

УДК 621.565.93/.95-0.46.54

A. B. Сухоцкий¹, E. C. Данильчик¹, Г. С. Маршалова^{1,2}, Д. В. Островская¹

ВЛИЯНИЕ КОМПОНОВОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШАХМАТНОГО ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ПУЧКА ТРУБ СО СПИРАЛЬНЫМИ РЕБРАМИ НА СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН

Использование воздухоохлаждаемых теплообменников в режиме свободной конвекции представляет собой эффективное и экономически целесообразное решение для многих приложений, способствующее упрощению конструкции теплообменного устройства, уменьшению потребления электроэнергии, снижению шумовых воздействий. При этом отличительной особенностью режима свободной конвекции являются невысокие значения коэффициентов теплоотдачи, для компенсации которых применяется увеличение поверхности теплообмена со стороны воздуха путем оребрения труб. С целью повышения эффективности процессов теплоотдачи целесообразно проводить оптимизацию геометрических параметров и компоновки пучка, числа рядов.

Представлены результаты экспериментального исследования теплоотдачи к воздуху в условиях свободной конвекции горизонтальных одно-, двух- и четырехрядных шахматных пучков равносторонней компоновки из оребренных труб теплообменников охлаждения. Коэффициент оребрения труб $\varphi = 21$, межтрубные шаги — 90 и 120 мм.

Полученные результаты и разработанные рекомендации позволяют осуществлять тепловые и конструкторские расчеты по проектированию энергосберегающих теплообменников из оребренных труб.

Ключевые слова: воздухоохлаждаемый пучок ребристых труб, свободно-конвективный теплообмен, оптимальный межтрубный шаг.

Введение. Шахматные пучки из круглых труб с накатными на них спиральными алюминиевыми ребрами широко применяются в теплообменниках воздушного охлаждения жидких и газообразных теплоносителей, технологических продуктов химической промышленности [1], для конденсации водяного пара. При низких температурах наружного воздуха практикуется эксплуатация теплообменников с отключенным приводом вентиляторов и отводом теплоты в режиме свободной конвекции, что существенно сокращает электропотребление. Однако достоверные количественные расчеты величины отводимой теплоты в этом режиме эксплуатации крайне затруднены вследствие отсутствия данных по свободно-конвективному теплообмену [1–3] пучков с компоновочными характеристиками и геометрическими параметрами ребер и труб, применяемых в теплообменниках воздушного охлаждения. Это объясняется сложностью процессов теплообмена при свободной конвекции [4, 5], особенно на ребристых поверхностях, где присутствует со-пряженный теплообмен, и по этой причине становится невозможным применение теоретических методов описания и расчета ввиду их громоздкости, неточности, сложности и в некоторых случаях неосуществимости [6].

Проведенные исследования [7–10] показали, что в пучках труб с увеличением межтрубного поперечного шага теплоотдача сначала растет, достигает максимального значения (при соприкосновении обтекающих трубу пограничных потоков воздуха), а затем уменьшается. В работе [7] проведены исследования на горизонтальных шахматных пучках ребристых труб с равносторонней компоновкой при числе рядов $z = 2–4$, $S_1 = S'_2 = 0.058–0.1$ м ($\sigma_1 = \sigma'_2 = 1.04–1.8$) и $S_2 = 0.052–0.0866$ м ($\sigma_2 = 0.90–1.56$); при $z = 5$, $S_1 = S'_2 = 0.064$ м ($\sigma_1 = \sigma'_2 = 1.15$), $\gamma = 0–60^\circ$ в режиме свободной конвекции в диапазоне числа $Ra = (0.3–4.0) \cdot 10^5$. По результатам исследований получена обобщающая экспериментальная формула с погрешностью

¹Белорусский государственный технологический университет. 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; e-пошта: alk2905@mail.ru; ²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; e-пошта: galiana.sidorik@gmail.com. Поступила 10.01.2025.

10–15% для пучков биметаллических оребренных труб с параметрами $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 0.0556 \times 0.0265 \times 0.01455 \times 0.00291 \times 0.00075 \times 0.3$ м (материал ребристой оболочки — алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы — латунь Л68). Диаметр оребрения по основанию равен $d_0 = d - 2h$. Коэффициент оребрения трубы $\phi = 16.8$.

Обнаружено, что средняя теплоотдача многорядных горизонтальных пучков интенсивно повышается в диапазоне поперечного шага $\sigma_1 = 1.04–1.15$, поскольку существенно увеличивается относительная площадь проходного сечения пучка и скорость потока воздуха возрастает. При $\sigma_1 = 1.15–1.37$ темп роста замедляется, а в интервале $\sigma_1 = 1.37–1.8$ средняя теплоотдача практически не зависит от поперечного шага труб.

Далее, в работе [8] представлена методика расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции и получено обобщающее уравнение, позволяющее рассчитывать значения среднего приведенного коэффициента теплоотдачи шахматных пучков с равносторонней компоновкой оребренных труб с $\phi = 16.8$ и действительно для $z = 2–4$, $S_1 = S'_2 = 0.058–0.078$ м ($\sigma_1 = \sigma'_2 = 1.04–1.4$), а также для $z = 5$ и 6, если $S_1 = S'_2 = 0.064$ м ($\sigma_1 = \sigma'_2 = 1.15$); $\gamma = 0–60^\circ$; диапазон числа Грасгофа (Grashof) — $Gr = (0.35–1.1) \cdot 10^5$. Обнаружено, что для пучков с $z = 2–5$ средний коэффициент теплоотдачи уменьшается с добавлением новых рядов труб, что объясняется воздействием температуры потока воздуха, нагретого в нижележащих рядах. При этом для более свободной компоновки и для большего числа рядов сильнее проявляется эффект разгона воздуха из-за возрастающей подъемной силы (эффект "вытяжной трубы") вследствие меньшего аэродинамического сопротивления пучка. При этом за счет подъемной силы для четырехрядных пучков в интервале шагов $0.076 < S_1 < 0.1$ м ($1.37 < \sigma_1 < 1.8$) теплоотдача продолжает возрастать и становится выше, чем для двух- и трехрядных пучков.

В работах [9, 10] изучена теплоотдача горизонтальных шахматных пучков труб с числом рядов $z = 2–3$ и продольными $S_1 = S'_2 = 0.072–0.15$ м и поперечными $S_2 = 0.0624–0.1299$ м шагами ($\sigma_1 = \sigma'_2 = 1.027–2.14$, $\sigma_2 = 0.89–1.853$) в режиме свободной конвекции. Экспериментальные исследования свободно-конвективного теплообмена проводились на биметаллических оребренных трубах с параметрами $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta \times l = 0.070 \times 0.041 \times 0.0147 \times 0.003 \times 0.0007 \times 0.4$ м, $\phi = 14.5$ (материал ребристой оболочки — алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы — сталь). В результате исследований была получена обобщающая формула с погрешностью 18%, действительная для $z = 2–3$ с $\sigma_1 = \sigma'_2 = 1.027–2.14$, $\sigma_2 = 0.89–1.853$ в диапазоне чисел Релея (Rayleigh) $Ra = (0.7–12) \cdot 10^5$. Автором установлено, что быстрый рост теплоотдачи происходит в интервале $S_1 = 0.072–0.1$ м ($\sigma_1 = 1.084–1.427$), а при дальнейшем увеличении относительного шага до $S_1 = 0.15$ м ($\sigma_1 = 2.14$) — для двухрядного пучка она резко снижается, а для трехрядного — достигает максимума при $S_1 = 0.12$ м ($\sigma_1 = 1.712$), а затем медленно снижается. Теплоотдача трехрядных пучков при $\sigma_1 > 1.3$ выше теплоотдачи двухрядных пучков.

Экспериментальное исследование. Целью статьи является экспериментальное определение оптимального межтрубного шага горизонтальных двух- и четырехрядных шахматных пучков равносторонней компоновки из труб со спиральными ребрами (коэффициент оребрения $\phi = 21$) в условиях свободной конвекции к воздуху.

Данная работа является продолжением экспериментальных исследований теплоотдачи горизонтальных шахматных пучков равносторонней компоновки в режиме свободной конвекции [11, 12], где пучки собирались с числом рядов $z = 1, 2, 4$ при $S_1 = 58, 61, 64$ и 70 мм (относительный шаг $\sigma_1 = S_1/d = 1.021; 1.09; 1.13; 1.23$). Геометрические параметры биметаллических оребренных труб следующие: $d \times h \times s \times \Delta \times d_0 \times l = 0.0568 \times 0.0152 \times 0.00243 \times 0.00055 \times 0.0264 \times 0.3$ м, $\phi = 21$ (материал ребристой оболочки — алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы — сталь).

Результаты экспериментальных исследований теплоотдачи в различных тепловых режимах обрабатывались и представлялись в виде зависимостей числа Нуссельта от чисел Релея:

$$Nu = \frac{\alpha_{con} d_0}{\lambda}, \quad (1)$$

$$Ra = \frac{g \beta d_0^3 (t_w - t_0)}{\nu a}, \quad (2)$$

где коэффициент температурного расширения равен $\beta = 1/(273 + t_0)$.

Во время экспериментального исследования средняя температура стенки у основания ребер составляла $t_w = 34\text{--}180^\circ\text{C}$. Относительная погрешность экспериментальных значений чисел подобия Нуссельта (Nusselt) Nu и Релея Ra составила 3.2 и 4.3% соответственно.

В результате обобщения экспериментальных данных с отклонением, не превышающим 5%, получены уравнения

$$\text{Nu} = A \text{Ra}^n (1 - \exp(-B/\text{Ra})) , \quad (3)$$

где A, B, n — коэффициенты пропорциональности и степенной. Уравнение (3) действительно в интервале изменения $\text{Ra} = 37\,500\text{--}350\,000$.

Получено, что при увеличении шага труб экспериментальных пучков интенсивность теплоотдачи растет, достигая максимума для однорядного пучка при межтрубных шагах 61–64 мм ($\sigma_1 = 1.09\text{--}1.13$). Для многорядных пучков максимальная интенсивность теплоотдачи достигается при наибольшем шаге $S_1 = 70$ мм ($\sigma_1 = 1.23$), значение которой больше теплоотдачи двухрядного пучка с шагом $S_1 = 58$ мм в 1.7 раза (четырехрядного — в 2.2 раза), а с шагом $S_1 = 64$ мм — в 1.2 раза (четырехрядного — в 1.4 раза), что обусловлено увеличением шага труб и уменьшением аэродинамического сопротивления пучков.

В данной статье на том же измерительном оборудовании и по той же методике, которая описана в работе [13], проведены экспериментальные исследования шахматных горизонтальных пучков из аналогичных биметаллических труб ($\phi = 21$) с поперечными шагами $S_1 = 90$ и 120 мм. Результаты экспериментальных исследований представлены на рис. 1 в виде зависимостей $\text{Nu} = f(\text{Ra})$, которые были аппроксимированы уравнением с отклонением, не превышающим 5%:

$$\text{Nu} = A \text{Ra}^n . \quad (4)$$

Коэффициенты пропорциональности и степенные в уравнениях (3) и (4) приведены в обобщающей таблице (табл. 1) для одиночной трубы, однорядных, двухрядных и четырехрядных пучков с различными межтрубными шагами по результатам экспериментальных исследований работ [11, 12] и данной статьи (рис. 1).

Для сравнительного анализа влияния поперечного шага установки труб на рис. 2 показана зависимость $\text{Nu} = f(S_1)$ при $\text{Ra} = 50\,000$ и $150\,000$ для однорядного, двухрядного и четырехрядного пучков. Пунктирной линией показано значение числа Нуссельта для одиночной оребренной трубы [11].

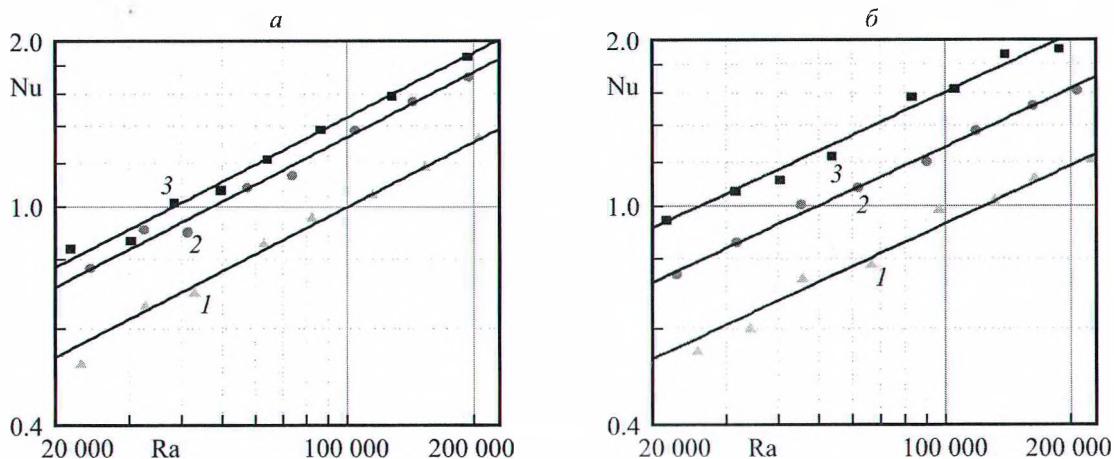


Рис. 1. Теплоотдача в режиме свободной конвекции воздуха однорядного (1), двухрядного (2) и четырехрядных (3) шахматных горизонтальных пучков с поперечными шагами $S_1 = 90$ мм (а) и $S_1 = 120$ мм (б) установки оребренных труб

Таблица 1. Коэффициенты пропорциональности и степенные в уравнениях (3) и (4)

| S_1 , мм | A | n | $B \cdot 10^{-5}$ |
|---------------------|--------|------|-------------------|
| Одиночная труба | | | |
| — | 0.0195 | 0.3 | — |
| Однорядные пучки | | | |
| 58 | 0.0042 | 0.48 | 6.0 |
| 61 | 0.0068 | 0.45 | 6.0 |
| 64 | 0.0077 | 0.44 | 6.0 |
| 70 | 0.0078 | 0.43 | 6.0 |
| 90 | 0.0112 | 0.39 | — |
| 120 | 0.0165 | 0.35 | — |
| Двухрядные пучки | | | |
| 58 | 0.003 | 0.48 | 4.7 |
| 64 | 0.0072 | 0.44 | 6.0 |
| 70 | 0.0091 | 0.43 | 6.0 |
| 90 | 0.0150 | 0.39 | — |
| 120 | 0.0227 | 0.35 | — |
| Четырехрядные пучки | | | |
| 58 | 0.0019 | 0.48 | 4.0 |
| 64 | 0.0046 | 0.44 | 4.4 |
| 70 | 0.0074 | 0.43 | 5.0 |
| 90 | 0.0163 | 0.39 | — |
| 120 | 0.0285 | 0.35 | — |

Как видно из рис. 2, при малых межтрубных шагах ($S_1 = 58$ – 64 мм) число Нуссельта четырехрядного пучка ниже, чем у одиночной трубы и других пучков из-за его высокого аэродинамического сопротивления. При увеличении межтрубного шага интенсивность теплоотдачи растет и достигает максимума при $S_1 \approx 62$ – 63 мм (более чем в 1.6 раза по сравнению с одиночной трубой) для однорядного пучка и при $S_1 \approx 83$ – 88 мм (более чем в 1.8 раза по сравнению с одиночной трубой) для двухрядного пучка.

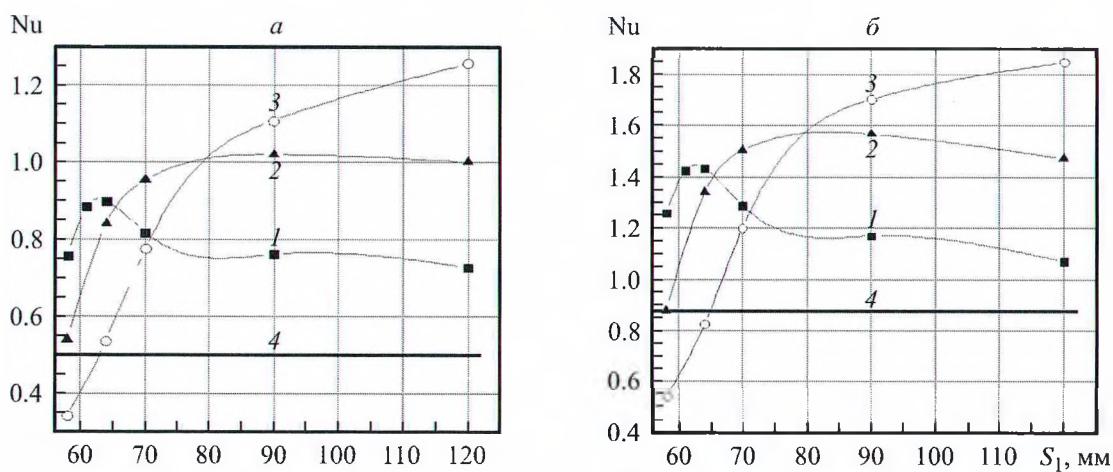


Рис. 2. Зависимости теплоотдачи однорядного (1), двухрядного (2) и четырехрядного (3) горизонтальных оребренных пучков от поперечного шага установки труб в режиме свободной конвекции воздуха при $\text{Ra} = 50\,000$ (а) и $\text{Ra} = 150\,000$ (б); 4 — одиночная труба

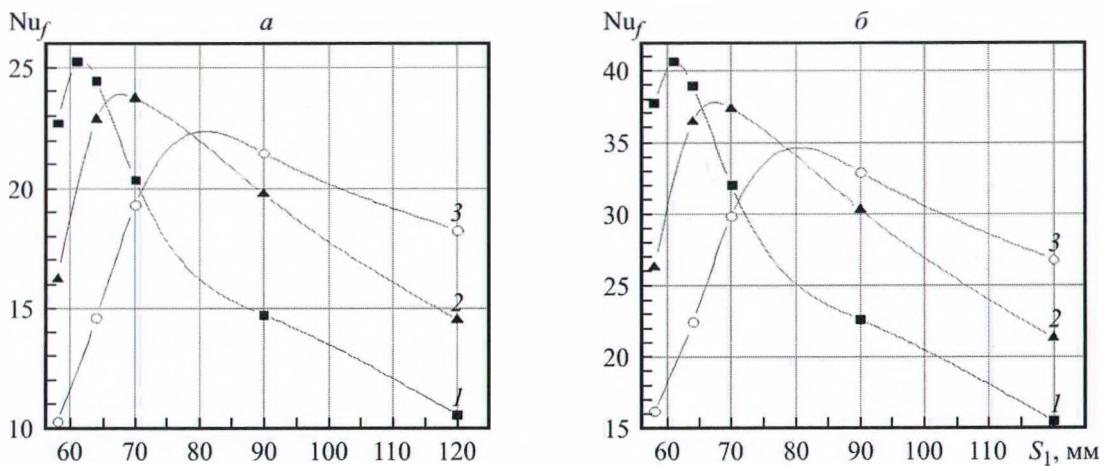


Рис. 3. Зависимости интенсивности теплоотдачи к фронтальной площади однорядного (1), двухрядного (2) и четырехрядного (3) горизонтальных оребренных пучков от поперечного шага установки труб в режиме свободной конвекции воздуха при $Ra = 50\,000$ (а) и $Ra = 150\,000$ (б)

Это обусловлено как ростом подъемной силы в пучке (эффект "вытяжной трубы"), так и турбулизацией потока воздуха первыми рядами. При дальнейшем увеличении межтрубных шагов теплоотдающие характеристики труб пучков снижаются и стремятся к характеристикам одиночной трубы. В пределах исследований межтрубных шагов максимум интенсивности теплоотдачи для четырехрядных пучков не достигнут.

Следует отметить, что представленные результаты коррелируются с полученными рекомендациями для пучков из других типов труб [7–10]. Обобщая данные, можно сделать вывод, что для равносторонних шахматных пучков из биметаллических оребренных труб с плотным оребрением $s = 2.5\text{--}3.0$ мм, коэффициентом оребрения $\phi = 14.5\text{--}21.0$ и диаметром оребрения $d = 55\text{--}70$ мм оптимальным поперечным относительным межтрубным шагом является $\sigma_1 = S_1/d = 1.09\text{--}1.13$ для однорядных и $\sigma_1 = 1.36\text{--}1.55$ для двухрядных пучков.

Как правило, доступное пространство для размещения теплообменных аппаратов ограничено, а обеспечение компактности теплообменников является актуальной задачей. Поэтому в статье проведена оценка оптимального межтрубного шага с учетом площади, занимаемой пучком, на основе безразмерного параметра теплоотдачи к фронтальной площади пучка:

$$Nu_f = NuF/f_{fr}, \quad (5)$$

где теплоотдающая площадь поверхности одного ряда пучка равна $F = \pi d_0 l \phi n$; фронтальное сечение пучка $f_{fr} = n l S_1$.

На рис. 3 представлены зависимости $Nu_f = f(S_1)$ при $Ra = 50\,000$ и $150\,000$ для однорядного, двухрядного и четырехрядного пучков соответственно. Как видно из рис. 3, интенсивность теплоотдачи к фронтальной площади достигает максимума при $S_1 \approx 62$ мм для однорядного пучка, $S_1 \approx 67$ мм для двухрядного пучка и $S_1 \approx 81$ мм для четырехрядного пучка. При этом самым компактным по теплоотдаче является однорядный пучок с оптимальным шагом.

Заключение. В условиях свободной конвекции увеличение межтрубного шага способствует росту конвективной теплоотдачи пучка до определенного предела. Оптимальным межтрубным шагом для однорядного пучка из труб с коэффициентом оребрения $\phi = 21.0$ является $S_1 \approx 62\text{--}63$ мм, для двухрядного — около $S_1 \approx 83\text{--}88$ мм, четырехрядного — более 120 мм. Однако интенсивность теплоотдачи к фронтальной площади достигает максимума при $S_1 \approx 62$ мм для однорядного пучка, $S_1 \approx 67$ мм для двухрядного пучка и $S_1 \approx 81$ мм для четырехрядного пучка. При этом самым компактным по теплоотдаче является однорядный пучок с оптимальным шагом.

Для равносторонних шахматных пучков из биметаллических оребренных труб с плотным оребрением $s = 2.5\text{--}3.0$ мм, коэффициентом оребрения $\varphi = 14.5\text{--}21.0$ и диаметром оребрения $d = 55\text{--}70$ мм оптимальным поперечным относительным межтрубным шагом является $\sigma_1 = S_1/d = 1.09\text{--}1.13$ для однорядных и $\sigma_1 = 1.36\text{--}1.55$ — для двухрядных пучков.

Работа выполнена в рамках проекта Государственной программы научных исследований "Энергетические и ядерные процессы и технологии" подпрограммы "Энергетические процессы и технологии" (задание 2.37, ГБ21-104), а также при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № Т23РНФМ-005).

Обозначения

a — коэффициент температуропроводности воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; d — наружный диаметр оребрения трубы, мм; d_0 — диаметр оребрения по основанию, мм; F — теплоотдающая площадь поверхности одного ряда пучка, м^2 ; f_{fr} — площадь фронтального сечения пучка, м^2 ; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; h — высота ребер трубы, мм; l — длина оребренной части трубы, мм; Nu — конвективное число Нуссельта; Nu_f — безразмерная теплоотдача к фронтальной площади пучка; n — количество труб в поперечном ряду пучка, шт; Ra — число Релея; S_1 — поперечный шаг установки труб в пучке, мм; s — шаг ребер трубы, мм; t_w — температура стенки у основания ребер, $^\circ\text{C}$; t_0 — температура окружающего воздуха в камере, $^\circ\text{C}$; α_{con} — средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; β — коэффициент температурного расширения, K^{-1} ; Δ — средняя толщина ребра, мм; λ — коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; φ — коэффициент оребрения трубы.

Литература

1. Бессонный А. Н., Дрейцер Г. А., Кунтыш В. Б. и др. *Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник*. Под общ. ред. В. Б. Кунтыша, А. Н. Бессоного. Санкт-Петербург: Недра, 1996.
2. Мартыненко О. Г., Соковишин Ю. А. *Свободно-конвективный теплообмен: справочник*. Минск: Наука и техника, 1982.
3. 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.
4. Маршалова Г. С., Сухоцкий А. Б., Кунтыш В. Б. Свободно-конвективный теплообмен на круглоребристых трубах и пучках из них. *Инженерно-физический журнал*. 2023. Т. 96, № 4. С. 470–487.
5. Jaluria Y. *Natural Convection: Heat and Mass Transfer*. Oxford, New York: Pergamon Press, 1980.
6. Гусев С. Е., Шкловер Г. Г. *Свободно-конвективный теплообмен при внешнем обтекании тел*. Москва: Энергоатомиздат, 1992.
7. Самородов А. В. *Совершенствование методики теплового расчета и проектирования аппаратов воздушного охлаждения с шахматными оребренными пучками*. Дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14. Архангельск, 1999.
8. Самородов А. В., Теляев Р. Ф., Кунтыш В. Б. Методика теплового расчета аппарата воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции воздуха. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2002. № 1. С. 20–30.
9. Волков А. В., Самородов А. В., Кунтыш В. Б. Свободноконвективный теплообмен малорядных шахматных пучков из оребренных труб для вязких теплоносителей. *Мат. конф. 3-я Российская национальная конференция по теплообмену. 21–25 октября 2002*. Москва, 2002. С. 41–44.
10. Волков А. В. *Повышение эффективности сушки длительносохнущих пищевых материалов в камерах периодического действия*. Дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05. Архангельск, 2003.
11. Маршалова Г. С. *Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой*. Автореферат дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Минск, 2019.
12. Данильчик Е. С. *Повышение эффективности теплообменников воздушного охлаждения при свободно-конвективном теплообмене*. Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Минск, 2022.
13. Сидорик Г. С. Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков. *Труды БГТУ. Серия 1. Лесное хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов*. 2018. № 1. С. 85–93.