

Литература

1. Kaban'kov O. N., Sukomel L. A., Zubov N. O., Yagov V. V. Experimental study of thermo-hydraulic characteristics of natural circulation loop at water and FC-72 boiling under atmospheric pressure // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2017. Vol. 891. P 1–9.
 2. Kaban'kov O. N., Sukomel L. A., Yagov V. V., Zubov N. O. Unstable circulation regimes during water boiling in a thermosyphon loop under atmospheric pressure // Heat Pipe Science and Technology. An Int. J. 2016. Vol. 7, Issue 1-2. P. 31–44.
 3. Zvirin Y. A review of natural circulation loops in pressurized water reactors and other systems // Nuclear Engineering and Design. 1981. Vol. 67. P. 203–225.
 4. Kumar N., Nayak A. K., Vijayan P. K., Vaze K. K. Modeling the flow characteristics during start-up of natural circulation systems from rest state// Reactor Engineering Division Research Article. 2014. ISSUE No 336 JAN-FEB 2014. P. 1–11.
 5. Kumar N., Doshi J. B., Vijayan P. K. Investigations on the role of mixed convection and wall friction factor in single-phase natural circulation loop dynamics // Annals of Nuclear Energy. 2011. Vol. 38. P. 2247–2270.
 6. Ягов В. В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учеб. пособие. М.: Изд. дом МЭИ, 2014. – 542 с.
 7. Петухов Б. С., Генин Л. Г., Ковалев С. А., Соловьев С. Л. Теплообмен в ядерных энергетических установках. М.: Изд-во МЭИ, 2003. – 548 с.
-

УДК 621.565.93/95 (043.3)

ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ РЕБРА КРУГЛОРЕБРИСТЫХ ТРУБ ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УГЛАХ ЕГО НАКЛОНА К ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОСТИ НА СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

А. Б. Сухоцкий¹, Е. С. Данильчик²

¹*Белорусский государственный технологический университет, г. Минск*

²*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск
katya.156.156@gmail.com*

Рекуперативные теплообменники с пучками из биметаллических труб со спирально накатными ребрами (БРТ) с поперечным вынужденным потоком воздуха получили широкое распространение в различных энергетических и технологических установках. Большая часть данных теплообменников приходится на теплообменники воздушного охлаждения (ТВО), которые применяются в различных отраслях промышленности для конденсации и охлаждения технологических продуктов и энергоносителей.

В настоящее время ТВО в основном применяются в режиме вынужденной конвекции, который позволяет значительно увеличить коэффициент теплопередачи и тем самым снизить габариты теплообменника. Но эксплуатация таких ТВО требует значительного потребления энергии на привод вентиляторов (большое аэродинамическое сопротивление).

Одним из способов решения проблемы энергосбережения является перевод данных ТВО в режим свободной конвекции без затрат электроэнергии на привод вентиляторов. При некоторой температуре охлаждающего воздуха вентиляторы воздухоохлаждаемого теплообменника могут быть частично или полностью отключены при обеспечении нормативной теп-

ловой мощности аппарата [1]. Главным недостатком данных ТВО являются малые коэффициенты теплопередачи и существенные габаритно-массовые характеристики. Поэтому очень актуальны углубленные исследования эксплуатации ТВО в режиме свободной конвекции, которые связаны с разработкой энергоэффективной поверхности теплообмена ТВО в данном тепловом режиме.

Также важным вопросом является пространственное расположение данного теплообменника, так как сегодня предприятия зачастую ограничены площадью для установки необходимого технологического оборудования.

В данной работе были проведены экспериментальные исследования влияния высоты оребрения круглоребристой трубы на свободно-конвективный теплообмен однорядного пучка из шести ($m = 6$ шт) труб с поперечным шагом $S_1 = 64$ мм (относительным поперечным шагом $\sigma_1 = S_1 / d = 1,140$) при различных углах наклона γ к горизонтальной плоскости, а именно, исследовались углы $\gamma = 0, 15, 30, 45, 60$ и 90° .

Геометрические размеры биметаллических оребренных труб со спиральными накатными ребрами были следующие: наружный диаметр $d = 56$ 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; длина трубы $l_n = 330$ мм (теплоотдающая длина $l = 300$ мм), коэффициент оребрения трубы $\phi = 19,26$. Материал ребристой оболочки – алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы – углеродистая сталь. Диаметр несущей трубы $d_n = 25$ мм, толщина стенки $\delta = 2$ мм. Внутри несущей трубы соосно с помощью центровочного кольца вставлялся изготовленный на ОАО «Минский завод тэнов» стальной теплоэлектронагреватель (ТЭН) диаметром $d_{ТЭН} = 12,5$ мм и с максимальной мощностью 320 Вт. Для устранения внутренних конвективных токов воздуха и равномерного прогрева трубы между ТЭНом и стенкой засыпался кварцевый песок дисперсным составом 0,16–0,32 мм. Для снижения торцевых потерь на концах труб однорядного пучка применялся теплоизолирующий короб с минеральной ватой [2].

Для изменения высоты оребрения труб в однорядном пучке их ребра стачивались с помощью шлифования (соблюдался относительный поперечный шаг $\sigma_1 = 1,140$) до:

- 1) высоты ребра $h = 12$ мм, соответственно наружный диаметр труб составил $d = 50,8$ мм, а коэффициент оребрения $\phi = 15,08$;
- 2) $h = 8$ мм; $d = 42,8$ мм – $\phi = 9,43$;
- 3) $h = 4,1$ мм; $d = 35$ мм – $\phi = 4,84$.

Свободно-конвективная теплоотдача изучалась методом полного теплового моделирования. Центральная труба ряда являлась калориметром, на ней устанавливались необходимые датчики для измерения средней температуры у основания ребра трубы для вычисления приведенного коэффициента теплоотдачи. Схема экспериментальной установки, аппаратурное оснащение ее измерительными приборами, методика и порядок проведения опытов изложены в [2, 3].

Во время экспериментального исследования однорядного пучка электрическая мощность, подводимая к трубе, изменялась в пределах $W = 6–230$ Вт, средняя температура стенки у основания ребер составляла $t_{ст} = 30–250$ °С, а температура окружающего воздуха в камере $t_0 = 16–27$ °С. 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 круглоребристой трубы α_k , Вт/(м²·К). При его определении учитывалась лучистая составляющая и составляющая потеря. Вся расчетная методика подробно представлена в [2, 4]. Результаты эксперимента представлялись в числах подобия Рэлея и Нуссельта ($Nu = f(Ra)$).

Результаты экспериментальных исследований однорядного пучка с относительным шагом $\sigma_1 = 1,140$ при различных углах наклона γ к горизонтальной плоскости для каждой из исследуемых высот ребра h круглорезбистых труб представлены на рис. 1 и на рис. 2.

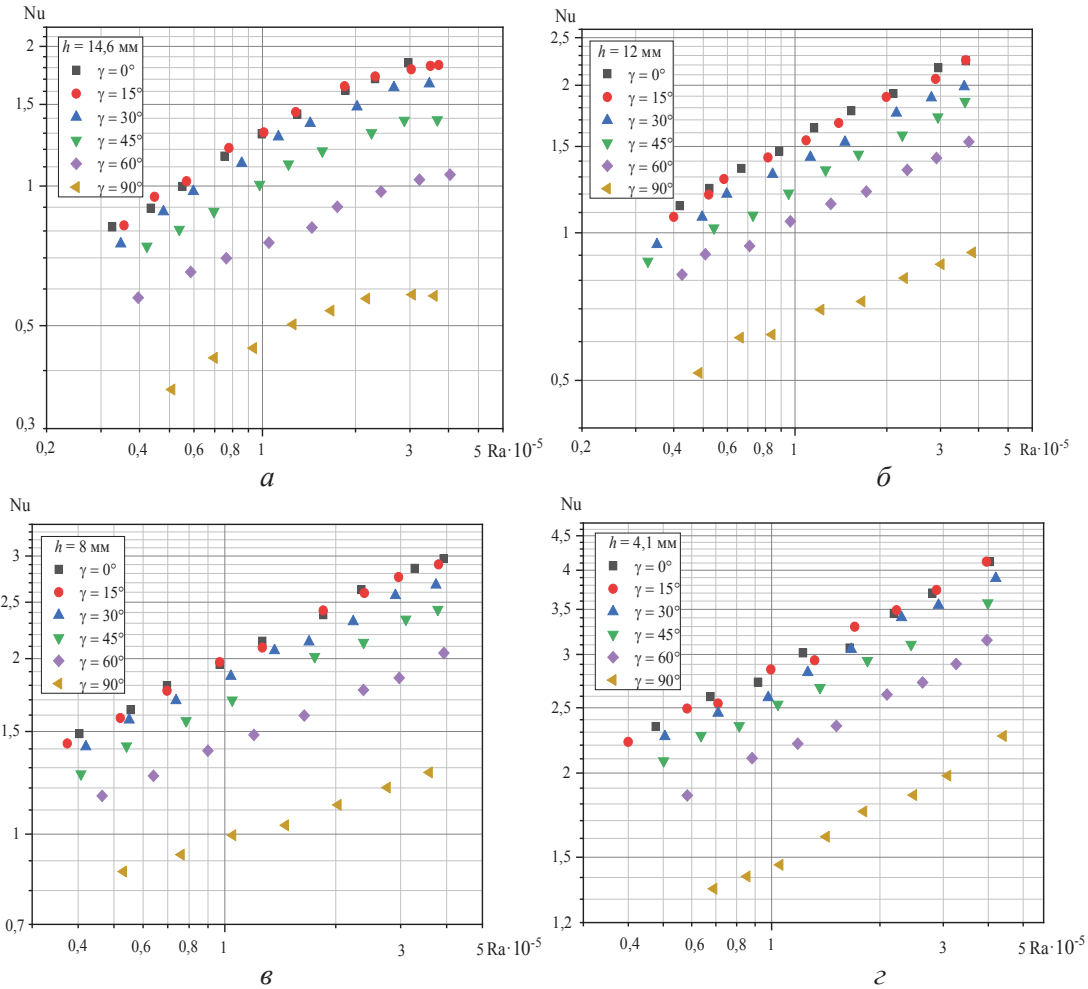


Рис. 1. Свободно-конвективная теплоотдача однорядного пучка из круглорезбистых труб с $\sigma_1 = 1,140$ при различных углах наклона γ к горизонтальной плоскости при следующих высотах ребра труб: а – $h = 14,6$ мм; б – 12; в – 8; з – 4,1

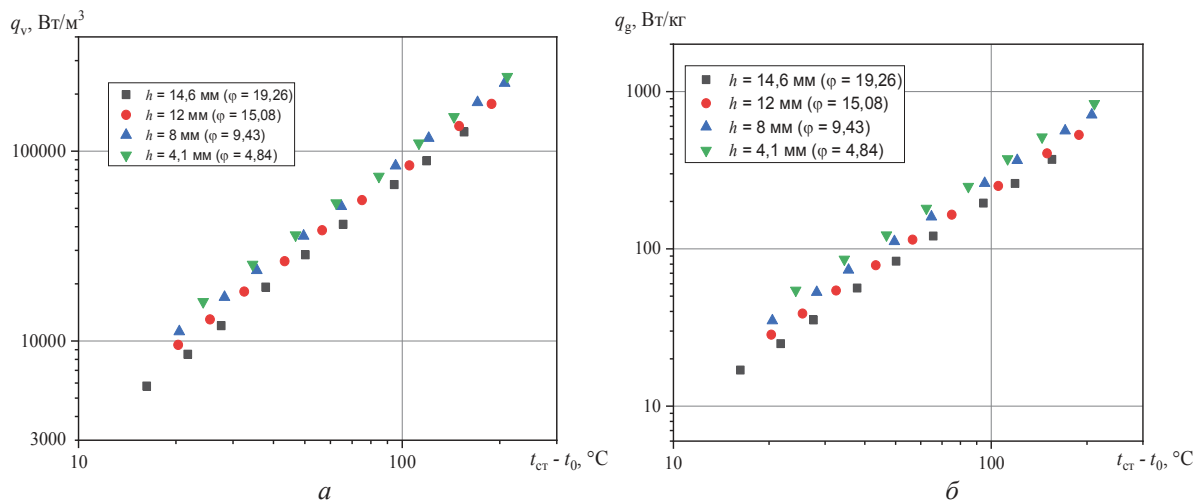


Рис. 2. Графическая зависимость объемной плотности теплового потока (а) и массовой плотности теплового потока (б) от разности средней температуры стенки трубы и температуры окружающего воздуха

Видно, что характер снижения теплоотдачи однорядного пучка при различных высотах оребрения труб от $0\text{--}15^\circ$ до 60° один, а для 90° – другой. 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 ($\pm 1,0\text{--}1,5\%$). 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 пространстве.

Сравнение по тепловой эффективности горизонтального однорядного пучка из кругло-ребристых труб с различной высотой оребрения производилось с помощью зависимости показателя объемной плотности теплового потока от движущей силы при свободной конвекции, разности средней температуры стенки трубы и температуры окружающего воздуха ($q_v = f(t_{ст} - t_0)$) [5].

Объемная плотность теплового потока при различных высотах трубы однорядного пучка в режиме свободной конвекции определялась по формуле, Вт/м³,

$$q_v = \frac{Q_k}{V_r} m. \quad (1)$$

Для однорядного пучка габаритный объем (объем параллелепипеда), м³: $V_r = S_{осн}H = lmS_1d$, где $S_{осн}$ – площадь основания параллелепипеда (площадь прямоугольника, образующегося длиной одной трубы l , м и m , шт. поперечных шагов труб $S_1 = d\sigma_1$, м), м²; H – высота параллелепипеда, м, равная наружному диаметру трубы d , м.

Оценка рационального использования алюминия, из которого изготавливается оребрение для кругло-ребристых труб с различной высотой оребрения, производилась с помощью зависимости показателя массовой плотности теплового потока от разности средней температуры стенки трубы и температуры окружающего воздуха ($q_g = f(t_{ст} - t_0)$).

Массовая плотность теплового потока по алюминию при различных высотах трубы однорядного пучка в режиме свободной конвекции определялась по формуле, Вт/кг,

$$q_g = \frac{Q_k}{G} m. \quad (2)$$

Результаты оценки по тепловой эффективности и рациональному использованию алюминия в однорядном пучке представлены на рис. 2.

Из анализа рис. 2 следует, что наиболее энергетически выгодной и экономически целесообразной по использованию алюминиевого оребрения является высота ребра кругло-ребристой трубы $h = 4,1$ мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (проект T19PM-076).

Обозначения

Q_k – конвективный тепловой поток, отведенный с трубы, Вт; V_r – габаритный объем, занимаемый однорядным пучком, м³; m – число труб в пучке, шт; G – масса алюминия, кг.

Литература

1. Кунтыш В. Б., Сухоцкий А. Б., Самородов А. В. Инженерный метод теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободно-конвективного теплообмена // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2013. № 12. С. 3–6.
2. Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С. Исследование свободноконвективного теплообмена оребренной трубы и однородного пучка при различных углах наклона труб к горизон-

тальной плоскости // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2019. № 2 (222). С. 272–279.

3. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков // Тр. БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2018. № 1 (204). С. 85–93.

4. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Интенсификация свободной конвекции в однорядном оребренном пучке в аппаратах воздушного охлаждения // Тр. БГТУ. Сер. 2. Хим. технол., биотехнол., геоэколог. 2017. № 1. С.68–74.

5. Hahne E., Zhu D. Natural convection heat transfer on finned tubes in air // Int. J. Mass Transfer. 1994. Vol. 37. Suppl. 1. P. 59–63.

УДК 621.565.93/95 (043.3)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ОДНОРЯДНОГО ПУЧКА ИЗ КРУГЛОРЕБРИСТЫХ ТРУБ С РАЗЛИЧНОЙ ВЫСОТОЙ ОРЕБРЕНИЯ

А. Б. Сухоцкий¹, Е. С. Данильчик²

¹Белорусский государственный технологический университет, г. Минск

*²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск
katya.156.156@gmail.com*

Теплообменники воздушного охлаждения (ТВО) нашли широкое распространение в промышленности. В основном это химическая, нефтехимическая, газовая, целлюлозно-бумажная промышленность, системы воздушного отопления, компрессорные станции с трубопроводами, тепловые и атомные электростанции и т.д. Главное преимущество ТВО – это использование широко доступного теплоносителя (атмосферного воздуха).

В настоящее время ТВО в основном применяются в режиме вынужденной конвекции, который позволяет значительно увеличить коэффициент теплопередачи и тем самым снизить габариты теплообменника. Но эксплуатация таких ТВО требует значительного потребления энергии на привод вентиляторов. Одним из технических решений по энергосбережению при эксплуатации ТВО является частичное или полное отключение вентиляторов (безвентиляторный режим) – перевод работы ТВО в режим свободной конвекции.

К сожалению, область температур окружающего воздуха, при которых возможно применение воздухоохлаждаемых теплообменников в условиях свободной конвекции, ограничена. Но при оснащении их дополнительными устройствами, позволяющими интенсифицировать свободную конвекцию, теплопроизводительность теплообменника может оставаться стабильной при более высоких температурах окружающего воздуха без потребления электроэнергии приводом вентилятора. Одним из таких устройств является вытяжная шахта, установленная над воздухоохлаждаемым теплообменником для усиления тяги воздуха. При этом данный режим конвективного теплообмена будет являться смешанным, когда вынужденный и свободно-конвективный теплообмен играют равнозначную роль.

В данной работе были проведены экспериментальные исследования однорядного пучка из шести круглоребристых труб с поперечным шагом $S_1 = 64$ мм (относительным поперечным шагом $\sigma_1 = S_1 / d = 1,140$) с различной высотой оребрения труб. Геометрические разме-