

УДК 532.517

*А. Г. Абрамов¹, Е. С. Данильчик², М. А. Засимова¹, Г. С. Маршалова^{2,3},
А. А. Пожилов¹, Е. М. Смирнов¹, А. Б. Сухоцкий³*

**ВЛИЯНИЕ ВЫТЯЖНОЙ ШАХТЫ С РАЗДЕЛИТЕЛЬНЫМИ ПЕРЕГОРОДКАМИ
НА ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕРМОГРАВИТАЦИОННОМ ТЕЧЕНИИ ВОЗДУХА
ЧЕРЕЗ ДВУХРЯДНЫЙ ПУЧОК ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ**

Представлены результаты исследования влияния вытяжной шахты на локальный и интегральный теплообмен при термогравитационном течении воздуха через двухрядный пучок горизонтальных оребренных труб. Эксперименты по измерению интегральной теплоотдачи были выполнены для двух конфигураций с фиксированными геометрическими параметрами пучка: с размещением над пучком вытяжной шахты высотой, на порядок превышающей диаметр ребер, и без вытяжной шахты. Трехмерное численное моделирование проведено на основе решения нестационарных уравнений Навье–Стокса, в предположении периодичности течения с шагом установки ребер. Получены согласованные данные расчетов и экспериментов по значениям интегрального числа Нуссельта, показывающие, что установка вытяжной шахты влечет за собой увеличение числа Нуссельта до пяти раз. По результатам численного моделирования выполнен анализ структуры течения в межреберном пространстве и локальных характеристик теплоотдачи.

Ключевые слова: термогравитационное течение воздуха, оребренные трубы, двухрядный трубный пучок, вытяжная шахта, теплообмен.

Введение. Аппараты и теплообменники воздушного охлаждения (ТВО) разнообразных конструкций, функционального назначения и энергетической эффективности применяются во многих отраслях промышленности и в быту [1–3]. Расширение практического использования теплоотводящих устройств данного типа обосновывается их экологичностью, широким диапазоном рабочих температур, повсеместной и неограниченной доступностью охлаждающей среды, а также проблемами с коррозией и очисткой, которые возникают при использовании в качестве хладагента воды.

Основным конструктивным элементом ТВО является теплообменная секция в виде трубного пучка, который может иметь разную пространственную ориентацию и компоноваться с образованием одного, а чаще нескольких рядов труб с шахматным или коридорным расположением. Повышение эффективности ТВО достигается при многократном увеличении площади наружной поверхности труб путем нанесения внешнего оребрения.

Обтекание трубного пучка может происходить в условиях вынужденной, свободной или смешанной конвекции. Наиболее распространены ТВО, эксплуатируемые при вынужденно-конвективном режиме, который обеспечивает наилучшие характеристики теплоотдачи. Вместе с тем при работе ТВО в условиях свободной конвекции не требуется применять специальные меры для поддержания и регулирования потока охладителя вентиляторами, что способствует энергосбережению и уменьшению шумового воздействия на окружающую среду. Тепловая мощность ТВО с естественно-конвективным теплоотводом может быть повышена установкой над трубным пучком вытяжной шахты.

На протяжении долгого времени при проведении исследований, формирующих основы расчета и проектирования ТВО, использовались преимущественно инженерные подходы, базирующиеся на накопленном обширном эмпирическом материале по теплоаэродинамическим характеристикам труб и пучков [1, 2].

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29; э-почта: zasimova_ma@spbstu.ru; ²УО "Белорусский государственный технологический университет". Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; ³Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15. Поступила 06.11.2024.

Применительно к проблеме расчета ТВО, работающих в условиях свободной конвекции, основной задачей являлась формулировка аналитических или полуэмпирических выражений для оценки среднего коэффициента теплоотдачи (или числа Нуссельта (Nusselt) Nu) в зависимости от числа Релея (Rayleigh) Ra (или Грасгофа (Grashof) Gr), геометрических параметров трубных конфигураций и оребрения. В последние десятилетия получили развитие экспериментальные методики, а также приближающиеся к ним по достоверности и обладающие повышенной информативностью результатов методы численного моделирования.

Аналитические работы, эксперименты и обобщения имеющихся данных по обозначенной проблеме систематически проводятся, начиная с середины прошлого века, в большей мере для одиночных оребренных труб (например, [4–6]). На основе измерений предложены обобщенные критериальные уравнения для нахождения среднего числа Нуссельта в зависимости от геометрических параметров и числа Релея. В качестве геометрических параметров в соотношении включаются диаметры несущей трубы и ребер, расстояние между ребрами (или шаг), а также формируемые из них безразмерные комплексы [7].

Ряд экспериментальных исследований был посвящен пучкам, состоящим из промышленных оребренных труб и находящихся в относительно свободном пространстве [8–11]. В экспериментах в приближенных к практике условиях изучалось влияние на теплоотдачу перепада температуры между поверхностью труб и окружающим воздухом, продольных и поперечных расстояний между трубами, числа трубных рядов и расположения ряда, угла наклона труб, коэффициента оребрения.

Влияние вытяжной шахты на теплообмен при термогравитационном течении воздуха через одно- и многорядные пучки оребренных труб со спиральными ребрами экспериментально изучалось в работах [12–14]. Трубы имели коэффициент оребрения 21, диаметр труб и ребер составлял 26 и 56 мм, шаг ребра 2.43 мм. В частности, в работе [12] объектом изучения был двухрядный пучок с равносторонней компоновкой труб. Было установлено, что теплоотдача при установке над пучком вытяжной шахты в несколько раз превышает измеренную теплоотдачу при отсутствии шахты. Показана эффективность установки в вытяжной шахте вертикальных перегородок; предложены экспериментальные зависимости Nu от Gr для каждого ряда труб при организации течения через пучок с вытяжной шахтой и без нее. В работах [13, 14] рассматриваются вопросы повышения эффективности ТВО путем оптимизации высоты ребер и поперечного шага труб в пучках с разным числом рядов и коэффициентом оребрения. Приводятся экспериментальные данные по влиянию на теплоотдачу геометрических параметров оребрения, расстояния между трубами, числа рядов, угла наклона труб, высоты и формы выходного сечения вытяжной шахты.

В работе [15] представлены результаты экспериментов для многорядных шахматных пучков плоскоканальных труб с различной формой оребрения, размещенных в высокой (6.5 м) вытяжной трубе. Размеры большой и малой осей труб составляли 30 и 15 мм, ребра имели высоту 17 мм и устанавливались с шагом 5 мм. Продольный и поперечный шаги труб составляли 68 и 53 мм. Показано, что двухрядная конфигурация обеспечивает более высокую тепловую мощность в сравнении с трехрядной, с доминированием склада нижнего ряда. Предложена корреляционная зависимость для Nu как функции от чисел Релея Ra и Прандтля (Prandtl) Pr , учитывающая также влияние конструкции пучка и номера ряда.

Методы вычислительной гидродинамики стали применяться к задачам термогравитационного течения воздуха в пучках оребренных труб относительно недавно. Расчеты проводились преимущественно для случая одиночных оребренных труб и в стационарной постановке [16–18]. Численное моделирование выполнялось с применением коммерческих кодов (ANSYS Fluent/CFX), а также открытого пакета OpenFOAM с использованием схем пространственной дискретизации второго порядка при типичном размере расчетных сеток 0.5–2 млн ячеек. В расчетах варьировались значения режимных критериев подобия и геометрических параметров труб и ребер. Акцент делался на возможную последующую оптимизацию конструктивных решений и условий эксплуатации для улучшения теплоотводящих свойств с учетом перепада температур, диаметра труб и ребер и расстояния между ребрами.

Число опубликованных работ, посвященных численному моделированию течения и теплообмена через трубные пучки с вытяжной шахтой, крайне мало. В работах [19, 20] представлены результаты трехмерного моделирования для многорядных пучков, расположенных в нижней части шахты и сконструированных

из труб с разной формой поперечных ребер (круглых и овальных). Стационарные расчеты с учетом предположенной возможности перехода в шахте к турбулентному режиму движения воздуха проводились на основе метода RANS- (Reynolds Averaged Navier–Stokes) и SST- (Shear Stress Transport) модели турбулентности на сетках, содержащих около 4 млн элементов; использовался пакет ANSYS CFX. Варьировались разность температур, количество рядов и расстояние между трубами, а также высота шахты. Расчеты для случая овальных ребер [19] показали, в частности, что увеличение высоты шахты от 2 до 16 м приводит к росту Nu более чем на 30%. Была также определена оптимальная высота шахты (11 м): при дальнейшем увеличении высоты ее влияние на характеристики теплоотдачи становится несущественным.

Таким образом, объем данных, характеризующих влияние вытяжной шахты на тепловые процессы в пучках горизонтальных оребренных труб, весьма ограничен. Вместе с тем актуальность и практическая значимость исследований по рассматриваемой проблеме проистекает из необходимости интенсификации теплообмена в условиях термогравитационной конвекции при ощутимом повышении тепловой мощности ТВО такого класса.

В настоящей работе представляются результаты экспериментального и численного исследования влияния вытяжной шахты на течение и теплообмен в двухрядном пучке с относительно тесным поперечным кольцевым оребрением. Рассмотрены две конфигурации — без шахты и с шахтой, которая по высоте в девять раз превосходит диаметр оребрения и содержит внутренние вертикальные (разделительные) перегородки. Проводится сопоставление чисел Нуссельта (в зависимости от числа Грасгофа), полученных в настоящих расчетах при решении трехмерных уравнений Навье–Стокса (Navier–Stokes) и в экспериментах [12]. По результатам численного моделирования выполняется анализ структуры течения в межреберном пространстве и локальных характеристик теплоотдачи.

Геометрические характеристики экспериментальных конфигураций. Рассматриваются течение и теплообмен в горизонтальном пучке, состоящем из двух рядов оребренных труб (индекс j — номер ряда, $j = 1, 2$), которые расположены в шахматном порядке (рис. 1, a). Геометрические параметры пучка

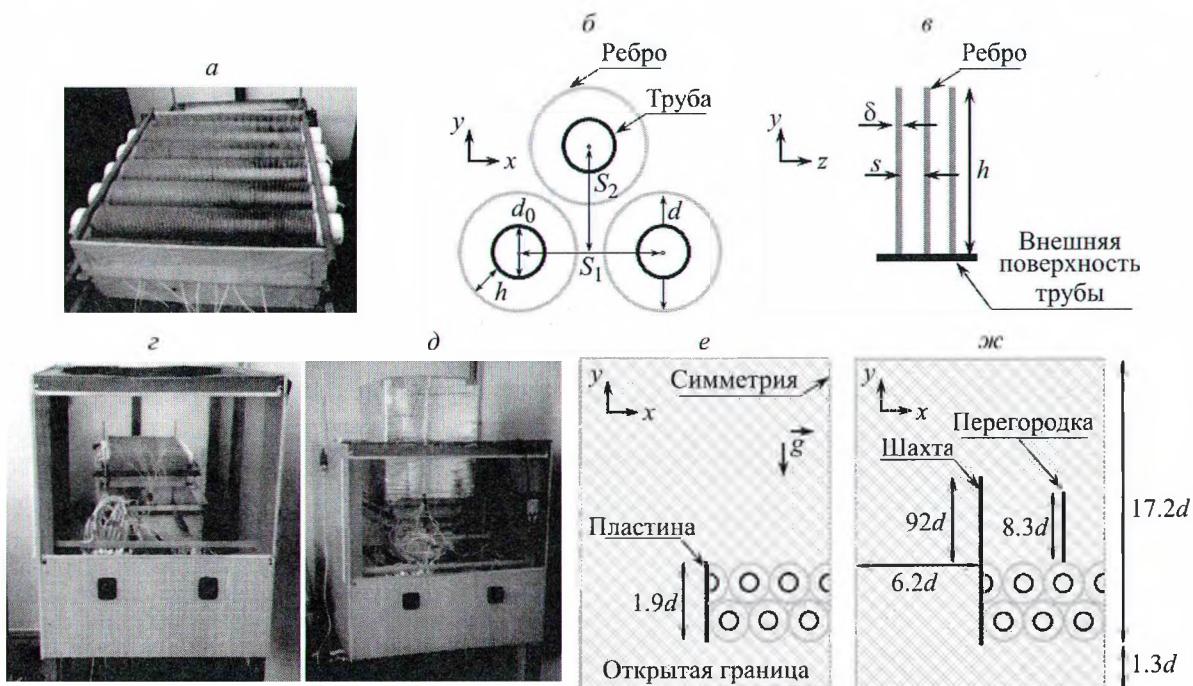


Рис. 1. Общий вид двухрядного пучка труб (a); геометрические характеристики пучка ($b, \text{ж}$); фотографии экспериментальной установки для проведения измерений без шахты (c) и с шахтой (d); схемы расчетных областей для моделирования конвекции в конфигурациях без шахты (e) и с шахтой (ж)

Для выполнения расчетов использовался пакет ANSYS Fluent 2019 R3. Расчеты на неструктурированных сетках с гексаэдralьными элементами проводились со вторым порядком точности по пространству и времени; для аппроксимации конвективных потоков использовалась противопоточная схема второго порядка. Расчетные сетки включали около 350 тыс. ячеек, достаточность размерности данной сетки была установлена в результате исследования сеточной чувствительности решения. Шаг по времени принимался равным 0.02 с, что составляет около 0.1 характерных времен, оцениваемых по скорости плавучести $V_b = (g\epsilon_T d_0)^{0.5}$, где параметр плавучести равен $\epsilon_T = \Delta T/T_0$. Продолжительность выборок, соответствующих статистически установленвшемуся режиму течения, составляла около 200 с, что для всех вариантов превышало 1000 характерных времен.

Результаты расчетов и обсуждение. Приводимые ниже результаты относятся к осредненным по времени параметрам течения и характеристикам теплообмена.

Структура течения, рассчитанная для двух конфигураций при задании в обоих случаях перепада температур $T_1 - T_0 = 60^\circ\text{C}$, иллюстрируется на рис. 2. В сечении, проходящем через срединное сечение межреберного пространства, показаны линии тока, поля модуля безразмерной скорости, отнесенной к скорости плавучести $V_b = 0.27 \text{ м/с}$, а также поля обезразмеренной температуры $T^* = (T - T_0)/(T_2 - T_0)$. Значения числа Грасгофа для этих вариантов близки к $2 \cdot 10^5$, при этом перепад температур $T_2 - T_0$ составляет 102°C в случае без шахты и 107°C для варианта с шахтой.

Видно, что под действием сил плавучести воздух протекает через межтрубное и межреберное пространство пучка, формируя восходящее подъемное течение. Локальные максимумы скорости наблюдаются в зазорах между трубами, при этом в межреберном пространстве значения скорости существенно ниже (в 2 и более раз).

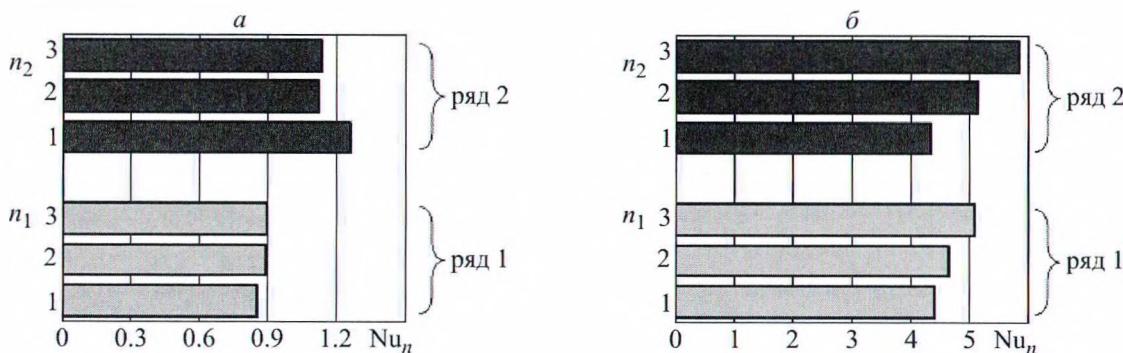


Рис. 4. Интегральные значения числа Нуссельта, вычисленные для каждой из труб при $\text{Gr} = 2 \cdot 10^5$: вариант без шахты (a) и с шахтой (б)

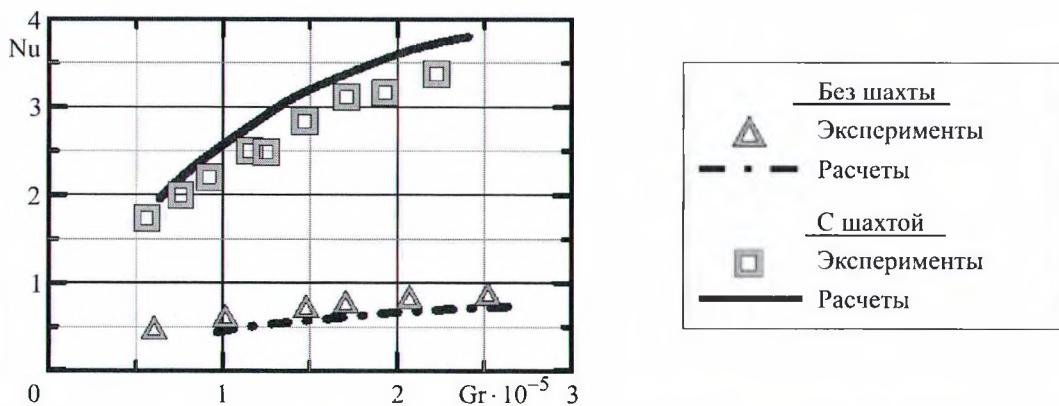


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные зависимости среднего по трубам $n_{1,2} = 3$ числа Нуссельта от числа Грасгофа

В случае варианта без шахты над пучком формируется тепловой факел, сконцентрированный у плоскости симметрии пучка. Среднерасходная скорость на входе в пучок V_{in} составляет около $0.092V_b$, при этом максимальные значения скорости в пучке не превышают V_b . Число Рейнольдса (Reynolds), оцениваемое по формуле $Re = V_{in}d_0/v$, составляет 41. При наличии шахты течение через пучок существенно интенсивнее, как и ожидалось в области над пучком, менее сконцентрировано — у плоскости симметрии. В этом случае среднерасходная скорость на входе в пучок $V_{in} = 0.47V_b$, а число Рейнольдса $Re = 210$. Максимальные значения скорости в пучке существенно превышают V_b .

Анализ расчетных данных для варианта без шахты показывает, что изменение температуры вдоль оси трубы (поперек межреберного пространства) пренебрежимо мало. Температура воздуха в межреберном пространстве близка к температуре основания несущей трубы (отличие не более 0.5°C в нижней части ребра). Изменение температуры в пучке прослеживается лишь в межтрубных зазорах. В варианте с шахтой в нижней области ребер второго ряда труб участок с существенным отличием температуры воздуха в межреберном пространстве от температуры стенки занимает около половины высоты ребра. При этом температура на поверхности ребра в месте натекания отличается на 3.4°C от температуры несущей трубы.

На рис. 3 приведены распределения значений локального числа Нуссельта $Nu_{loc} = q_{w,loc}d_0/\lambda(T_s - T_{ref})$ по поверхности ребер, рассчитанные при $Gr = 2 \cdot 10^5$ для двух вариантов задачи. Коэффициент теплопроводности рассчитывался по температуре окружающей среды (принималось значение $\lambda = 0.0261 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$). В качестве характерной температуры T_{ref} воздушного потока, набегающего на трубы первого ряда, принималось значение температуры окружающей среды T_0 , а для второго ряда — среднемассовая температура потока в зазоре между рядами труб, которая оценивалась из балансового соотношения по формуле $T_{ref} = Q_1/(C_pG) + T_0$, где Q_1 — общий теплосъем с первого ряда пучка, G — расход, проходящий через пучок.

Анализ приведенных на рис. 3 данных позволяет заключить, что в случае без шахты эффективность использования ребер очень низкая: теплосъем в основном осуществляется с периферии ребер. В случае с шахтой ситуация заметно улучшается, однако и в этом случае процент "работающей" поверхности ребер невысок, составляя 15–25% в зависимости от положения трубы.

На рис. 4 показаны интегральные значения числа Нуссельта Nu_n , рассчитанные при $Gr = 2 \cdot 10^5$ для каждой из обогреваемых труб. Эти значения вычислены по формуле $Nu_n = \langle q_{w,n} \rangle d_0/\lambda(T_j - T_{ref})$, $j = 1, 2$, где $\langle q_{w,n} \rangle$ — осредненный по поверхности труб тепловой поток. Видно, что наибольшее изменение Nu_n по второму ряду труб в случае варианта с шахтой составляет 25% (относительно значения для центральной трубы): для крайней трубы значение Nu_n ниже, чем для центральной. В противоположность этому в случае без шахты крайняя труба второго ряда работает несколько эффективнее (на 15%). В целом же установка шахты приводит к существенному увеличению осредненного по поверхности труб коэффициента теплоотдачи.

На рис. 5 для исследованного диапазона значений числа Грасгофа приведены результаты расчетов и экспериментов по определению числа Нуссельта, среднего по двум центральным трубам (служивших в эксперименте калориметрами, $n_{1,2} = 3$). Согласно [12], это число определялось как $Nu = q_w d_0 / \lambda(T_w - T_0)$, где, как и ранее, $T_w = 0.5(T_1 + T_2)$, а тепловой поток рассчитывается как $q_w = 0.5(\langle q_{w,1} \rangle_{j=1} + \langle q_{w,2} \rangle_{j=2})$. Из представленного сопоставления можно заключить, что в целом получена вполне удовлетворительная согласованность расчетных и экспериментальных данных: различия не превышают 15%. Можно видеть также, что в рассмотренном диапазоне изменения Gr установка вытяжной шахты с вертикальными перегородками позволила увеличить теплоотдачу двухрядного пучка до пяти раз.

Заключение. Получены новые данные о влиянии вытяжной шахты с внутренними вертикальными перегородками на локальный теплообмен и структуру термогравитационного течения, формирующегося при прохождении воздухом двухрядного пучка, состоящего из расположенных в шахматном порядке горизонтальных оребренных труб. Данные по интегральной теплоотдаче, полученные в экспериментах и расчетах с охватом диапазона чисел Грасгофа порядка 10^4 – 10^5 , находятся в хорошем согласии и указывают на существенную интенсификацию течения и теплообмена (до пяти раз) при установке вытяжной шахты, высота которой на порядок превосходит диаметр оребрения.

Показано, что для двухрядного пучка, собранного из небольшого числа труб в каждом ряду, средний коэффициент теплоотдачи с поверхности отдельных труб ряда может существенно отличаться. Так, для варианта без шахты теплоотдача от центральной трубы второго ряда исследованного пучка ниже, чем от крайней (боковой) на 15%, а в случае с шахтой, наоборот, выше на 25%. В случае без шахты эффективность использования ребер принятых размеров и шага установки очень низкая: теплосъем в основном осуществляется с периферии ребер. В случае с шахтой ситуация заметно улучшается, однако и в этом случае доля поверхности ребер, вносящая вклад в интенсификацию, невысока: при значениях числа Грасгофа порядка 10^5 она составляет лишь 15–25% в зависимости от положения трубы.

Исследование выполнено за счет средств гранта Российского научного фонда (№ 24-49-10003, <https://rscf.ru/project/24-49-10003/>) совместно с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (грант № Т23РНФМ-005). Расчеты проведены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра "Политехнический" Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<https://scc.spbstu.ru>).

Обозначения

C_p — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К); d — диаметр ребра, мм; d_0 — диаметр внешней поверхности несущей трубы, мм; F — площадь теплоотдающей поверхности трубы, м^2 ; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{s}^2$; G — расход, проходящий через пучок, кг/с; Gr — число Грасгофа; H — высота вытяжной шахты, мм; h — высота ребра, мм; L — длина оребренной трубы, м; N_j — число труб в ряду j ; Nu — число Нуссельта; Nu_{loc} — локальное число Нуссельта; Nu_n — интегральное число Нуссельта; n_j — номер трубы в ряду; Q — мощность, Вт; Q_j — общий теплосъем с ряда j , Вт; q_w — тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $q_{w,loc}$ — локальный тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $\langle q_{w,n} \rangle$ — осредненный по поверхности труб тепловой поток, $\text{Вт}/\text{м}^2$; Re — число Рейнольдса; $S_{1,2}$ — поперечный и продольный шаги труб, мм; s — шаг ребра, мм; T — осредненная по времени температура, $^\circ\text{C}$; T^* — безразмерная температура; T_s — локальная температура на поверхности ребра, $^\circ\text{C}$; T_{ref} — характерная температура, $^\circ\text{C}$; T_w — средняя температура, $^\circ\text{C}$; T_j — температура на внешней поверхности несущих труб, $^\circ\text{C}$; T_0 — температура окружающего воздуха, $^\circ\text{C}$; V — осредненная по времени величина скорости, $\text{м}/\text{с}$; V_b — скорость плавучести, $\text{м}/\text{с}$; V_{in} — среднерасходная скорость на входе в пучок, $\text{м}/\text{с}$; x, y, z — декартовы оси; α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; β — коэффициент теплового расширения, К^{-1} ; ΔT — перепад температуры, $^\circ\text{C}$; δ — средняя толщина ребра, мм; φ — коэффициент оребрения; ε_T — параметр плавучести; ν — кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$; $\sigma_{1,2}$ — относительный поперечный и продольный шаг труб; λ — коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Индексы: 0 — окружающая среда; b — плавучесть; j — номер ряда; loc — локальный, loss — потери через торцы труб; total — полный; rad — лучистый; ref — характерный.

Литература

1. Schlünder E. U. *Heat Exchanger Design Handbook*. London: Hemisphere Publishing, 1983.
2. Бессонный А. Н., Дрейцер Г. А., Кунтыш В. Б. и др. *Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник*. Санкт-Петербург: Недра, 1996.
3. Hewitt G. F. *Heat Exchanger Design Handbook*. Danbury, USA: Begell House, 2008.
4. Tsubouchi T., Masuda M. Natural convection heat transfer from horizontal cylinders with circular fins. *Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf.* 1970. Paper NC 1.10.
5. Kayansayan N. Thermal characteristics of fin-and-tube heat exchanger cooled by natural convection. *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1993. Vol. 7, Issue 3. Pp. 177–188.
6. Yildiz S., Yüncü H. An experimental investigation on performance of annular fins on a horizontal cylinder in free convection heat transfer. *Heat Mass Transf.* 2004. Vol. 40. Pp. 239–251.
7. 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. 1091–1105.
8. 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.
9. Novozhilova A. V., Maryna Z. G., Samorodov A. V., Lvov E. A. Research of heat transfer of staggered horizontal bundles of finned tubes at free air convection. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. Vol. 891. Article ID 012056.
10. Данильчик Е. С., Сухоцкий А. Б., Кунтыш В. Б. Экспериментальные исследования эффективности однорядного пучка из биметаллических оребренных труб с различной высотой оребрения при свободно-конвективном теплообмене с воздухом. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2020. Т. 22, № 5. С. 128–141.

11. **Данильчик Е. С., Маршалова Г. С., Сухоцкий А. Б.** Свободно-конвективный теплообмен на многорядных пучках оребренных труб с круглыми ребрами. *Инженерно-физический журнал*. 2024. Т. 97, № 3. С. 814–825.
12. **Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С.** Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над оребренным пучком. *Тепловые процессы в технике*. 2018. Т. 10, № 1–2. С. 62–70.
13. **Sukhotskii A. B., Marshalova G. S., Zditovetskaya S. V., Danil'chik E. S.** Study of free-convective heat exchange of air-coolable finned tube bundles intensified by exhaust shaft. *Chem. Pet. Eng.* 2021. Vol. 57. Pp. 280–287.
14. **Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С.** Экспериментальное исследование свободно-конвективного теплообмена однорядных пучков из труб со спиральными алюминиевыми ребрами разной высоты в потоке воздуха, интенсифицированного вытяжной шахтой. *Инженерно-физический журнал*. 2023. Т. 96, № 2. С. 383–391.
15. **Unger S., Beyer M., Pietruske H.**, et al. Natural convection heat transfer performance of additively manufactured tube bundle heat exchangers with novel fin design. *Heat Mass Transf.* 2021. Vol. 57. Pp. 1193–1203.
16. **Kumar A., Josh Y. B., Nayak A. K., Vijayan P. K.** 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. Vol. 92. Pp. 507–522.
17. **Senapati J. R., Dash S. K., Roy S.** Numerical investigation of natural convection heat transfer over annular finned horizontal cylinder. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. Vol. 96. Pp. 330–345.
18. **Wong S. C., Lee W. Y.** Numerical study on the natural convection from horizontal finned tubes with small and large fin temperature variations. *Int. J. Therm. Sci.* 2019. Vol. 138. Pp. 116–123.
19. **Unger S., Krepper E., Hampel U.** Numerical analysis of heat exchanger designs for passive spent fuel pool cooling to ambient air. *Nucl. Eng. Des.* 2018. Vol. 333. Pp. 224–234.
20. **Unger S., Krepper E., Beyer M., Hampel U.** Numerical optimization of a finned tube bundle heat exchanger arrangement for passive spent fuel pool cooling to ambient air. *Nucl. Eng. Des.* 2020. Vol. 361(2). Article ID 110549.