

УДК 536.24:66.045

А. Б. Сухоцкий¹, Е. С. Данильчик¹, Г. С. Маршалова^{1,2}, Д. В. Островская¹

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ИНТЕНСИФИЦИРОВАННЫХ СВОБОДНОКОНВЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ НА ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМЫХ ПУЧКАХ КРУГЛОРЕБРИСТЫХ ТРУБ

Представлены экспериментальные исследования свободно-конвективного теплообмена двухрядных пучков биметаллических труб со спиральными накатными алюминиевыми ребрами к вертикальным потокам воздуха, создаваемым вытяжной шахтой высотой 0.52 м с регулируемым проходным сечением 0.0087–0.1185 м². Шахматная компоновка пучков осуществлялась с межтрубным шагом $S_1 = 70$ мм из четырех труб в поперечном ряду пучка. По данным измерений вычисляли средний приведенный коэффициент теплоотдачи пучка, который составил величину от 1.26 до 3.84 Вт/(м² · °C) при числах Релея (20–163) · 10³.

Обнаружено, что применение необогреваемых полутрубок в модели оребренного пучка с вытяжной шахтой может приводить к существенному нарушению физического подобия эксперимента. Причем значение этого эффекта растет с увеличением расхода потока воздуха через пучок, т. е. при больших значениях чисел Релея ($Ra > 30\,000$) и оптимальных значениях коэффициента сужения площади выходного отверстия.

Для обеспечения физического подобия эксперимента рекомендуется в модели оребренного пучка с вытяжной шахтой использовать обогреваемые полутрубки или обеспечить в поперечном ряду пучка не менее шести труб.

Ключевые слова: физическое подобие, воздухоохлаждаемый пучок ребристых труб, свободно-конвективный теплообмен, вытяжная шахта.

Введение. Для усиления естественной тяги воздуха (свободной конвекции) над теплообменным пучком оребренных труб возможно применение конструктивного устройства в виде вытяжной шахты [1], работа которой в качестве побудителя движения воздуха функционально качественно 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. При этом интенсивность свободно-конвективного теплообмена со стороны оребрения увеличивается в 5–8 раз [2].

В [3–9] экспериментально исследованы теплообменные смешанноконвективные процессы в пучках, реализуемые с помощью установки над пучком вытяжной шахты. Исследования проводились для различных моделей пучков из оребренных труб со следующими геометрическими параметрами: диаметр оребрения $d = 56.8$ мм; диаметр трубы по основанию $d_0 = 26.4$ мм; высота, шаг, средняя толщина ребра, соответственно, $h = 15.2$ мм; $s = 2.43$ мм; $\Delta = 0.55$ мм. Длина оребренной части трубы $l = 300$ мм, коэффициент оребрения труб $\phi = 21$.

Работа над проведением экспериментальной части любого исследования требует четкого понимания алгоритма проведения испытаний, а также выверенной системы фиксации полученных данных. Метод экспериментального моделирования позволяет распространить результаты исследований модели теплообменника на натурные условия и получить обобщенные результаты — осуществить на модели явление, подобное натурному. При этом только удовлетворяющий требованиям теории подобия эксперимент обеспечивает надежные результаты, которые могут быть использованы в проектировании и расчетах рабочих теплообменников. Теория подобия устанавливает, что процессы, воспроизводимые в модели, должны

¹Белорусский государственный технологический университет. 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; э-почта: alk2905@mail.ru; ²Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; э-почта: galiana.sidorik@gmail.com. Поступила 21.10.2024.

быть подобны процессам, происходящим в образце. Для этого необходимо создание геометрического подобия, подобия условий на границах образца и модели, равенство определяющих критериев [10].

При модельном исследовании теплообменников, как правило, условие геометрического подобия в полной мере не соблюдается [11, 12]. При тепловом моделировании геометрическое подобие обеспечивается укороченным натурным пучком, без изменения геометрических параметров оребренных труб и межтрубных шагов. При этом длина труб l определяется только влиянием на эксперимент торцевых тепловых потерь (обычно $l/d_0 > 10$). При поперечном обтекании в условиях вынужденной конвекции в модели пучков рекомендуется устанавливать в поперечном ряду число труб $n \geq 5-6$ штук. Изучение теплоотдачи воздухоохлаждаемых пучков с вытяжными шахтами проводится методом полного теплового моделирования — обеспечивается обогрев всех трубок пучка, что соответствует протеканию рабочего процесса в образце [13]. При этом измерительные калориметры устанавливаются в середину каждого поперечного ряда пучка. Гидродинамическое подобие обеспечивается геометрическим подобием вытяжного устройства — шахты при обеспечении идентичного удельного аэродинамического сопротивления пучка и шахты.

В [9] получено критериальное уравнение, описывающее теплогидравлические процессы, проходящие в устройстве, состоящем из воздухоохлаждаемого пучка и вытяжной шахты:

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

где относительная высота шахты $H_{от} = H/(d_0 \varphi \pi)$; коэффициент пропускной способности пучка равен $K = S_1 \chi / (z d_0)$; χ — коэффициент загромождения оребренными трубами поперечного сечения пучка для прохода воздуха; относительная разность плотностей (окружающего воздуха и в шахте) равна $\theta = (\rho_0 - \rho_{ш})/\rho_{ш}$; относительный перепад температуры на пучке определяется как $\theta_t = (t_{ш} - t_0)/(t_{ст} - t_0)$; динамическое число Фурье (Fourier) равно $Fo = \nu t/d_0^2$; число Эйлера (Euler) системы пучок-шахта, которое определяется коэффициентами гидравлического сопротивления в пучке и шахте

$Eu_{п-ш} = Eu_{п} + \left(Eu_{тр} + Eu_{зав} - \frac{\Psi}{2} \theta \right) / \left(\frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}} \chi_{ш}^2 \right)$; коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты равен $\chi_{ш} = f_{отв}/f_{сж}$, где $f_{сж} = n l S_1 [1 - (d_0 + 2h\Delta/s)/S_1]$.

Из (1) следует, для обеспечения гидродинамического подобия в системе пучок-шахта необходимо обеспечить постоянство относительной высоты шахты $H_{от}$, коэффициент пропускной способности пучка K и число Эйлера системы пучок-шахта $Eu_{п-ш}$. Следовательно, при использовании в эксперименте укороченного пучка с ограниченным числом труб, но с заданной компоновкой пучка и с неизменными геометрическими параметрами труб, необходимо обеспечить постоянство действительной высоты H и коэффициента сужения площади выходного отверстия $\chi_{ш}$ шахты.

Экспериментальное исследование. Целью работы является экспериментальное исследование физического подобия процессов в теплообменных пучках с вытяжными шахтами для различных чисел труб в поперечном ряду пучка.

В [14] представлены методика и результаты экспериментального исследования двухрядного, шахматного, равностороннего пучка из оребренных труб с установленной над ним вытяжной шахтой высотой $H = 0.52$ м и различными крышками с площадями отверстий $f_{отв} = 0.0087, 0.0147, 0.0201, 0.033, 0.05, 0.069$ и 0.1185 м². Пучок собирался из биметаллических оребренных труб с коэффициентом оребрения $\varphi = 21$ и геометрическими параметрами, представленными выше. Межтрубный поперечный шаг труб в пучке составлял $S_1 = 70$ мм. Количество труб в поперечном первом ряду — шесть штук, а во втором — пять штук и две необогреваемые полутрубки (рис. 1, а). Полутрубки устанавливались для обеспечения аэродинамического подобия модели.

Для проведения анализа подобия процессов авторами статьи были проведены аналогичные исследования для подобного двухрядного пучка с четырьмя трубками в первом ряду и тремя целыми трубами с двумя необогреваемыми полутрубками во втором ряду (рис. 1, б). Над пучком устанавливалась вытяжная шахта высотой $H = 0.52$ м и различными крышками с площадью отверстия $f_{отв} = 0.0147, 0.025, 0.033, 0.069, 0.086$ и 0.1185 м².

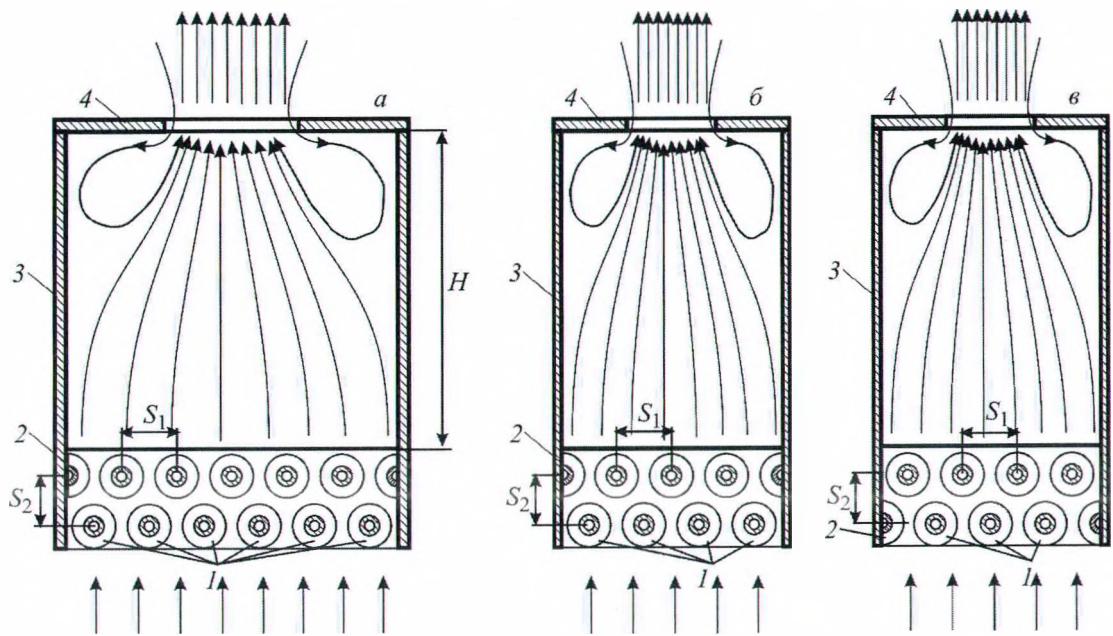


Рис. 1. Экспериментальные модели двухрядных пучков с шестью (а) и четырьмя (б, в) трубами в поперечном ряду (с полутрубками во втором (а, б) и первом (в) ряду): 1 — целная обогреваемая труба; 2 — необогреваемая полутрубка; 3 — вытяжная шахта; 4 — крышка с отверстием

Измерительное оборудование и методика экспериментального исследования представлены в работе [14]. Результаты экспериментальных исследований теплоотдачи в различных тепловых режимах обрабатывались и представлялись в виде зависимостей числа Нуссельта (Nusselt) от чисел Релея (Rayleigh):

$$Nu = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}, \quad (2)$$

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

где коэффициент температурного расширения $\beta = 1/(273 + t_0)$. Относительная погрешность экспериментальных значений чисел подобия Nu и Ra , соответственно, составила 3.2 и 4.3%.

Для апробации установки были проведены экспериментальные исследования четырехтрубной модели двухрядного пучка в условиях свободной конвекции без вытяжной шахты. Также были проведены экспериментальные исследования четырехтрубной модели однорядного пучка (без необогреваемых полутрубок) с вытяжной шахтой при коэффициенте сужения площади выходного отверстия $\chi_{ш} \approx 0.75$. На рис. 2 представлены зависимости числа Нуссельта от числа Релея для четырехтрубного и шеститрубного (полученного в [14]) двухрядных и однорядных пучков. Как видно, зависимости четырехтрубных и шеститрубных пучков на рис. 2 идентичны в пределах погрешности экспериментов и, следовательно, можно утверждать, что соблюдается физическое подобие экспериментов.

Затем были проведены исследования двухрядного четырехтрубного пучка с вытяжной шахтой (рис. 1, б). На рис. 3 представлены зависимости числа Нуссельта для двухрядных шеститрубного и четырехтрубного пучков с вытяжной шахтой при числе Релея $Ra = 10^5$.

Экспериментальные данные аппроксимированы зависимостью, предложенной в [12]:

$$Nu = Nu_0 \left(1 + \exp \left(- \frac{\chi_{ш}}{\chi_{ш}^{opt} - \chi_{ш}^0} \right) \left(\frac{\chi_{ш}^0}{\chi_{ш}} - 1 \right) \right), \quad (4)$$

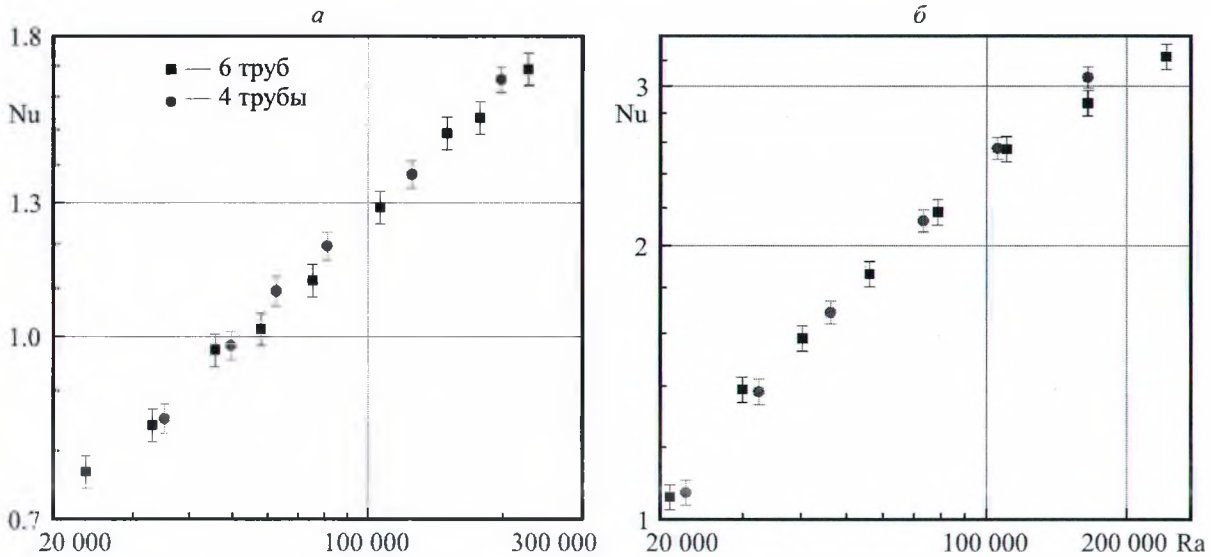


Рис. 2. Зависимости числа Нуссельта от числа Релея для шеститрубного и четырехтрубного двухрядных пучков без вытяжной шахты (а) и однорядных пучков с вытяжной шахтой при коэффициенте сужения площади выходного отверстия $\chi_{\text{ш}} \approx 0.75$ (б)

где $Nu_0 = 1.278 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ — число Нуссельта без шахты (свободная конвекция); оптимальный коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты, при котором значение числа Нуссельта максимально для четырехтрубного пучка — $\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}} = 1.0$, для шеститрубного — $\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}} = 0.81$; нулевой коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты $\chi_{\text{ш}}^0$, при котором значение числа Нуссельта равно его значению при свободной конвекции пучка $Nu = Nu_0$ для четырехтрубного пучка — $\chi_{\text{ш}}^0 = 0.182$, для шеститрубного — $\chi_{\text{ш}}^0 = 0.167$.

Как видно, четырехтрубный пучок имеет более высокую теплоотдачу (до 20%) для крышек с коэффициентом сужения площади выходного отверстия $\chi_{\text{ш}} > 0.5$. Было выдвинуто предположение, что данный эффект обоснован влиянием необогреваемых крайних трубок во втором поперечном ряду пучка. Недостаточный обогрев потока воздуха по краям пучка приводит к снижению гравитационной силы у стенок шахты и неравномерности вертикальной скорости потока воздуха по сечению пучка. Таким образом, усиливается поток воздуха через центр пучка в месте нахождения трубы-калориметра. На четырехтрубном, более узком пучке, этот эффект проявляется более значимо, что и показали данные экспериментальных исследований.

Анализ влияния на физическое подобие модели необогреваемых полутрубок. Для оценки влияния необогреваемых полутрубок на теплоотдачу трубы-калориметра были проведены экспериментальные исследования четырехтрубного пучка с полутрубками в первом поперечном ряду (рис. 1, в). На рис. 4

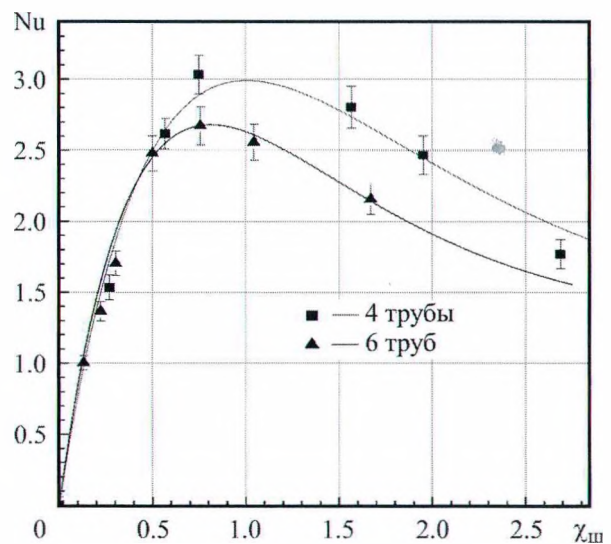


Рис. 3. Зависимости числа Нуссельта от коэффициента сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты для шеститрубного и четырехтрубного пучков с вытяжной шахтой при числе Релея $Ra = 10^5$

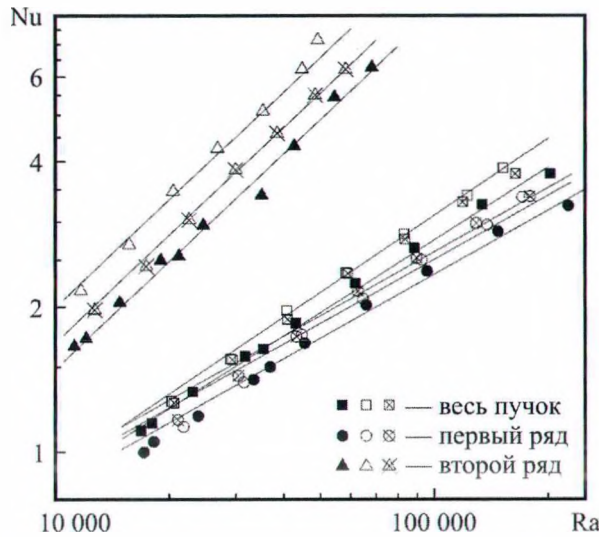


Рис. 4. Зависимости числа Нуссельта всего пучка, первого и второго поперечных рядов пучка от числа Рейли для шеститрубного (закрашенные значки), четырехтрубных с полутрубками в первом (пустые значки) и во втором (зачеркнутые значки) ряду пучков при коэффициенте сужения площади выходного отверстия $\chi_{ш} \approx 0.75$

Таблица 1. Значения аппроксимационных коэффициентов уравнения (5)

Тип пучка	Весь пучок		Первый ряд		Второй ряд	
	A	n	A	n	A	n
Шеститрубный	0.00870	0.5	0.01474	0.44	0.00163	0.74
Четырехтрубный с полутрубками в первом ряду	0.00692	0.53	0.01582		0.00219	
Четырехтрубный с полутрубками во втором ряду	0.00668		0.01641		0.00185	

представлены зависимости числа Нуссельта всего пучка, первого и второго поперечных рядов пучка от числа Рейли для шеститрубного, четырехтрубных с полутрубками в первом и во втором рядах пучков при коэффициенте сужения площади выходного отверстия $\chi_{ш} \approx 0.75$.

Результаты обобщены с помощью следующего критериального уравнения:

$$Nu = A Ra^n, \quad (5)$$

где A, n — коэффициенты, зависящие от геометрических параметров оребренной трубы.

Значения аппроксимационных коэффициентов уравнения (5) представлены в табл. 1.

Как видно из рис. 4, теплоотдача всего четырехтрубного пучка от перестановки полутрубок практически не изменилась. При этом теплоотдача четырехтрубных пучков на самом деле совпадает с теплоотдачей шеститрубного пучка при малых числах Рейли ($Ra \approx (2-3) \cdot 10^5$) и существенно увеличивается при больших числах Рейли. Это обусловлено, прежде всего, более интенсивным съемом тепла с калориметра во втором ряду пучка. При установке полутрубок во втором поперечном ряду теплоотдача калориметра четырехтрубного пучка в первом ряду по сравнению с теплоотдачей калориметра шеститрубного пучка в том же ряду увеличилась на $\sim 7\%$, теплоотдача калориметра во втором ряду — увеличилась на $\sim 34\%$. При установке полутрубок в первом поперечном ряду теплоотдача калориметра четырехтрубного пучка в первом ряду по сравнению с теплоотдачей калориметра шеститрубного пучка в том же ряду увеличилась более существенно — на $\sim 11\%$, теплоотдача калориметра во втором ряду увеличилась менее существенно — на $\sim 13\%$.

Таким образом, необогреваемые полутрубки нарушают физическое подобие эксперимента. Причем значение этого эффекта растет с увеличением расхода потока через пучок, т. е. при больших значениях чисел Рейли ($Ra > 30\,000$) и оптимальных значениях коэффициента сужения площади выходного отверстия $\chi_{ш}$.

Заключение. Важным этапом модельного исследования является определение критериев подобия и правил моделирования, выбор условий достоверного переноса результатов модельного исследования на натуру. Применение необогреваемых полутрубок в модели оребренного пучка с вытяжной шахтой может приводить к существенному нарушению физического подобия эксперимента (завышению значений теплоотдачи до 20%). Для обеспечения физического подобия эксперимента рекомендуется в модели оребренного пучка с вытяжной шахтой использовать обогреваемые полутрубки или обеспечить в поперечном ряду пучка не менее шести труб.

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т23РНФМ-005), а также в рамках проекта Государственной программы научных исследований "Энергетические и ядерные процессы и технологии" подпрограммы "Энергетические процессы и технологии" (задание 2.37, ГБ21-104).

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 ; $\text{Eu}_{\text{п-ш}}$ — число Эйлера системы пучок-шахта, которое определяется коэффициентами гидравлического сопротивления в пучке и шахте; $\text{Eu}_{\text{п}}$ — число Эйлера пучка труб; $\text{Eu}_{\text{тр}}$ — число Эйлера для трения в шахте; $\text{Eu}_{\text{зав}}$ — число Эйлера для завихрения потока в шахте, обусловленное сжатием и расширением потока воздуха в канале шахты; Fo — динамическое число Фурье; $f_{\text{сж}}$ — сжатое поперечное сечение пучка, м^2 ; $f_{\text{отв}}$ — площадь выходного сечения шахты (площади отверстия крышки), м^2 ; $f_{\text{фр}}$ — площадь фронтального сечения пучка, м^2 ; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; $H_{\text{от}}$ — относительная высота вытяжной шахты, м ; H — действительная высота вытяжной шахты, м ; $H_{\text{п-ш}}$ — относительная высота системы пучок-шахта; h — высота ребер трубы, мм ; K — коэффициент пропускной способности пучка; l — длина оребренной части трубы, мм ; Nu — конвективное число Нуссельта; $\text{Nu}_{\text{к+лш}}$ — число Нуссельта, учитывающее теплоотдачу пучка конвекцией к воздуху и излучением к поверхности шахты; n — количество труб в поперечном ряду пучка, шт.; Pr — число Прандтля; Ra — число Релея; S_1 — поперечный шаг установки труб в пучке, мм ; S_2 — расстояние между рядами труб в двухрядном пучке, мм ; s — шаг ребер трубы, мм ; $t_{\text{ст}}$ — температура стенки у основания ребер, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ш}}$ — средняя температура воздуха в шахте, $^{\circ}\text{C}$; t_0 — температура окружающего воздуха в камере, $^{\circ}\text{C}$; z — число поперечных рядов пучка; $\alpha_{\text{к}}$ — средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; β — коэффициент температурного расширения, К^{-1} ; Δ — средняя толщина ребра, мм ; θ_l — 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, $\text{м}^2/\text{с}$; $\rho_{\text{ш}}$ — средняя плотность воздуха в шахте, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_0 — плотность окружающего воздуха в камере, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{п}}$ — средняя плотность воздуха, проходящего через пучок, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ — характерное время разгона неподвижного окружающего воздуха до скорости в сжатом сечении пучка, с ; φ — коэффициент оребрения трубы; $\chi = f_{\text{сж}}/f_{\text{фр}}$ — коэффициент сжатия пучка, выражающий соотношение площади сжатого сечения к площади фронтального сечения пучка; $\chi_{\text{ш}} = f_{\text{отв}}/f_{\text{сж}}$ — коэффициент сужения площади выходного сечения шахты $f_{\text{отв}}$ (площади отверстия крышки) по отношению к сжатому сечению пучка $f_{\text{сж}}$; $\chi_{\text{ш}}^{\text{opt}}$ — оптимальный коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты, при котором значение числа Нуссельта максимально; $\chi_{\text{ш}}^0$ — нулевой коэффициент сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты, при котором значение числа Нуссельта равно его значению при свободной конвекции пучка; ψ — коэффициент образования области нагретого воздуха над шахтой.

Литература

1. Васильев Ю. Н., Марголин Г. А. Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций. Москва: Недра, 1977.
2. Кунтыш В. Б., Самылов А. И. Исследование теплоотдачи однорядных пучков оребренных труб при совместном действии свободной и вынужденной конвекции воздуха. *Известия высших учебных заведений. Сер. Энергетика*. 1999. № 4. С. 59–68.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. 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.
7. 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.
8. 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. National Academy of Sciences of Belarus. Phys. Math. Ser.* 2021. Vol. 57 (1). Pp. 108–118.
9. 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.
10. Мигай В. К. *Моделирование теплообменного энергетического оборудования*. Ленинград: Энергоатомиздат, 1987.
11. 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.
12. 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.
13. Кунтыш В. Б., Кузнецов Н. М. *Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения*. Санкт-Петербург: Энергоатомиздат, 1992.
14. Данильчик Е. С. *Повышение эффективности теплообменников воздушного охлаждения при свободно-конвективном теплообмене*. Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14. Минск, 2022.