребренной трубы и однорядного пучка при различных углах наклона  $\gamma$  к горизонтальной плоскости. Установлено, что увеличение угла наклона охлаждаемым естественным потоком воздуха однорядных оребренных пучков приводит к снижению теплоотдачи, но отклонение от горизонтальной плоскости  $\pm 15^\circ$  не влияет существенно на их тепловую мощность.

### Литература

1. Свободноконвективные течения. Тепло- и массообмен: в 2 кн. / Б. Гебхарт [и др.]; пер. с англ. М.: Мир, 1991. Кн. 1. 678 с.

2. Джалурия Й. Естественная конвекция. Тепло- и массообмен; пер. с англ. М.: Мир, 1983. 400 с.
3. Самородов А. В. Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками: автореферат дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГТУ, 1999. С. 3–22.
4. Новожилова А. В., Марьина З. Г., Львов Е. А. К расчету теплообмена коридорных пучков из биметаллических ребристых труб при различных углах наклона труб в режиме свободной конвекции // Тез. докл. и сообщений XV Минского международного форума по тепло- и массообмену, 23–26 мая 2016 г.: в 2 т. Минск, 2016. Т. 1. С. 157–161.
5. Позднякова А. В., Самородов А. В. Влияние угла наклона на свободноконвективный теплообмен двухрядных коридорных пучков из оребренных труб // Повышение эффективности теплообменных процессов и систем: материалы II Междунар. науч.-техн. конф. Вологда: ВоГТУ, 2000. С. 58–60.
6. Разработка стенда и исследование свободной конвекции одиночной оребренной трубы при различных углах наклона / А. Б. Сухоцкий [и др.] // Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2017. № 1 (192). С. 169–175.
7. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков // Труды БГТУ. Сер. 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1 (204). С. 85–93.
8. Кунтыш В. Б., Самородов А. В. Исследование влияния угла наклона круглоребристых труб на свободноконвективный теплообмен шахматного пучка в неограниченном объеме воздуха // Инженерно-физический журнал. 2010. № 2. С. 338–344.
9. Самородов А. В., Рощин С. П., Кунтыш В. Б. Лучистый теплообмен одиночной ребристой трубы с окружающей средой // Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов: сб. науч. тр. 1997. Вып. II. С. 102–113.
10. Самородов А. В. К расчету теплообмена излучением круглоребристых труб и пучков // Труды лесоинженерного факультета Петрозаводского гос. ун-та. 1999. Вып. 2. С. 135–142.
11. Merkin J. H. The effect of buoyancy forces on the boundary-layer flow over a semi-infinite vertical flat plate in a uniform free stream // Journal of Fluid Mechanics. 1969. Vol. 35. P. 439–450.
12. Lloyd J. R., Sparrow E. M. Combined forced and free convection flow on vertical surface // Int. J. Mass Transfer. 1970. Vol. 13. P. 434–438.
13. Мачулин В. И. Теплообмен вертикального ряда труб при естественной конвекции воздуха // Холодильная техника. 1976. № 7. С. 24–25.
14. Кунтыш В. Б., Позднякова А. В., Мелехов В. И. Теплоотдача естественной конвекцией одиночного ряда вертикальных оребренных труб калориферов лесосушильных камер // Изв. вузов. Лесной журнал. 2002. № 2. С. 116–119.
15. Новожилова А. В. Анализ методик определения теплоотдачи воздуха на оребренных поверхностях нагрева при свободной конвекции // Проблемы теплоэнергетики Европейского севера: сб. науч. тр. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет, 2010. С. 88–97.
16. Мартыненко О. Г., Соковишин Ю. А. Свободноконвективный теплообмен: справочник. Минск: Наука и техника, 1982. 400 с.
17. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Повышение энергоэффективности теплообменников воздушного охлаждения // Экология и промышленность. 2017. № 2. С. 72–77.

#### References

1. Gebhart V. *Svobodno-konvektivnyye techeniya. Teplo- i massoobmen* [Free-convective currents. Heat and mass exchange]. Moscow, Mir Publ., 1991, vol. 1, 678 p.
2. Jaluria Y. *Estestvennaya konvektsiya. Teplo- i massoobmen* [Natural convection. Warm and mass exchange]. Moscow, Mir Publ., 1983. 400 p.
3. Samorodov A. V. *Sovershenstvovaniye metodiki teplovogo rascheta i proektirovaniya apparatov vozdushnogo okhlazhdeniya s shakhmatnymi puchkami: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Perfection of a technique of thermal calculation and design of air coolers with chess ribbed beams. Abstract of thesis PhD (Engineering)]. St. Petersburg, 1999, pp. 3–22.
4. Novozhilova A. V., Maryina Z. G., L'vov E. A. To the calculation of the heat exchange of corridor bundles from bimetallic ribbed pipes at different tube angles in the free convection regime. *Tez. dokl. i soobshcheniy XV Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massobmenu* [Abstracts and reports of the XV International Forum on Heat and Mass Transfer]. Minsk, May 23–26, 2016, pp. 157–161 (In Russian).