

## ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ ПО ТЕПЛОТДАЧЕ СТАНДАРТИЗИРОВАННОЙ БИМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОРЕБРЕННОЙ ТРУБЫ С КРУГЛЫМИ АЛЮМИНИЕВЫМИ РЕБРАМИ В УСЛОВИЯХ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА

Е. С. Данильчик<sup>1</sup>, А. Б. Сухоцкий<sup>1</sup>, Г. С. Маршалова<sup>1</sup>,  
А. Д. Чорный<sup>2</sup>, Ю. В. Жукова<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск

*Проведено обобщение полученных результатов по теплоотдаче в ходе экспериментального исследования биметаллической оребренной трубы со спиральными накатными круглыми ребрами в условиях свободной конвекции. Получено уравнение подобия для расчета средней приведенной теплоотдачи одиночной оребренной трубы с разной высотой ребра (0–14,6 мм) при различных углах наклона  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$  трубы к горизонтальной плоскости. Диапазон применимости уравнения подобия в пределах числа Рейля:  $Ra = 32\ 000–450\ 000$ . Получено, что удельный тепловой поток одиночной оребренной трубы при возрастании высоты ее ребра в пределах  $h \approx 0–12$  мм увеличивается в 1,2–1,9 раза, а при достижении  $h = 14,6$  мм снижается в 1,1–2,71 раза в зависимости от угла наклона трубы.*

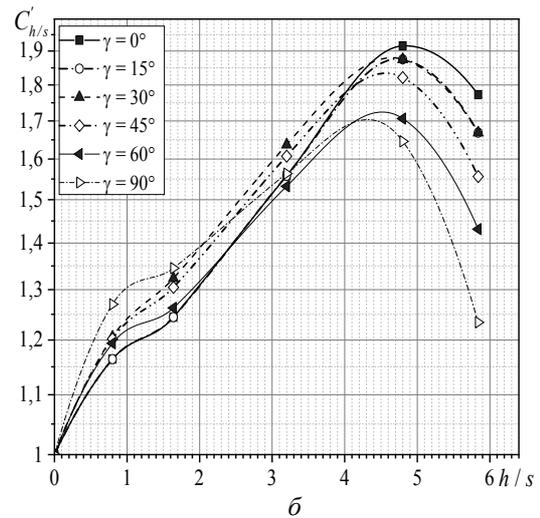
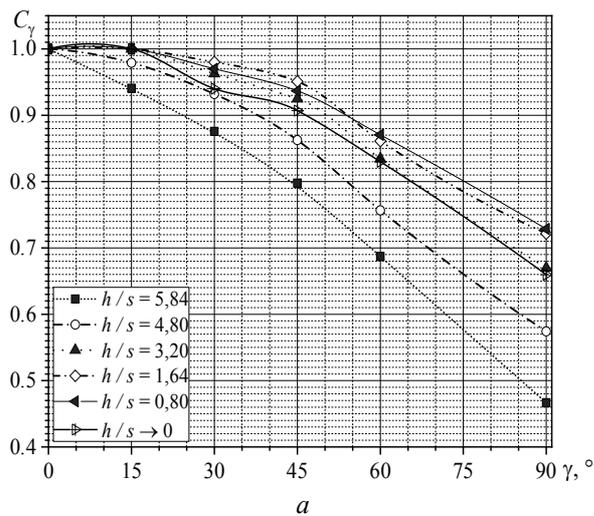
**Ключевые слова:** свободная конвекция, оребренная труба, высота ребра, угол наклона, число Нуссельта, число Рейля, обобщение, воздухоохлаждаемые теплообменники.

Биметаллические ребристые трубы (БРТ) с круглыми спиральными алюминиевыми ребрами, изготавливаемые по различным технологиям, широко применяются в промышленности и технике. Из них собираются теплообменные секции рекуперативных конвективных воздухоохлаждаемых теплообменников, которые используются в топливно-энергетическом комплексе, воздушно-отопительных агрегатах, приточно-вытяжной системе вентиляции зданий и сооружений, калориферов общего назначения и т. д. [1]. Данные теплообменники в основном эксплуатируются в режиме вынужденной конвекции воздуха, на привод которых затрачивается значительное количество электроэнергии. Одним из актуальных направлений реализации энергосберегающих технологий для таких аппаратов является расширенное использование режима свободно-конвективного теплообмена.

В работе проведено обобщение полученных результатов по теплоотдаче в ходе экспериментального исследования биметаллической оребренной трубы со спиральными накатными ребрами в условиях свободной конвекции, представленных в работе [2]. Геометрические размеры трубы следующие: наружный диаметр оребрения  $d = 56,0$  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  $\phi = 19,3$  (I тип,  $h/s = 5,84$ ). Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь, длина трубы  $l_n = 330$  мм (теплоотдающая длина  $l = 300$  мм). Диаметр несущей трубы  $d_n = 25$  мм, толщина стенки  $\delta = 2$  мм. Для изменения высоты оребрения трубы ее ребра ставились путем шлифования с образованием новых типов труб: II тип –  $h = 12,0$  мм,  $d = 50,8$  мм,  $\phi = 15,1$  ( $h/s = 4,80$ ); III тип –  $h = 8,0$  мм;  $d = 42,8$  мм;  $\phi = 9,4$  ( $h/s = 3,20$ ); IV тип –  $h = 4,1$  мм;  $d = 35,0$  мм;  $\phi = 4,8$  ( $h/s = 1,64$ ); V тип –  $h = 2,0$  мм;  $d = 30,8$  мм;  $\phi = 2,8$  ( $h/s = 0,80$ ); VI тип – условно гладкая труба [3],  $h/s \approx 0$ . Все типы труб изучались при углах наклона осей труб к горизонтальной плоскости  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$ .

Для обобщения полученных результатов по теплоотдаче одиночной оребренной трубы в режиме свободной конвекции на рисунке, а представлена графическая зависимость попра-

вочного коэффициента  $C_\gamma = \text{Nu}_{\gamma}^{h/s} / \text{Nu}_{\gamma=0^\circ}^{h/s}$  на угол наклона  $\gamma$  для различных типов экспериментальных труб (различные  $h/s$ , типы I–VI, с отклонением не более  $\pm 2\%$ , только при  $\gamma = 90^\circ - \pm 7\%$ ), который определялся как отношение чисел Нуссельта одиночной трубы при  $\gamma$  ( $\gamma = 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$ ) и  $\gamma = 0^\circ$  (горизонтальной трубы). Поправочный коэффициент  $C_{h/s} = \text{Nu}_{h/s}^\gamma / \text{Nu}_{h/s \rightarrow 0}^\gamma$  на относительную высоту ребра  $h/s$  определялся как отношение чисел Нуссельта одиночной трубы с  $h/s$  (типы I–V) и  $h/s \rightarrow 0$  (тип VI – гладкой трубы) при различных углах наклона трубы к горизонту  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$ . Для оценки увеличения теплового потока оребренной трубы по сравнению с гладкой трубой использовался коэффициент  $C_{h/s}\phi = C'_{h/s}$  с отклонением до  $\pm 5\%$  (рисунок, б).



Графические зависимости поправочных коэффициентов: а –  $C_\gamma = f(\gamma)$ ; б –  $C'_{h/s} = f(h/s)$  при определении теплоотдачи одиночной оребренной трубы различных типов I–VI при углах наклона  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$  в режиме свободной конвекции

Физический смысл данного коэффициента  $C_{h/s}\phi = C'_{h/s} = (\alpha_k F)_{h/s} / (\alpha_k F)_{h/s \rightarrow 0}$  следующий: удельное (на единицу температурного напора  $\Delta t = 1^\circ\text{C}$ ) увеличение теплового потока от оребренной трубы к воздуху по сравнению с гладкой трубой. При определении поправочных коэффициентов  $C_\gamma$  и  $C_{h/s}$  ( $C'_{h/s}$ ) числа Нуссельта  $\text{Nu}$  при соответствующих числах Релея  $\text{Ra}$  вычислялись по уравнениям (1) и (2) с применением табл. 1 из [2]. Коэффициенты определялись как среднее арифметическое расчетных точек на исследованном диапазоне  $\text{Ra} = 32\,000\text{--}450\,000$ .

Таким образом, используя постоянные коэффициенты  $A$  и  $n$  из табл. 1 для уравнения (2) [2] – гладкой горизонтальной трубы (тип VI) (можно использовать и зависимость М. А. Михеева [4]) и графические зависимости поправочных коэффициентов рисунке, получаем обобщающее уравнение для определения теплоотдачи одиночной оребренной трубы различных типов I–VI ( $h/s \approx 0\text{--}5,84$ ) при углах наклона  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$  в режиме свободной конвекции с отклонением до  $\pm 10\%$  (при  $\gamma = 90^\circ$  – до  $\pm 17\%$ ), действительное в диапазоне  $\text{Ra} = 32\,000\text{--}450\,000$ :

$$\text{Nu} = 0,518 \cdot \text{Ra}^{0,25} \cdot C_\gamma^0 \cdot C_{h/s}^\gamma \quad (1)$$

где  $C_\gamma^0$  – поправочный коэффициент гладкой горизонтальной трубы на угол ее наклона  $\gamma = 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$  к горизонту (рисунок, а, сплошная жирная линия);  $C_{h/s}^\gamma = C'_{h/s} / \phi$  – поправочный коэффициент гладкой трубы при углах наклона  $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$  и  $90^\circ$  на

относительную высоту ребра труб в пределах  $h/s = 0,8–5,84$  (рисунок, б, коэффициент оребрения  $\phi$  из геометрических размеров труб), т. е. осуществляется переход от теплоотдачи гладкой трубы под наклоном к горизонту к теплоотдаче трубы с различной высотой ребра при том же угле наклона.

Оценка тепловой эффективности одиночных оребренных труб с различной высотой ребра проводилась с помощью коэффициента увеличения теплового потока оребренной трубы по сравнению с гладкой трубой, учитывающего теплоотдачу и площадь труб. Из рисунка, б видно, что коэффициент увеличения теплового потока одиночной оребренной трубы при возрастании высоты ее ребра в пределах  $h/s \approx 0–4,80$  увеличивается в 1,2–1,9 раза, а при достижении  $h/s = 5,84$  снижается в 1,1–2,71 раза в зависимости от угла наклона трубы. Максимальное его увеличение (в 1,7–1,9 раз) достигается при эффективной высоте ребра в интервале  $h_{эф} = 0,0108–0,0123$  м ( $h/s = 4,3–4,9$ ) в зависимости от угла наклона трубы, причем с ростом угла наклона эффективная высота  $h_{эф}$  ребра уменьшается. При дальнейшем увеличении высоты ребра  $h > h_{эф}$  коэффициент увеличения теплового потока одиночной оребренной трубы снижается.

### Литература

1. Бессонный А. Н. и др. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / Под ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996. – 512 с.
2. Данильчик Е. С. Экспериментальные исследования теплоотдачи одиночной биметаллической ребристой трубы с различной высотой оребрения к воздуху в режиме свободной конвекции // Тепло- и массоперенос–2019: сб. науч. тр. / Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси. Минск, 2020. С. 42–52.
3. Данильчик Е. С. Сухоцкий А. Б. Экспериментальные исследования влияния угла наклона оребренной трубы на свободно-конвективную теплоотдачу теплообменников воздушного охлаждения // Энергоэффективность. 2020. № 7. С. 16–20.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Краткий курс теплопередачи. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 208 с.