

УДК 536.25

*А. Б. Сухоцкий^{1,3}, Г. С. Маршалова^{1,2,3}, Е. С. Данильчик^{1,2,3}***ОБОБЩЕНИЕ ДАННЫХ ПО КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛОТДАЧЕ ПУЧКОВ КРУГЛОРЕБРИСТЫХ ТРУБ С ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ**

Применение воздухоохлаждаемых теплообменников в различных отраслях промышленности находит все более активное распространение благодаря их экологичности и отсутствию потребности в охлаждающей воде. Воздухоохлаждаемые теплообменники из круглорребристых труб широко используются в химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, газовой и пищевой промышленности, а также на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях, в тепло- и электроэнергетике, в холодильной технике, на атомных станциях.

Тепловая мощность воздухоохлаждаемых теплообменников во многом определяется характеристиками движения потока охлаждающего воздуха через него, который может быть организован с потреблением электроэнергии посредством вентилятора или в энергосберегающем режиме — свободной конвекцией. К сожалению, область температур окружающего воздуха, при которых возможно применение воздухоохлаждаемых теплообменников в условиях свободной конвекции, ограничена. Низкая интенсивность теплообмена по сравнению с вынужденной конвекцией является основным недостатком свободно-конвективного режима, который обычно компенсируется увеличением теплоотдающей площади, а именно, оребрением поверхности теплообмена. При оснащении воздухоохлаждаемых теплообменников дополнительными устройствами, позволяющими интенсифицировать свободную конвекцию, теплопроизводительность теплообменника может быть значительно увеличена.

В статье представлен обзор экспериментальных и численных исследований свободно-конвективного теплообмена в пучках из круглорребристых труб с установленной над ними вытяжной шахтой.

Ключевые слова: биметаллическая круглорребристая труба, теплообменный пучок, число Нуссельта, число Грасгофа, число Релея, вытяжная шахта, смешанная конвекция.

При воздушном охлаждении для компенсации различия коэффициентов теплоотдачи воздуха и охлаждаемых или конденсируемых теплоносителей в теплообменных аппаратах применяются внешне оребренные трубы с площадью наружной поверхности до 25 раз больше внутренней.

Широкое распространение получили круглорребристые трубы, изготавливаемые из сплошной толстостенной трубы, с нарезными методом поперечной накатки ребрами (труба пропускается через ряд формовочных дисков для нарезки ребер) [1]. Данный процесс оребрения имеет высокую производительность, хорошо поддается автоматизации и механизации.

Важно отметить, что свободно-конвективный теплообмен является сложным процессом, особенно на оребренных поверхностях. Теоретические методы описания и расчета трудны, громоздки, а иногда и неосуществимы. Поэтому для расчета свободно-конвективной теплоотдачи принято использовать критериальные уравнения, полученные экспериментально [1–3].

Задача оптимизации теплообмена в оребренных трубных пучках в режиме свободной конвекции может решаться в двух плоскостях: за счет изменения компоновочных параметров пучка и геометрических параметров труб, а также за счет изменения характера течения воздуха через теплообменные секции. В связи с этим появились новые исследования, связанные с разработкой методов интенсификации теплообмена, которые позволяют развить площадь, изменить геометрию теплопередающей поверхности

¹Белорусский государственный технологический университет. Беларусь, 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; э-почта: alk2905@mail.ru; ²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; э-почта: galiana.sidorik@gmail.com, katty.156.156@gmail.com; ³ФГБОУ "Санкт-Петербургский государственный морской университет". Россия, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3. Поступила 20.01.2023.

или изменить характер течения воздуха через теплообменные секции для их эффективной эксплуатации в режиме свободной конвекции.

Одним из перспективных способов интенсификации свободной конвекции является установка вытяжной шахты над оребренным пучком. При этом эффективность теплообмена в пучке во многом определяется характером течения воздуха в шахте.

Известно, что на нагретой горизонтальной бесконечной пластине возникает конвекция Релея–Бернара, представляющая собой регулярную структуру циркуляционных ячеек. Аналогичные циркуляционные движения воздуха возникнут на конечной нагретой пластине, ограниченной вертикальными теплоизолированными стенками шахты (рис. 1, а). Если заменить нагретую пластину теплообменным пучком, то в шахте возникнет наложение двух конвективных потоков воздуха [4]: циркуляционного 1 и восходящего 2 в проходном сечении пучка (рис. 1, б). Соотношение интенсивности этих потоков будет определяться как пропускной способностью пучка, так и параметрами вытяжной шахты. Причем восходящий поток осуществляет более интенсивный удельный съем тепла, чем циркуляционный. Как показали исследования [5–7], фактически теплоотдача пучка определяется параметрами восходящего потока воздуха, а циркуляционный поток препятствует развитию восходящего потока воздуха. Таким образом, задачей оптимизации конструктивных параметров пучка и шахты является достижение максимального расхода восходящего потока воздуха, при котором интенсивность конвективного теплообмена также будет максимальна.

При этом, соответственно, общепринятый для свободной конвекции определяющий критерий Релея $Ra = g\beta d_0^3(t_{ст} - t_0)/(va)$, в отличие от рассчитанного через скорость w восходящего потока в сжатом сечении пучка критерия Рейнольдса $Re = wd_0/v$, не позволяет определять коэффициент теплоотдачи пучка без учета параметров шахты. Поэтому во многих исследованиях [8–10] в выражениях для определения критерия Нуссельта Nu в качестве определяющего критерия принимался критерий Рейнольдса.

В работе [8] представлены результаты испытания аппарата воздушного охлаждения, оборудованного вытяжной цилиндрической шахтой высотой 5.52 м, на основе которых разработана критериальная зависимость для теплоотдачи в диапазоне чисел Рейнольдса $1500 < Re < 2000$:

$$Nu = 0.1565 Re^{0.602}, \quad (1)$$

где $Nu = \alpha_k d_0 / \lambda$ — число Нуссельта. Определяющей температурой для расчета критериальных чисел является температура окружающего воздуха t_0 , определяющим размером — диаметр по основанию оребрения трубы d_0 .

Далее в работе [9] данные исследования были продолжены в более широком диапазоне тепловой производительности и при переменной высоте вытяжного устройства. Исследования проводились на трубах

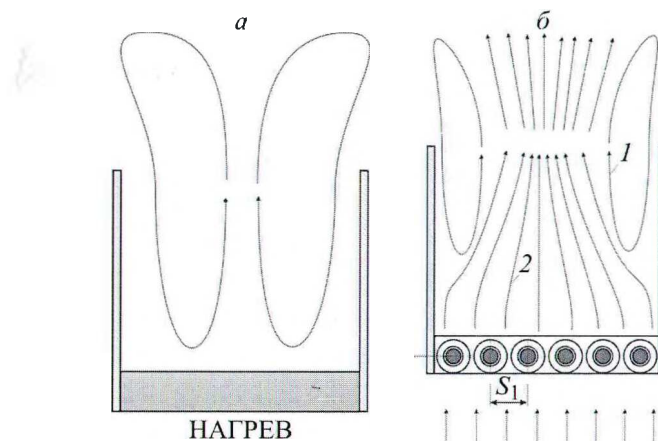


Рис. 1. Распределение конвективных потоков воздуха в открытой шахте с источником тепла в виде пластины (а) и пучка оребренных труб (б): 1 — циркуляционный поток; 2 — восходящий поток

с коэффициентом оребрения $\phi = 9$, длиной 4 и 8 м. В результате в том же диапазоне чисел Рейнольдса $1500 < Re < 2000$ уравнение теплоотдачи было уточнено:

$$Nu = 0.147Re^{0.61} . \quad (2)$$

Также была определена зависимость температуры воздуха после аппарата воздушного охлаждения $t_{ш}$, от тепловой производительности аппарата Q , температуры на входе t_0 и высоты вытяжного устройства H :

$$\frac{Q^2}{H} = m0.247z\gamma(\gamma - 1.262 \cdot 10^{-0.00142t_{ш}})(t_{ш} - t_0)^2 , \quad (3)$$

где $m = 1$ при длине труб 4 м, $m = 4$ при длине труб 8 м; γ — удельный вес воздуха до секции.

В работе [10] изучен теплообмен шахматного пакета оребренных труб с $S_1/S_2 = 1.16$ и $\phi = 9.12$ при числах Рейнольдса $Re = 5-121$, где результаты обобщены уравнением

$$Nu = 0.16 - 0.062 Re^{0.5} + 0.11 Re^{0.33} . \quad (4)$$

В [11] исследованы шахматные пучки из оребренных труб в модели воздушного конденсатора с параметрами $d \times h \times s \times \Delta = 0.057 \times 0.0157 \times 0.0023 \times 0.0003$ м, $\phi = 23.19$. Продольный и поперечный шаги труб в пучке, соответственно, 51 и 59 мм. Пучки исследовались с установкой вытяжной шахты. В качестве определяющего размера принимался эквивалентный диаметр канала по воздуху d_3 , определяющей температуры — температура воздуха на входе в трубный пучок t_0 . Получена закономерность теплоотдачи воздуха в оребренных трубных пучках при различных высотах шахты $H = 0.485-1.085$ м и числах поперечных рядов труб $z = 2-4$, действительная в диапазоне чисел Релея $Ra = 100-400$:

$$Nu = 0.41 \cdot 10^{-3} Ra^{0.5} (H/d_3)^{0.67} z^{0.26} . \quad (5)$$

В результате обобщения опытных данных коэффициент теплоотдачи воздуха в среднем составил $1.5-3.0$ Вт/(м² · К).

В статье [12] изучено влияние угла установки оребренных труб и шага, диаметра и толщины ребер на эффективность природной тяги системы охлаждения воздуха для электростанции. Установлено, что с увеличением толщины ребра растет интенсивность теплоотдачи, однако это приводит к большому весу теплообменного аппарата. В рамках исследования рекомендованы следующие характеристики труб: $s = 0.003$ м, $d = 0.018$ м при $Re = 220-5500$.

В работе [13] на основании промышленного эксперимента установлено, что при работе аппарата воздушного охлаждения в режиме свободной конвекции за счет наращивания высоты цилиндрической обечайки конфузора вентилятора на 0.5 м эффективность охлаждения газа увеличивается более чем в 2 раза.

В [14] коллективом исследователей проведено численное моделирование свободной конвекции воздуха вокруг круглой оребренной трубы диаметром $d_0 = 0.0249$ м с пятью ребрами, находящейся в небольшой вытяжной трубе высотой $H = 0.4-1.0$ м. В результате определено оптимальное межреберное расстояние $s' = 0.008$ м и диаметр ребра $d = 0.041$ м.

Известна также работа [15], посвященная экспериментальным исследованиям свободно-конвективного теплообмена двух- и трехрядных пучков плоскоовальных труб с различной формой оребрения в вытяжной трубе высотой $H = 6.5$ м. Авторами изучались плоскоовальные трубы с гладко-круглыми ребрами, с круглыми штифтовыми ребрами и зазубренными штифтовыми ребрами в интервале чисел Релея $Ra = 25\ 000-120\ 000$. Определено, что наибольшей тепловой эффективностью обладают пучки плоскоовальных труб с зазубренными штифтовыми ребрами.

Важно отметить, что чаще всего конвекцию рассматривают как преимущественно свободную или преимущественно вынужденную. При этом в природе возникают условия, когда ни один из видов конвекции не является преобладающим, а оба вида играют важную роль в теплообмене. В таких условиях большое значение имеют параметры, при которых процесс можно принимать вынужденным либо свободным,

а при каких необходимо учитывать влияние одного вида конвекции на другой либо их общее взаимодействие на тепловой поток. Таким образом, при условии, что вынужденный и свободный конвективный теплообмен играют равнозначную роль и никаким из этих процессов невозможно пренебречь, можно говорить о наличии смешанной конвекции [16].

Известны также работы [17, 18], в которых проведено экспериментальное исследование и получены критериальные уравнения теплоотдачи однорядных пучков из оребренных труб с параметрами $d \times h \times s \times \Delta = 0.0556 \times 0.01455 \times 0.00291 \times 0.00075$ м, $\varphi = 16.8$. Представлены результаты опытов на семи моделях с поперечными шагами труб в пучке 58–120 мм в диапазонах чисел подобия $Gr = (11-550) \cdot 10^3$, $Re = 480-2500$ в режиме смешанной конвекции, создаваемой при помощи маломощного вентилятора. Авторами определено, что применение маломощного вентилятора позволяет интенсифицировать теплоотдачу пучков в 6.5–8.5 раз по сравнению со свободно-конвективным теплообменом. Также было определено пороговое значение числа Рейнольдса $Re_a \approx 510-570$ перехода из смешанно-конвективного режима теплообмена в вынужденный.

Следует понимать, что вытяжная шахта является внешним нагнетательным устройством по отношению к теплообменному пучку, которое способно как увеличивать расход воздуха через пучок, так и уменьшать вплоть до полного прекращения (в случае полного перекрытия проходного сечения вытяжной шахты). Таким образом, с помощью вытяжной шахты можно добиться теплоотдачи от пучка труб как больше, так и меньше свободно-конвективной. Следовательно, несмотря на то, что принцип работы вытяжной шахты основан на гравитационной тяге, можно утверждать, что поток воздуха, создаваемый вытяжной шахтой в пучке, является дополнительным, а следовательно, режим теплообмена в пучке является смешанно-конвективным.

Авторами работ [5–7, 19–30] сделан акцент на изучение теплоотдачи в пучках в режиме смешанной конвекции, которая реализуется с помощью установки вытяжной шахты, работа которой в качестве побудителя движения воздуха через пучки функционально подобна работе маломощного вентилятора. Принципиальное отличие состоит в том, что этот процесс не требует подвода внешней энергии в явном виде, а интенсификация теплообмена в пучках осуществляется пассивным способом, конечным результатом которого является соответствующая величина энергосбережения [4]. Исследования проводились для различных пучков из оребренных труб со следующими параметрами: $d \times h \times s \times \Delta \times d_0 \times l = 0.0568 \times 0.0152 \times 0.0024 \times 0.00055 \times 0.0264 \times 0.3$ м, $\varphi = 21$.

В работах [19–22] изучены однорядные оребренные пучки, оснащенные вытяжной шахтой высотой $H = 0.52-2.12$ м. Установлено, что шахта над пучком приводит к значительному росту теплоотдачи в 2.5–3.0 раза по сравнению с режимом свободной конвекции, но при этом эффективность теплоотдачи существенно зависит от высоты вытяжной шахты, ее проходного сечения и поперечного шага установки труб в теплообменном пучке.

В работе [21] изучено влияние поперечного шага $S_1 = 0.058, 0.062, 0.064$ и 0.07 м на теплоотдачу однорядного горизонтального пучка оребренных труб с вытяжной шахтой. В результате анализа полученных экспериментальных данных у авторов сформировалась определенная физическая картина структуры потока воздуха, проходящего через однорядный горизонтальный оребренный пучок, который можно разделить на три части: межреберный (за счет большой поверхности контакта имеет наибольший отбор тепла, обладает максимальной подъемной силой), обтекающий (нагревается за счет взаимодействия с поверхностью торцов ребер и смешивается с межреберным потоком) и межтрубный (препятствует движению обтекающего потока и непосредственно не участвует в охлаждении трубного пучка, движется за счет подъемной тяги, создаваемой вытяжной шахтой). Определено, что при увеличении шага труб интенсивность теплоотдачи растет, а ее максимум достигается при $S_1/d = 1.089-1.14$, когда межтрубный холодный поток отсутствует, а обтекающий поток соседних труб объединяется в единый поток.

В работе [22] регулировку потоков воздуха в вытяжной шахте предложено осуществлять установкой в выходном сечении шахты крышки с отверстием, которая будет препятствовать организации циркуляционного потока воздуха (рис. 2, а). При этом крышка одновременно увеличивает аэродинамическое сопротивление шахты, что снижает также значение общего расхода потока воздуха через выходное

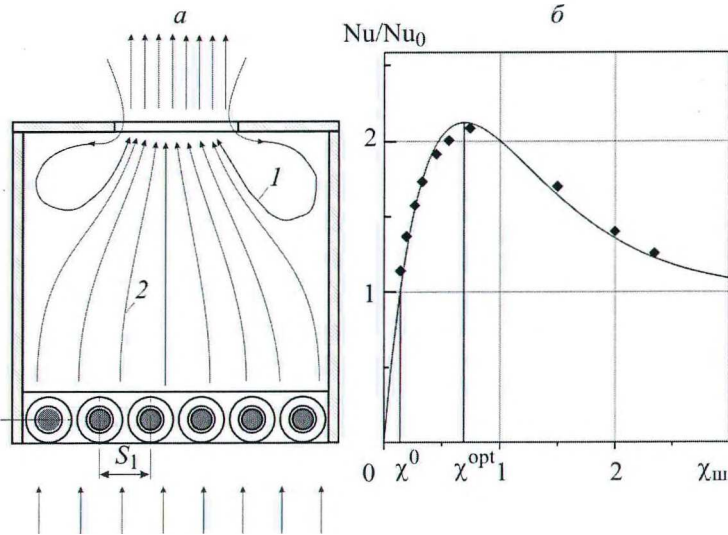


Рис. 2. Распределение конвективных потоков воздуха в шахте, закрытой крышкой с отверстием (а): 1 — циркуляционный поток, 2 — восходящий поток; зависимость увеличения теплоотдачи Nu/Nu_0 пучка труб от коэффициента сужения площади отверстия крышки $\chi_{ш}$ (б)

сечение шахты. Таким образом, для каждого температурного режима и конструкции пучка имеется оптимальное значение площади отверстия в крышке, при котором теплоотдача пучка максимальна.

Результаты экспериментальных данных по теплоотдаче однорядного горизонтального пучка при различных поперечных шагах установки труб обобщены уравнением вида:

$$Nu = 0.00129 \left(\frac{d_0}{d_3} \right)^{0.9} Re^{0.96}, \tag{6}$$

Уравнение (6) действительно в интервале изменения $Re = 100-720$, $d_0/d_3 = 4.85-7.21$. Однако уравнение (6) неудобно использовать для инженерных расчетов, поскольку число $Re = wd_0/\nu$ выражается через трудноопределимый параметр — скорость воздуха в сжатом сечении пучка w . Поэтому также получена формула расчета числа Нуссельта для отверстий в крышке шахты с площадью меньше оптимальной:

$$Nu = 0.00202 A' Gr^{0.48}, \tag{7}$$

где A' — коэффициент пропорциональности, зависит от геометрических параметров системы и вычисляется по формуле:

$$A' = \left(\frac{d_0}{d_3} \right)^{1.28} \left(\frac{H + d_0}{d_3} \right)^{0.35} \chi_{ш}^{0.51}, \tag{8}$$

где $\chi_{ш} = f_{отв}/f_{сж}$ — коэффициент сужения площади выходного сечения шахты $f_{отв}$ по отношению к сжатому сечению пучка $f_{сж}$. Уравнение (8) действительно в интервале изменения $Gr = 27\ 000-475\ 000$, $d_0/d_3 = 4.85-7.21$, $(H + d_0)/d_3 = 100-587$, $\chi_{ш} = 0.13-0.65$.

В работе [23] проведено численное моделирование смешанно-конвективного теплообмена однорядного пучка из биметаллических ребристых труб, которое хорошо согласуется с экспериментальными данными, полученными в работах [19–22]. Используя $k-\omega$ модель переноса сдвиговых напряжений Ментера в стандартной постановке, авторы визуализировали структуру течений в пучке и шахте, которая позволила выявить переходный характер течения воздуха в шахте и увидеть структуру охлаждения оребренного пучка при смешанной конвекции.

В работах [5–7, 24–26] приведены обширные экспериментальные исследования двух- и четырехрядных шахматных пучков из оребренных труб с вытяжной шахтой. За определяющий размер также принялся d_0 , за определяющую температуру — t_0 .

В работах [5, 6] изучался теплообмен двухрядного и четырехрядного шахматных пучков воздухонагревателя в режиме смешанной конвекции. Описана динамика движения течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над теплообменным пучком под действием гравитационных сил. Установлено снижение теплоотдачи пучков из-за наличия циркуляционных (гейзерных) течений воздуха в шахте на 20–50%. Предложена модернизация вытяжной шахты, позволяющая снизить интенсивность циркуляционных течений.

В работах [24, 25] представлены результаты экспериментальных исследований теплоотдачи в режиме смешанной конвекции воздуха для четырехрядных трубных пучков шахматной равносторонней компоновки с поперечными шагами установки труб 58, 64 и 70 мм. Установлено, что из-за высокого аэродинамического сопротивления и низкой эффективности верхних рядов теплоотдача в четырехрядном пучке с вытяжной шахтой меньше, чем в однорядном пучке. С увеличением межтрубного шага теплоотдача четырехрядного пучка растет и достигает максимума при $S_1 > 70$ мм.

В [25] для четырехрядных трубных пучков шахматной равносторонней компоновки воздуха получена зависимость увеличения теплоотдачи в режиме смешанной (за счет установки вытяжной шахты высотой 0.52 м) конвекции

$$Nu = Nu^0 (1 + (\chi_{ш}/\chi^0 - 1) \exp(-\chi_{ш}/(\chi^{opt} - \chi^0))) , \quad (9)$$

где χ^0 — нулевой коэффициент сужения площади отверстия крышки, при котором значение числа Нуссельта равно значению при свободной конвекции пучка ($Nu = Nu^0$, $C_s = 1$); χ^{opt} — оптимальный коэффициент сужения площади отверстия крышки, при котором значение числа Нуссельта максимально ($Nu = Nu_{max}$); (для $S_1 = 58$ мм — $\chi^0 = 0.137$, $\chi^{opt} = 0.613$; для $S_1 = 64$ мм — $\chi^0 = 0.177$, $\chi^{opt} = 0.733$; для $S_1 = 70$ мм — $\chi^0 = 0.192$, $\chi^{opt} = 0.767$).

С увеличением площади отверстия из-за снижения аэродинамического сопротивления шахты и роста расхода потока через пучок увеличивается теплоотдача пучка (рис. 2, б). Но после достижения χ^{opt} теплоотдача снижается из-за циркуляционных (гейзерных) потоков холодного воздуха в шахту, а теплоотдача пучка стремится к теплоотдаче пучка при свободной конвекции воздуха.

Установлено, что из-за высокого аэродинамического сопротивления и низкой эффективности верхних рядов теплоотдача в четырехрядном пучке с вытяжной шахтой меньше, чем в однорядном пучке. С увеличением межтрубного шага теплоотдача четырехрядного пучка растет и достигает максимума при $S_1 > 70$ мм.

В работе [7] разработаны рекомендации по проектированию воздухоохлаждаемых теплообменников с научно обоснованными параметрами вытяжной шахты. Авторами получена зависимость относительного увеличения числа Нуссельта Nu/Nu_0 от коэффициента сужения $\chi_{ш}$ в режиме смешанной конвекции для однорядного и многорядных пучков при высоте шахты $H = 0.52$ м и числе Грасгофа $Gr = 10^5$, где Nu_0 — число Нуссельта для режима свободной конвекции:

$$Nu/Nu_0 = A_z \chi_{ш} \exp(-B_z \chi_{ш}) + (1 - \exp(-B_z \chi_{ш})) , \quad (10)$$

где A_z , B_z — коэффициенты пропорциональности пучков с числом рядов z , которые равны $A_1 = 8.15$, $A_2 = 10.85$, $A_3 = 8.74$, $A_4 = 7.13$, $B_1 = 1.01$, $B_2 = 1.28$, $B_3 = 1.41$ и $B_4 = 1.81$.

В работе также рекомендуют к практической реализации двухрядный оребренный пучок из оребренных труб с коэффициентом оребрения $\phi = 21$ с равносторонней шахматной компоновкой и межтрубным шагом 58 мм в воздухоохлаждаемых теплообменниках с вытяжной шахтой и оптимальными параметрами $\chi_{ш2}^{opt} = 0.87$, $H_{ш2}^{opt} = 1490$. С экономической точки зрения также интересно применение однорядного пучка с оптимальными параметрами вытяжной шахты $\chi_{ш1}^{opt} = 1.11$, $H_{ш1}^{opt} = 2500$ с учетом существенного снижения материалоемкости пучка при незначительной потере удельной мощности (на 5%). Однако применение этого варианта вызовет рост затрат на установку вытяжной шахты за счет увеличения ее оптимальной высоты (почти в 1.7 раза).

На основе определенных оптимальных чисел Ричардсона $Ri = Gr/Re^2$, которые характеризуют процесс смешанно-конвективного теплообмена и выражают, соответственно, интенсивность свободной и вынужденной конвекции [15, 26], авторами в [7] также определены оптимальные эквивалентные высоты и коэффициенты сужения площади сечения вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка. Так для однорядного пучка оребренных труб с вытяжной шахтой $Ri_{opt} = 0.0173$, $H_3^{opt} = H/d_3 = 2500$, $\chi_{ш}^{opt} = 1.11$, двухрядного — $Ri_{opt} = 0.0342$, $H_3^{opt} = 1490$, $\chi_{ш}^{opt} = 0.87$; трехрядного — $Ri_{opt} = 0.0625$, $H_3^{opt} = 1120$, $\chi_{ш}^{opt} = 0.82$; четырехрядного — $Ri_{opt} = 0.11$, $H_3^{opt} = 900$, $\chi_{ш}^{opt} = 0.69$.

В работе [26] представлено обобщение экспериментальных данных по теплоотдаче в режиме смешанной конвекции с отклонением, не превышающим $\pm 5\%$, по уравнению вида

$$Nu = AGr^n, \quad (11)$$

$$A = A_1(1.1 - \exp(-A_2\chi_{ш})) \left(1.3 - \exp\left(-A_3 \frac{H}{d_3}\right) \right), \quad (12)$$

где n, A, A_1, A_2, A_3 — коэффициенты, зависящие от геометрических параметров вытяжной шахты и компоновочных параметров пучка (табл. 1). Уравнения (11) и (12) действительны в интервалах $Gr = 24\ 000\text{--}330\ 000$, $H/d_3 = 142\text{--}580$, $\chi_{ш} = 0.14\text{--}0.75$.

Экспериментальные данные по теплоотдаче в режиме смешанной конвекции с погрешностью, не превышающей 5%, были аппроксимированы также уравнением вида

$$Nu = BRe^{0.96}, \quad (13)$$

где B — коэффициент, зависящий от параметров трубного пучка (табл. 1). Уравнение (13) действительно в интервале изменения $Re = 130\text{--}760$.

Установлено, что зависимости $Nu = f(Re)$ идентичны при различных параметрах вытяжной шахты, а определяются только параметрами трубного пучка.

На основе обобщающих уравнений (11)–(13) разработана многопараметрическая методика теплового расчета аппаратов воздушного охлаждения для режима смешанной конвекции [26].

Работа [28] посвящена вопросам изучения аэродинамического сопротивления пучков оребренных труб в режиме смешанной конвекции. На основании экспериментальных данных получена зависимость расчета числа Эйлера

$$Eu = 191.12 Re^{-0.395} [0.656 - \exp(-0.459z)]. \quad (14)$$

Авторами установлено, что сопротивление многорядных пучков выше в 11–24 раза, чем однорядных. В то же время для многорядных пучков при $z > 6$ дальнейшее увеличение числа рядов не окажет существенного влияния на изменение аэродинамического сопротивления. Это связано с тем, что растущее сопротивление движению воздуха компенсируется за счет увеличения подъемной силы при добавлении рядов.

В данной работе также предложена методика расчета скорости воздуха в одно- и многорядных оребренных пучках с вытяжной шахтой.

Таблица 1. Значения постоянных A_1, A_2, A_3, n, B по (11)–(13) для средней теплоотдачи пучков в режиме смешанной конвекции

z	A_1	A_2	A_3	n	B
1	0.0378	1.69	0.0008	0.48	0.00770
2	0.0185	2.77	0.00126	0.48	0.00523
3	0.0105	3.65	0.00164	0.48	0.00397
4	0.0061	4.68	0.00210	0.48	0.00302

При эксплуатации оребренных трубных пучков в режимах свободной и смешанной конвекции заметная часть теплоты отводится с помощью излучения, которое может составлять существенную долю от суммарного теплового потока и зависит от геометрических параметров пучка, а также характеристик излучаемой поверхности. Система уравнений, описывающая всю совокупность первичных процессов, из которых складывается теплообмен излучением оребренных пучков, очень сложна математически, поэтому чаще всего расчеты проводятся, исходя из ряда упрощающих предпосылок с вынужденным искажением реальной физической картины. При этом есть отличия в таких расчетах для открытых пучков и с установленной вытяжной шахтой, что не было учтено в работах [5–7, 19–26].

Уточненная методика расчета лучистой составляющей, позволяющая снизить погрешность расчетов на 7–25% для пучков оребренных труб с вытяжной шахтой, предложена в работе [29]. Экспериментальным исследованиям теплообмена воздухоохлаждаемых пучков оребренных труб с вытяжной шахтой, учитывая уточненную методику расчета лучистой составляющей, посвящены работы [30–33].

В [29] экспериментально изучены однорядные, двухрядные и четырехрядные пучки, состоящие из горизонтально шахматно расположенных оребренных труб с межтрубными шагами $S_1 = 58, 64$ и 70 мм, с установленной над пучком вытяжной шахтой. Авторами отмечено, что применение параметра H/d_3 , который использовался в работах [7, 22, 24], необоснованно, поскольку при увеличении высоты H и эквивалентного диаметра d_3 скорость потока воздуха через пучок растет, т. е. зависимость коэффициента теплоотдачи от параметра H/d_3 имеет неоднозначный вид. В связи с этим разработано выражение, связывающее гидродинамику и теплообмен в системе пучок–шахта:

$$H_{от} K \theta \theta_t = Nu_{к+л} Fo Pr^{-1} Eu_{п-ш} , \quad (15)$$

где $H_{от} = \frac{H}{d_0 \phi \pi}$ — относительная высота шахты; $d_0 \phi \pi$ — длина окружности гладкой трубы с площадью поверхности, равной площади поверхности оребренной трубы, м; $K = \frac{S_1 \chi}{z d_0}$ — коэффициент пропускной способности пучка; $\chi = f_{сж}/f_{фр}$ — коэффициент сжатия пучка, выражающий отношение площади сжатого сечения к площади фронтального сечения пучка; $\theta = \frac{\rho_0 - \rho_{ш}}{\rho_{ш}}$ — относительная разность плотностей; $\rho_0, \rho_{ш}, \rho_{п}$ — средняя плотность воздуха в окружающей среде, шахте и пучке, кг/м³; $\theta_t = (t_{ш} - t_0)/(t_{ст} - t_0)$ — относительный перепад температуры в пучке; $Nu_{к+л} = \frac{\alpha_{к+л} d_0}{\lambda}$ — число Нуссельта; $Fo = \frac{v \tau}{d_0^2}$ — динамическое число Фурье; τ — характерное время разгона неподвижного окружающего воздуха до скорости в сжатом сечении пучка; $Pr = \nu/a$ — число Прандтля; $Eu_{п-ш} = Eu_{п} + \left(Eu_{тр} + Eu_{зав} - \frac{\psi}{2} \theta \right) / \left(\frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}} \chi_{ш}^2 \right)$ — число Эйлера системы пучок–шахта, которое выражается относительно скорости в пучке и определяется коэффициентами гидравлического сопротивления в пучке и шахте ($Eu_{тр}$ — трение потока о стенки шахты, $Eu_{зав}$ — завихрения потока в шахте).

Установлено, что во всем диапазоне межтрубных шагов S_1 увеличение числа рядов приводит к пропорциональному увеличению удельной тепловой мощности пучка. Изменение числа Nu для разнорядных пучков выражено зависимостями

$$\frac{Nu_{z=2}}{Nu_{z=1}} = 1.04 \frac{S_1}{d_0} - 1.52 , \quad \frac{Nu_{z=4}}{Nu_{z=1}} = 1.22 \frac{S_1}{d_0} - 2.26 . \quad (16)$$

В работах [31–33] представлены экспериментальные исследования теплообмена однорядных пучков биметаллических труб со спиральными накатными алюминиевыми ребрами ($d_0 \times s \times \Delta \times l = 0.0268 \times 0.0025 \times 0.0005 \times 0.3$ м) разной высоты ($h = 2–14.6$ мм) к вертикальным потокам воздуха,

создаваемым вытяжной шахтой с регулируемой высотой $H = 0.52\text{--}2.12$ м. Компоновка пучков осуществлялась с постоянным относительным поперечным шагом $\sigma_1 = 1.14$ из 6 труб. По данным измерений вычисляли средний приведенный коэффициент теплоотдачи, который составил от 0.78 до 17.30 Вт/(м² · °С) при числах Релея $(19\text{--}360) \cdot 10^3$ и числах Рейнольдса $118 < Re < 2115$.

В работе [31] экспериментальные данные по теплоотдаче были обобщены уравнением

$$Nu = Re^{0.918-0.424 \cdot 0.539h/s} \times [0.0076 + 0.031 \exp(-0.374h/s) + 0.339 \exp(-2.347h/s)]. \quad (17)$$

Уравнение (17) для однорядного пучка действительно в интервале изменения $h/s \approx 0\text{--}5.84$.

В работе [32] приведено уравнение подобия от числа Релея и относительной высоты системы пучок–шахта, получены выражения для определения энергетического и аэродинамического КПД для системы пучок–шахта.

Также в работах [31, 32] дана оценка габаритным и металлоемкостным характеристикам пучков, где в качестве критериев выбраны объемная и массовая плотности теплового потока. Установлено, что объемная и массовая плотности теплового потока пучка стремительно увеличиваются с ростом высоты оребрения и достигают предельных значений. Затем наступает постепенное снижение показателей. Авторами рекомендовано применение эффективных оребренных пучков с высотой ребра $h = 8$ мм при малых числах Рейнольдса ($200 < Re < 2000$). При меньших числах Рейнольдса эффективная высота оребрения снижается до 2 мм.

В работе [33] для интенсификации свободно-конвективного теплообмена воздуха над пучками устанавливалась теплоизолированная вытяжная шахта высотой 0.52 м с регулируемыми проходными сечениями 0.0087, 0.0201 и 0.0330 м². По данным измерений вычисляли средний приведенный коэффициент теплоотдачи, который составлял величины от 0.78 до 17.30 Вт/(м² · °С) при числах Релея $(19\text{--}360) \cdot 10^3$. Приведено уравнение подобия для теплоотдачи однорядных пучков с различной высотой ребра в режиме свободной конвекции от коэффициента сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты. Обнаружено, что с увеличением проходного сечения вытяжной шахты у наиболее компактного пучка по показателю объемной плотности теплового потока повышается высота оребрения от 2 до 8 мм. Путем установки вытяжной шахты с оптимальным проходным сечением над однорядным пучком можно повесить его теплоотдачу в 1.73–3.64 раза.

Заключение. Имеется незначительное количество исследований теплообмена в круглоребристых пучках с установленной вытяжной шахтой. Не обнаружены рекомендации по выбору размеров оребрения в зависимости от параметров шахты и мощности пучка.

Большинство исследований представлены для пучков из промышленных труб с малым межреберным шагом (менее 3 мм) и для высоких коэффициентов оребрения труб 16–21, которые целесообразно использовать для режимов теплообмена с вынужденной конвекцией. Очевидно, что для пучков с вытяжной шахтой требуются трубы с большим шагом оребрения (до 6–8 мм). Однако имеющиеся научные работы позволяют получить картину динамики движения течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над теплообменным пучком под действием гравитационных сил и определить дальнейшие направления исследования.

Для пучков из промышленных труб установлено наличие оптимального проходного сечения вытяжной шахты, при котором теплоотдача пучка увеличивается более чем в два раза. Также разработаны рекомендации по определению оптимального количества рядов и межтрубного шага в равносторонней шахматной компоновке и высоты вытяжной шахты. Однако отсутствуют промышленные эксперименты, позволяющие получить уточняющие коэффициенты соответствия данных с лабораторными исследованиями.

Исследования выполнены в рамках гранта Т23РНФМ-005 Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, а также при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению "Передовые цифровые технологии" СПбГМТУ № 075-15-2022-312.

Обозначения

a — коэффициент температуропроводности воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; c_p — средняя изобарная теплоемкость воздуха, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; d — наружный диаметр оребрения трубы, мм ; d_0 — диаметр оребрения по основанию, мм ; d_3 — эквивалентный диаметр канала по воздуху, м ; Eu — число Эйлера; F — площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы, м^2 ; Fo — динамическое число Фурье; $f_{сж}$ — сжатое поперечное сечение пучка, м^2 ; $f_{отв}$ — площадь выходного сечения шахты (площади отверстия крышки), м^2 ; $f_{фр}$ — площадь фронтального сечения пучка, м^2 ; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; H — высота вытяжной шахты, м ; $H_{п-ш}$ — относительная высота системы пучок–шахта; h — высота ребер трубы, мм ; K — коэффициент пропускной способности пучка; l — длина оребренной части трубы, мм ; Nu — число Нуссельта; Pr — число Прандтля; Q — тепловая производительность, Вт ; $Q_{л}$ — лучистый тепловой поток, Вт ; Ra — число Релея; Re — число Рейнольдса; Ri — число Ричардсона; S_1 — поперечный шаг установки труб в пучке, мм ; S_2 — продольный шаг установки труб в пучке, мм ; s — шаг ребер трубы, мм ; s' — межреберное расстояние, мм ; $t_{ст}$ — температура стенки у основания ребер, $^{\circ}\text{C}$; $t_{ш}$ — средняя температура воздуха в шахте, $^{\circ}\text{C}$; t_0 — температура окружающего воздуха в камере, $^{\circ}\text{C}$; w — скорость воздуха в сжатом сечении пучка, $\text{м}/\text{с}$; z — число поперечных рядов труб в пучке, шт; α_k — средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $\alpha_{к+л}$ — коэффициент теплоотдачи излучением к шахте и конвекцией к воздуху от оребренной поверхности пучка, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; Δ — средняя толщина ребра, мм ; θ_1 — относительный перепад температуры на пучке; θ — относительная разность плотностей; λ — коэффициент теплопроводности воздуха, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; ν — коэффициент кинематической вязкости воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$; ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$; φ — коэффициент оребрения трубы; $\chi = f_{сж}/f_{фр}$ — коэффициент сжатия пучка, выражающий соотношение площади сжатого сечения к площади фронтального сечения пучка; $\chi_{ш} = f_{отв}/f_{сж}$ — коэффициент сужения площади выходного сечения шахты $f_{отв}$ (площади отверстия крышки) по отношению к сжатому сечению пучка $f_{сж}$; χ^0 — нулевой коэффициент сужения площади отверстия крышки, при котором значение числа Нуссельта равно значению при свободной конвекции пучка; χ^{opt} — оптимальный коэффициент сужения площади отверстия крышки, при котором значение числа Нуссельта максимально.

Литература

1. Кунтыш В. Б., Бессонный А. Н. *Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения*: справочник. Санкт-Петербург: Недра, 1996.
2. Жукаускас А. А., Улинскас Р. В., Зинявичюс Ф. В. Сопротивление шахматных пучков ребристых труб поперечному потоку жидкости. *Инженерно-физический журнал*. 1982. Т. 43, № 6. С. 891–898.
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. Karlovich T. B., Sukhotskii A. B., Danilchik E. S. Convective instability of air flows in the exhaust shaft above a four-row finned beam. *Proc. Natl. Acad. Sci. Belarus. Phys. Math. Series*. 2021. Vol. 57, No: 2. Pp. 242–254.
5. 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. С. 62–70.
6. Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С. Особенности гравитационного течения нагретого воздуха в вытяжной шахте над многорядным оребренным пучком. *Инженерно-физический журнал*. 2019. Т. 92, № 3. С. 619–625.
7. Маршалова Г. С., Сухоцкий А. Б., Кунтыш В. Б. Повышение энергосбережения в аппаратах воздушного охлаждения интенсификацией внешнего теплообмена. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2020. № 2. С. 3–7.
8. Васильев Ю. Н., Золотаревский В. С., Марголин Г. А., Крюков Н. П. Эксплуатация систем воздушно-водяного охлаждения в режиме естественной конвекции. *Газовая промышленность*. 1972. № 6. С. 23–25.
9. Васильев Ю. Н., Марголин Г. А. *Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций*. Москва: Недра, 1977.
10. Кошмаров Ю. А., Свирщевский С. Б., Иноземцева Е. Н. Теплообмен и сопротивление оребренных труб при низких числах Рейнольдса. *Тематический сборник научных трудов МАИ*. 1978. Вып. 463. С. 33–37.
11. Мильман О. О. Экспериментальное исследование теплообмена при естественной циркуляции воздуха в модели воздушного конденсатора с вытяжной шахтой. *Теплоэнергетика*. 2005. № 5. С. 16–19.
12. Fisenko S. P., Petruchik A. I., Solodukhin A. D. Evaporative cooling of water in a natural draft cooling tower. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2002. Vol. 45. Pp. 4683–4694.
13. Габдрахманов А. А. *Повышение эффективности эксплуатации аппаратов воздушного охлаждения на магистральных газопроводах*. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2007.

14. Kumar A., Joshi J. B., Nayak A. K., Krishnan V. P. Natural draft around a single finned tube kept in a small chimney: 3D CFD simulations of air cooled condenser-II. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2016. No. 92. Pp. 507–522.
15. Unger S., Beyer M., Pietruske H., Szalinski L., Hampel U. Natural convection heat transfer performance of additively manufactured tube bundle heat exchangers with novel fin design. *Heat Mass Transf.* 2021. No. 57; doi.org/10.1007/s00231-020-03014-5.
16. Гебхарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б. *Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен*. Москва: Мир, 1991.
17. Кунтыш В. Б., Самородов А. В., Самылов А. И. Экспериментальная установка и методика исследования теплоотдачи пучков из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха. *Сборник научных трудов. Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов*. Архангельск, 1998. Вып. 4. С. 139–149.
18. Кунтыш В. Б., Самылов А. И. Исследование теплоотдачи однорядных пучков из оребренных труб при совместном действии свободной и вынужденной конвекции воздуха. *Известия высших учебных заведений. Серия Энергетика*. 1999. № 4. С. 59–68.
19. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Повышение энергоэффективности теплообменников воздушного охлаждения. *Экология и промышленность*. 2017. № 2. С. 72–77.
20. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Экспериментальное исследование теплоотдачи однорядного пучка из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха и выбор формы представления результатов. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2017. Т. 60, № 4. С. 352–366.
21. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Исследование смешанно-конвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. 2017. № 19. С. 3–11.
22. Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С. Экспериментальное исследование и обобщение данных по интенсифицированной конвективной теплоотдаче однорядных пучков ребристых труб в потоке воздуха. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2018. №. 6. С. 552–563; <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-552-563>.
23. Маршалова Г. С., Сверчков С. А. Сравнительный анализ результатов экспериментального исследования и численного моделирования теплоотдачи однорядного пучка оребренных труб при смешанной конвекции. *Вестні Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук*. 2018. Т. 54, № 4. С. 499–506.
24. Маршалова Г. С., Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С., Скрипник А. Н. Влияние поперечного шага установки труб на теплоотдачу в режиме смешанной конвекции трубных пучков аппаратов воздушного охлаждения. *Вестник фонда фундаментальных исследований*. 2020. № 1. С. 46–53.
25. Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С., Маршалова Г. С. Влияние межтрубного шага на конвективную теплоотдачу воздухоохлаждаемого пучка с вытяжной шахтой. *Вестник фонда фундаментальных исследований*. 2020. № 2. С. 160–169.
26. Маршалова Г. С. *Тепловой расчет и проектирование аппаратов воздушного охлаждения с вытяжной шахтой*. Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Минск, 2019.
27. Cheng T. S. Characteristics of mixed convection heat transfer in a lid-driven square cavity with various Richardson and Prandtl numbers. *Int. J. Thermal Sci.* 2011. Vol. 50. Pp. 197–205.
28. Marshalova G. S., Sukhotskii A. B. Aerodynamic drag at small Reynolds numbers and the method of calculation of the air velocity in one-and many-row finned beams with an exhaust shaft. *Proc. the Nat. Acad. Sci. Belarus. Phys. Math. Series*. 2021. Vol. 57 (1). Pp. 108–118.
29. Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С., Данильчик Е. С. Особенности расчета лучистой составляющей теплового потока горизонтального пучка из оребренных труб с вытяжной шахтой. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2020. Т. 63, № 4. С. 380–388; <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-4-380-388>.
30. Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С., Здитовецкая С. В., Данильчик Е. С. Исследование свободно-конвективного теплообмена воздухоохлаждаемых пучков оребренных труб, интенсифицированного вытяжной шахтой. *Химическое и нефтегазовое машиностроение*. 2021. № 4. С. 8–12.
31. Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С. Конвективная теплоотдача однорядных пучков из труб с накатными алюминиевыми ребрами различной высоты при малых числах Рейнольдса. *Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 4. С. 336–348.
32. Данильчик Е. С. *Повышение эффективности теплообменников воздушного охлаждения при свободно-конвективном теплообмене*. Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Минск, 2022.
33. Danilchik E. S., Sukhotski A. B., Karlovich T. B. Influence of an exhaust shaft airflow section on single-row bundle air cooling comprising tubes with spiral fins of different heights. *Chem. Pet. Eng.* 2022. Vol. 58, Nos. 3–4. Pp. 315–322.