

УДК 536.24:66.045

А. Б. Сухоцкий, Е. С. Данильчик, Г. С. Маршалова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСТАНДАРТНОЙ КОМПОНОВКИ МНОГОРЯДНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПУЧКА ИЗ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

Ввиду широкого применения в технике теплообменников из биметаллических ребристых труб для режима естественной конвекции появилась необходимость учета лучистой составляющей, которая может иметь существенную долю в суммарном тепловом потоке и зависит от геометрических параметров пучка и характеристик изучаемой поверхности. В статье предлагается повысить тепловую мощность многорядного оребренного пучка за счет применения нестандартной компоновки, расположив верхний ряд труб над вытяжной шахтой, а остальные ряды — под шахтой.

По результатам экспериментальных исследований и сравнительного анализа теплопередачи излучением и конвекцией многорядного теплообменного пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой с различной компоновкой получено, что нестандартная компоновка оребренных труб многорядного теплообменного пучка позволяет увеличить тепловой поток излучением в 1.4–1.5 раза. При этом общая теплоотдача пучка при использовании нестандартной компоновки возрастает примерно на 5%. Показано, что оптимизацию компоновки многорядного теплообменного пучка целесообразно проводить, когда доля лучистого потока в общем тепловом потоке составляет более 10%.

Ключевые слова: оребренная труба, вытяжная шахта, зональный метод расчета лучистого теплового потока, естественная конвекция воздуха.

Введение. Теплообменные пучки, состоящие из оребренных биметаллических труб, применяются в секциях аппаратов воздушного охлаждения жидкостей и конденсации паров, испарителях холодильных камер, электрических и водяных калориферах для нагрева вентиляционного воздуха в системах воздушного отопления и при утилизации тепла низко- и среднетемпературных вторичных энергетических ресурсов. При эксплуатации теплообменника в режиме естественной конвекции заметная часть теплоты отводится излучением, что может составлять существенную долю в суммарном тепловом потоке и зависит от геометрических параметров пучка и характеристик изучаемой поверхности [1, 2]. Система уравнений, описывающая всю совокупность первичных процессов, из которых складывается радиационный теплообмен ребристых пучков, сложна в математическом отношении, поэтому расчеты лучистого теплообмена проводятся обычно исходя из ряда упрощающих предпосылок с вынужденным искажением реальной физической картины.

Расчет теплового потока излучением зональным методом. В инженерной практике для расчета теплообмена излучением многорядных оребренных пучков при свободной конвекции используют зональный метод [3] с выделением в пучке двух зон (рис. 1, а): зона 2 — наружные половины труб крайних поперечных рядов; зона 3 — остальная часть пучка. Зоной 1 считается окружающая среда, состоящая из двух плоскостей, ограничивающих пучок.

Формула расчета зональным методом теплового потока излучением применительно к пучку оребренных труб записывается следующим образом:

$$Q_{\text{л}} = c_0 F \varepsilon_{\text{эф}} \varphi_{\text{T-0}} \frac{\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1)}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{\text{ст}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{\text{к}}}{100} \right)^4 \right], \quad (1)$$

Белорусский государственный технологический университет. 220050, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; э-почта: alk2905@mail.ru. Поступила 23.04.2020.

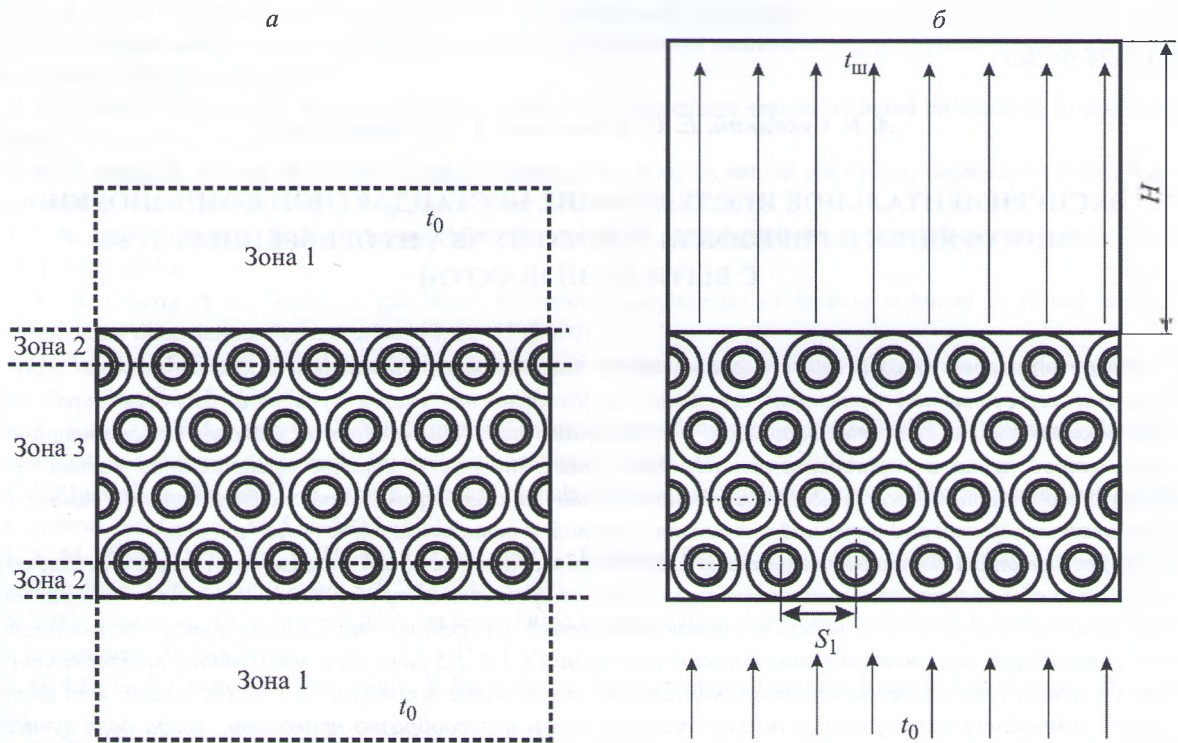


Рис. 1. Схема к расчету излучения пучка без шахты (а) и с шахтой (б)

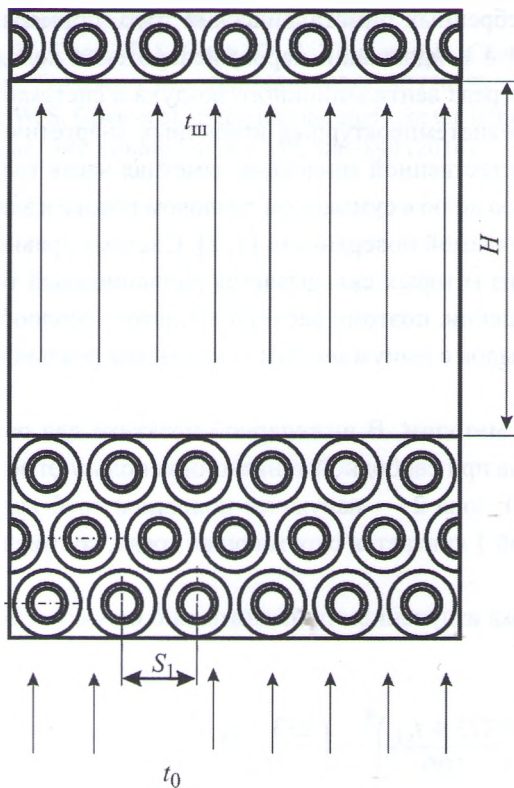


Рис. 2. Схема четырехрядного пучка с нестандартной компоновкой

где коэффициент излучения абсолютно черного тела $c_0 = 5.67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$. Окружающая среда считалась абсолютно черным телом, поскольку площадь поверхности камеры намного превышала взаимную поверхность лучистого теплообмена пучка. Формулы для расчета угловых коэффициентов [1] не учитывают влияние продольного шага S_2 труб в пучке, поскольку в соответствии с [4] это влияние пренебрежимо мало и угловые коэффициенты от трубного пучка к среде практически всецело зависят от поперечного шага S_1 . На угловые коэффициенты также мало влияет и тип компоновки труб в пучке — коридорная или шахматная. Достоверность данной методики расчета подтверждена экспериментально в работах [5–7]. В четырехрядных пучках с коэффициентом орбрения труб 16.8 тепловое излучение может составлять до 25% в суммарном тепловом потоке [4]. При этом основное излучение (80–90%) осуществляется наружными половинами труб крайних поперечных рядов (рис. 2).

К сожалению, область температур окружающего воздуха, при которых возможно применение орбренных пучков 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, не потребляющим электроэнергию, является вытяжная шахта, установленная над оребренным пучком для усиления тяги воздуха [8–11].

При установке над пучком вытяжной шахты (рис. 1, б) верхняя зона 1 становится зоной вытяжной шахты с температурой стенок $t_{ш}$. Принимая в первом приближении шахту как абсолютно черное тело, получим формулу для расчета теплового потока излучением пучка ребристых труб с шахтой:

$$Q_{л} = Q_{л}^0 + Q_{л}^{ш}, \quad (2)$$

$$Q_{л}^0 = (0.5 + \gamma)c_0\varepsilon_{эф}F\varphi_{т-о} \frac{\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1)}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{к}}{100} \right)^4 \right], \quad (3)$$

$$Q_{л}^{ш} = (0.5 - \gamma)c_0\varepsilon_{эф}F\varphi_{т-о} \frac{\Phi_{1-3} + \Phi_{2-3}(z-1)}{z} \left[\left(\frac{273 + t_{ст}}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + t_{ш}}{100} \right)^4 \right], \quad (4)$$

где γ — коэффициент излучения в отверстие шахты ($0 \leq \gamma \leq 0.5$), $\gamma = 0.5S_{отв}/(S_{ш} + S_{отв})$; $S_{отв}$, $S_{ш}$ — площади отверстия и внутренних стенок шахты, m^2 . Из формулы (4) видно, что при установке шахты над пучком интенсивность излучения пучка снижается (особенно для верхнего ряда), поскольку $t_{ш} > t_{к}$.

При составлении теплового баланса следует учитывать, что верхний лучистый поток, нагрев стенки шахты, передаст теплоту воздуху в ней, а нижний лучистый поток рассеется в окружающую среду:

$$Q_{к} + Q_{л}^{ш} = c_p \rho V(t_{ш} - t_0), \quad (5)$$

где средняя изобарная теплоемкость c_p и плотность воздуха ρ определяются при температуре $0.5(t_0 + t_{ш})$. Повысить тепловую мощность пучка можно за счет применения нестандартной компоновки — установки верхнего ряда труб над вытяжной шахтой, обеспечив тем самым излучение наружных половинок его труб в окружающую среду (рис. 3). Но при этом, вероятно, понизится температура в шахте, что приведет к снижению гравитационной тяги потока воздуха и, следовательно, уменьшению конвективной теплоотдачи пучка.

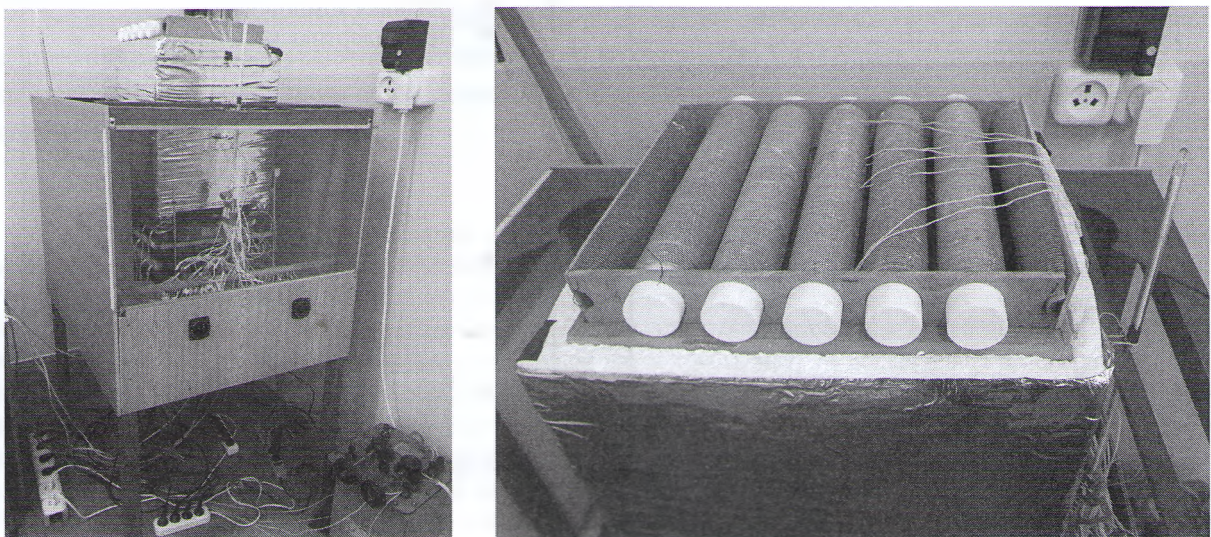


Рис. 3. Экспериментальная установка с нестандартной комповкой пучка

Экспериментальное исследование. Целью работы является экспериментальное исследование теплопередачи излучением и конвекцией многорядного теплообменного пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой с нестандартной компоновкой, заключающейся в размещении верхнего ряда пучка над шахтой, а остальных рядов — под шахтой. В качестве экспериментального образца был выбран четырехрядный шахматный пучок с равносторонней компоновкой (межтрубный шаг $S_1 = 70$ мм), собранный из оребренных труб со следующими параметрами: диаметр винтового оребрения $d = 0.0568$ м; диаметр трубы по основанию $d_0 = 0.0264$ м; высота, шаг, средняя толщина ребра, соответственно, $h = 0.0152$ м, $s = 0.00243$ м, $\Delta = 0.00055$ м; теплоотдающая длина оребрения трубы $l = 0.3$ м; общая длина оребренной трубы $l_1 = 0.33$ м. Коэффициент оребрения трубы составил $\phi = 21$. Материал ребристой оболочки — алюминевый сплав АД1М, материал несущей трубы — сталь. Теплоизолированная вытяжная шахта высотой $H = 0.52$ м имела внутреннее прямоугольное сечение 0.3×0.42 м, равное габаритному размеру пучка.

Схема экспериментальной установки, аппаратное оснащение ее измерительными приборами, методика и порядок проведения опытов изложены в [12, 13]. Для возможности сравнительного анализа обычной и нестандартной компоновки теплообменного пучка экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом этапе четырехрядный пучок устанавливался под шахтой (рис. 1, а), а для создания идентичных условий аэродинамического сопротивления на шахту устанавливалась крышка с отверстием, равным сжато по поперечному сечению пучка:

$$f_{сж} = \ln S_1 \left[1 - \left(d_0 + \frac{2h\Delta}{s} \right) / S_1 \right], \quad (6)$$

где число труб в одном ряду пучка равно $n = 6$ шт. На втором этапе применялась нестандартная компоновка пучка — три ряда устанавливались под шахтой, а один ряд — над шахтой (рис. 2).

Тепловой поток, отведенный от пучка к воздуху конвекцией, рассчитывается из уравнения

$$Q_k = W - Q_l - Q_{\text{п}}. \quad (7)$$

По результатам экспериментальных исследований вычислялись средние приведенные коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением, отнесенные к полной наружной поверхности труб:

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_{ст} - t_0)F}, \quad \alpha_l = \frac{Q_l}{(t_{ст} - t_0)F}, \quad (8)$$

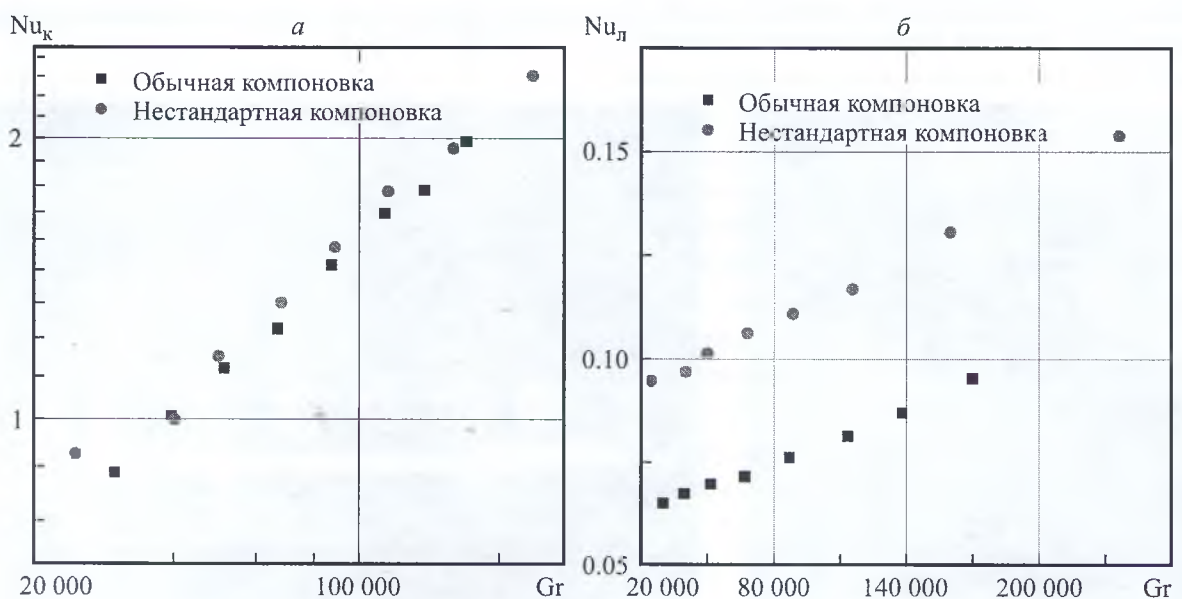


Рис. 4. Зависимость конвективного (а) и лучистого (б) чисел Нуссельта от числа Грасгофа для разных типов компоновок четырехрядного пучка

где площадь теплоотдающей оребренной поверхности труб равна $F = n\pi d_0 l$.

Экспериментальные данные обрабатывали и представляли в безразмерном виде — в числах Нуссельта $Nu_k = \alpha_k d_0 / \lambda$, $Nu_l = \alpha_l d_0 / \lambda$ и Грасгофа $Gr = \beta g d_0^3 (t_{ст} - t_0) / \nu^2$, где $\beta = 1 / (t_0 + 273)$, $1/^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплопроводности λ и кинематической вязкости ν принимали по температурам окружающей среды $t_0 = 16\text{--}25^\circ\text{C}$. Во время экспериментального исследования оребренного пучка средняя температура стенки у основания ребер составляла $t_{ст} = 34\text{--}180^\circ\text{C}$.

На рис. 4 представлены экспериментальные зависимости конвективного и лучистого чисел Нуссельта от числа Грасгофа для обычной и нестандартной компоновок четырехрядного пучка. Как видно из рисунка, если конвективный теплообмен практически идентичен для обычной и нестандартной компоновки, то лучистый теплообмен для нестандартной компоновки интенсивнее в 1.4–1.5 раза. При этом лучистый поток составляет от общего теплового потока 4–7% для обычной компоновки и 6–10% для нестандартной компоновки.

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости общего числа Нуссельта $Nu = Nu_k + Nu_l$ от числа Грасгофа для обычной и нестандартной компоновок четырехрядного пучка.

В результате обобщения экспериментальных данных с отклонением, не превышающим 3%, получено уравнение

$$Nu = C Gr^{0.45}, \quad (9)$$

где коэффициент пропорциональности $C = 0.00913$ для обычной компоновки и $C = 0.00964$ — для нетрадиционной компоновки.

Таким образом, экспериментально получено увеличение общей теплоотдачи при нестандартной компоновке пучка примерно на 5%.

Заключение. Оптимальное (нестандартное) размещение оребренных труб многорядного теплообменного пучка позволяет увеличить тепловой поток излучением в 1.4–1.5 раза. Оптимизацию компоновки многорядного теплообменного пучка целесообразно проводить, когда доля лучистого потока в общем тепловом потоке составляет более 10%.

Обозначения

c_0 — коэффициент излучения абсолютно черного тела, $c_0 = 5.67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; c_p — средняя изобарная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; d — наружный диаметр оребрения трубы, м; d_0 — диаметр оребрения по основанию, м; F — площадь теплоотдающей оребренной поверхности пучка, м^2 ; $f_{сж}$ — сжатое поперечное сечение пучка, м^2 ; Gr — число Грасгофа; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; H — высота вытяжной шахты, м; h — высота ребер трубы, м; l — длина теплоотдающей оребренной части трубы, м; l_1 — общая длина оребренной трубы, м; Nu — число Нуссельта; n — число обогреваемых труб в первом ряду пучка, шт.; $Q_{п}$ — тепловые потери через торцы труб и токоподводы, Вт; Q_k, Q_l — конвективный и лучистый тепловые потоки, Вт; S_1 — поперечный шаг установки труб в пучке, мм; s — шаг ребер трубы, м; t — определяющая температура воздуха на входе в пучок, $^\circ\text{C}$; t_k — температура поверхности камеры, пола и потолка вокруг пучка, $^\circ\text{C}$; $t_{ст}$ — температура стенки у основания ребер, $^\circ\text{C}$; $t_{ш}$ — температура стенок вытяжной шахты, $^\circ\text{C}$; t_0 — температура окружающего воздуха в камере, $^\circ\text{C}$; V — расход воздуха в пучке, $\text{м}^3/\text{с}$; W — тепловая мощность, подводимая к пучку, Вт; z — количество рядов в пучке, шт.; α_k, α_l — средние приведенные конвективный и лучистый коэффициенты теплоотдачи,

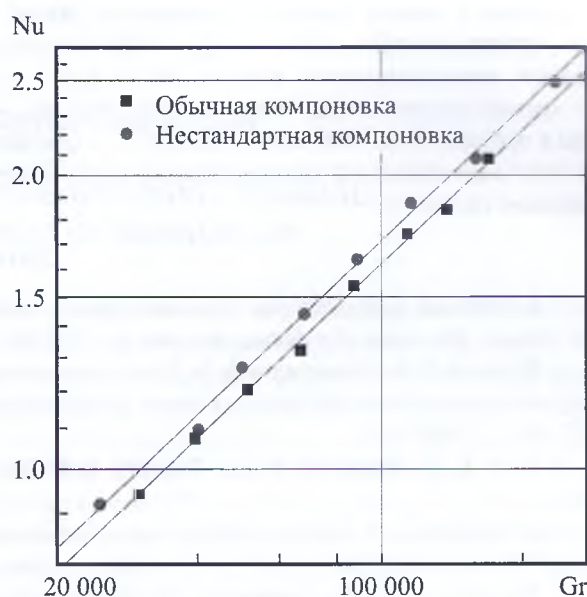


Рис. 5. Зависимость общего числа Нуссельта от числа Грасгофа для разных типов компоновок четырехрядного пучка

отнесенные к полной наружной поверхности, Вт/(м²·К); β — коэффициент температурного расширения, К⁻¹; Δ — средняя толщина ребра, м; ε_{эф} — эффективная степень черноты системы тел "пучок-среда"; λ — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К); ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с; ρ — средняя плотность воздуха в пучке, кг/м³; Φ₁₃, Φ₂₃ — разрешающие угловые коэффициенты излучения от первой зоны к третьей и от второй зоны к третьей; φ — коэффициент оребрения трубы; φ_{т-о} — средний угловой коэффициент излучения одиночной круглоребристой трубы к окружающей среде, учитывающий геометрические параметры оребрения трубы.

Литература

1. Самородов А. В. Методика теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции воздуха. *Изв. вузов. Проблемы энергетики*. 2002. № 1–2. С. 20–30.
2. Кунтыш В. Б., Самородов А. В. Исследование влияния угла наклона круглоребристых труб на свободно-конвективный теплообмен шахматного пучка в неограниченном объеме воздуха. *Инженерно-физический журнал*. 2010. Т. 83, № 2. С. 338–344.
3. Блох А. Г., Журавлев Ю. А., Рыжков А. Г. *Теплообмен излучением: справочник*. Москва: Энергоатомиздат, 1991.
4. Самородов А. В. *Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками*. Дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 1999.
5. Новожилова А. В., Марьина З. Г. Обобщенная зависимость для теплоотдачи горизонтальных пучков оребренных труб при свободной конвекции воздуха. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2016. № 10. С. 13–16.
6. Позднякова А. В. *Совершенствование характеристик и разработка методики расчета промежуточных калориферов лесосушильных камер*. Дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2003.
7. Волков А. В. *Повышение эффективности сушки длительносохнущих пиломатериалов в камерах периодического действия*. Дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2003.
8. Мильман О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой. *Теплоэнергетика*. 2005. № 5. С. 16–19.
9. Kumar A. 3D CFD simulations of air cooled condenser-II: Natural draft around a single finned tube kept in a small chimney. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. No. 92. Pp. 507–522.
10. Маршалова Г. С. *Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой*. Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2019.
11. Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком. *Инженерно-физический журнал*. 2010. Т. 9, № 3. С. 619–625.
12. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха и выбор формы представления результатов. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Энергетика*. Минск: БГТУ, 2017. Т. 60, № 4. С. 352–366; <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-4-352-366>.
13. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков. *Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. Минск: БГТУ, 2018. № 1. С. 85–93.