

УДК 536.25:620.98

А. Б. Сухоцкий<sup>1</sup>, Е. С. Данильчик<sup>1,2,3</sup>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ОДНОРЯДНЫХ ПУЧКОВ ИЗ ТРУБ СО СПИРАЛЬНЫМИ АЛЮМИНИЕВЫМИ РЕБРАМИ РАЗНОЙ ВЫСОТЫ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА, ИНТЕНСИФИЦИРОВАННОГО ВЫТЯЖНОЙ ШАХТОЙ

Представлены экспериментальные исследования свободно-конвективного теплообмена однорядных пучков биметаллических труб со спиральными накатными алюминиевыми ребрами разной высоты (2–14,6 мм) с вертикальным потоком воздуха, создаваемым вытяжной шахтой с регулируемой высотой  $H = 0.52, 1.16, 2.12$  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/(м<sup>2</sup> · °С) при числах Рейля  $(19–360) \cdot 10^3$ . Получено уравнение подобия для описания зависимости теплоотдачи однорядных пучков с различной высотой ребра в режиме свободной конвекции от относительной высоты системы пучок–шахта.

Обнаружено, что интенсификация свободной конвекции воздуха установкой над пучком вытяжной шахты позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи до 2.3 раза. Получены выражения для определения энергетической и аэродинамической эффективности системы пучок–шахта. Определена оптимальная высота оребрения (около 8 мм) для пучков исследуемых труб с вытяжной шахтой.

**Ключевые слова:** оребренная труба, однорядный пучок, вытяжная шахта, свободная конвекция воздуха.

**Введение.** Передача тепла свободной конвекцией является привлекательной альтернативой принудительной конвекции, поскольку здесь не требуются ни вентиляторы, ни воздуходувки. Следовательно, система упрощается, снижается уровень шума и потребление электроэнергии. Основным недостатком естественной конвекции является низкий коэффициент теплопередачи. Поэтому актуальными являются исследования, связанные с разработкой методов интенсификации теплообмена, которые позволят расширить площадь, изменить геометрию теплопередающей поверхности или изменить характер течения воздуха внутри теплообменных аппаратов для их эффективной эксплуатации в режиме свободной конвекции.

Однорядные пучки из труб с круглыми алюминиевыми ребрами находят широкое применение в рециркуляционных воздухонагревателях систем воздушного отопления [1, 2], в лесосушильных камерах с мягкими режимами сушки для твердолиственных ценных пород древесины [3, 4], на современных атомных установках БН-600, БН-800 на быстрых нейтронах в энергонезависимых системах аварийного расхолаживания реактора с натрий-воздушным теплообменником и свободной циркуляцией воздуха за счет вытяжной трубы [5]. При этом на предприятиях доступное пространство часто ограничено, что требует применения компактных ребристых теплообменников. Перспективным направлением является применение воздухоохлаждаемых теплообменников с вытяжной шахтой в нефтеперерабатывающей, нефтехимической и газовой промышленности [6, 7].

В работе [6] представлены аналитические расчетные зависимости использования вытяжного устройства для систем воздушно-водяного охладителя агрегата 11ГД-100 с аппаратом воздушного охлаждения горизонтального для вязких продуктов типа АВГ-В, оборудованного вытяжным устройством.

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет. 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; э-почта: alk2905@mail.ru; <sup>2</sup>Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси. 220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15; <sup>3</sup>ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный морской технический университет". Россия, 190121, г. Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 3; э-почта: katyua.156.156@gmail.ru. Поступила 16.04.2022.

Исследования проводились на трубах длиной 4 и 8 м с коэффициентом оребрения  $\phi = 9$ . В работе [7] описаны результаты испытания двухконтурной системы воздушно-водяного охлаждения с интенсифицирующим устройством в режиме свободной конвекции и получена критериальная зависимость  $Nu = f(Re)$ . Известна работа [8], в которой выполнено исследование и получены экспериментальные зависимости теплоотдачи однорядных пучков из оребренных труб (коэффициент оребрения  $\phi = 9$ ) в диапазоне числа Рейнольдса 480–2500.

В работах [9–12] представлены результаты экспериментального исследования и их аппроксимация теплоотдачи однорядных и многорядных пучков, состоящих из биметаллических труб со спирально накатными ребрами с коэффициентом оребрения  $\phi = 21$  для различных поперечных шагов труб  $S_1 = 58–70$  мм при свободной конвекции, интенсифицированной вытяжными шахтами с различными геометрическими параметрами. Рассмотрены аэродинамические процессы нагретого воздуха, определены оптимальные коэффициенты сужения площади выходного отверстия вытяжной шахты по отношению к сжатому сечению пучка.

В работе [13] проведено экспериментальное исследование интенсивности теплового потока однорядного горизонтального воздухоохлаждаемого трубчатого пучка теплообменника со спиральными алюминиевыми накатными ребрами различной высоты при малых числах Рейнольдса ( $Re < 2000$ ). Увеличение высоты ребер труб приводит к росту коэффициента оребрения, но при этом снижается средний приведенный коэффициент теплоотдачи за счет уменьшения скоростей потока воздуха в межреберном пространстве и снижения энергетической эффективности ребер. По габаритным и металлоемкостным показателям определена эффективная высота оребрения трубы.

**Экспериментальное исследование.** Целью работы является экспериментальное исследование энергетической эффективности системы, состоящей из теплообменного пучка биметаллических оребренных труб и вытяжной шахты, для различных высот оребрения и шахты.

В качестве объекта исследования был выбран однорядный горизонтальный пучок из шести стандартных промышленных биметаллических оребренных труб со спиральными накатными ребрами с коэффициентом оребрения  $\phi = 19.3$  (тип I). Материал ребристой оболочки — алюминиевый сплав АД1М, материал несущей трубы наружного диаметра 0.025 м и стенки толщиной 0.002 м — углеродистая сталь. Для изменения высоты ребер труб пучка они обтачивались путем шлифования с образованием новых типов II–VI (рис. 1). Компоновка однорядных пучков осуществлялась с постоянным относительным поперечным шагом  $\sigma_1 = S_1/d = 1.14$  (табл. 1) из 6 труб.

После шлифовки всех ребер получили трубу с элементами дискретной шероховатости (тип VI) вследствие повреждения поверхности основания ребер и межреберных каналов абразивом шлифовальной бумаги, что проблематично исправить из-за небольшой толщины алюминиевого основания (0.9 мм). Предварительно поставленные опыты подтвердили, что ее теплообменные свойства соответствуют свойствам обычной гладкой трубы при правильном учете лучистой составляющей [14, 15].

Экспериментальные исследования проводились методом полного теплового моделирования трубного пучка. Обогрев труб осуществлялся с помощью вставных электронагревателей. Центральная труба ряда пучка являлась калориметром и на ней измерялись значения электрической мощности и температуры стенки у основания ребер для определения приведенного среднего коэффициента теплоотдачи конвекцией.

Для интенсификации свободно-конвективного теплообмена воздуха над однорядными пучками труб различных типов I–VI устанавливалась вытяжная цилиндрическая шахта постоянного диаметра  $d_{\text{ш}} = 0.105$  м (проходное сечение  $f_{\text{ш}} = \pi d_{\text{ш}}^2/4 = 0.0087$  м<sup>2</sup>) с регулируемой высотой  $H = 0.52, 1.16, 2.12$  м [13]. В случае пучка I-го типа исследования также проводились и при высоте  $H = 1.48$  м.

Схема экспериментальной установки, аппаратное оформление установки измерительными приборами, методика исследования и порядок проведения опытов изложены в [13, 16]. Во время проведения опытов температура поверхности трубы-калориметра у основания ребер (среднеарифметическая температура по показаниям термопар) изменялась в интервале  $t_{\text{ст}} = 30–195^\circ\text{C}$ , температура окружающего воздуха в камере  $t_0 = 17–27^\circ\text{C}$ , средняя температура воздуха в шахте  $t_{\text{ш}} = 23–111^\circ\text{C}$ , подводимая к калориметру электрическая мощность  $W = 10–250$  Вт.

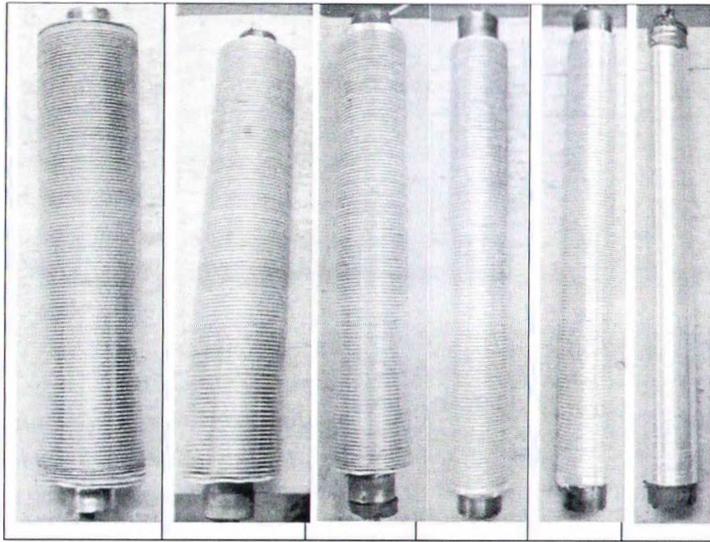


Рис. 1. Образцы экспериментальных труб типов I–VI

Таблица 1. Геометрические размеры труб ( $d_0 \times s \times l = 0.0268 \times 0.0025 \times 0.3$  м) однорядного пучка и его поперечный шаг

Тип пучка труб	$\varphi$	$d \cdot 10^3, \text{ м}$	$\Delta \cdot 10^3, \text{ м}$	$h \cdot 10^3, \text{ м}$	$h/s$	$S_1, \text{ м}$
I	19.3	56.0	0.50	14.6	5.84	0.064
II	15.1	50.8	0.55	12.0	4.80	0.058
III	9.4	42.8	0.62	8.0	3.20	0.049
IV	4.8	35.0	0.68	4.1	1.64	0.040
V	2.8	30.8	0.72	2.0	0.8	0.035
VI	→ 1	26.8	–	0–0.2	→ 0	0.031

Примечание:  $\Delta$  — средняя толщина трапециевидного ребра, м;  $h$  — высота ребра, м;  $h/s$  — относительная высота ребра.

По данным измерений вычисляли средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности:

$$\alpha_k = \frac{Q_k}{(t_{ст} - t_0)F}, \quad (1)$$

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

Тепловой поток  $Q_k$ , отведенный от калориметра к воздуху конвекцией, рассчитывался из уравнения [14, 17]:

$$Q_k = W - Q_{пл} - Q_{п}. \quad (2)$$

Результаты эксперимента представлены на рис. 2 в виде зависимости числа Нуссельта от числа Релея:

$$Nu_k = \frac{\alpha_k d_0}{\lambda}, \quad (3)$$

$$Ra = \frac{g\beta d_0^3 (t_{ст} - t_0)}{\nu\alpha}. \quad (4)$$

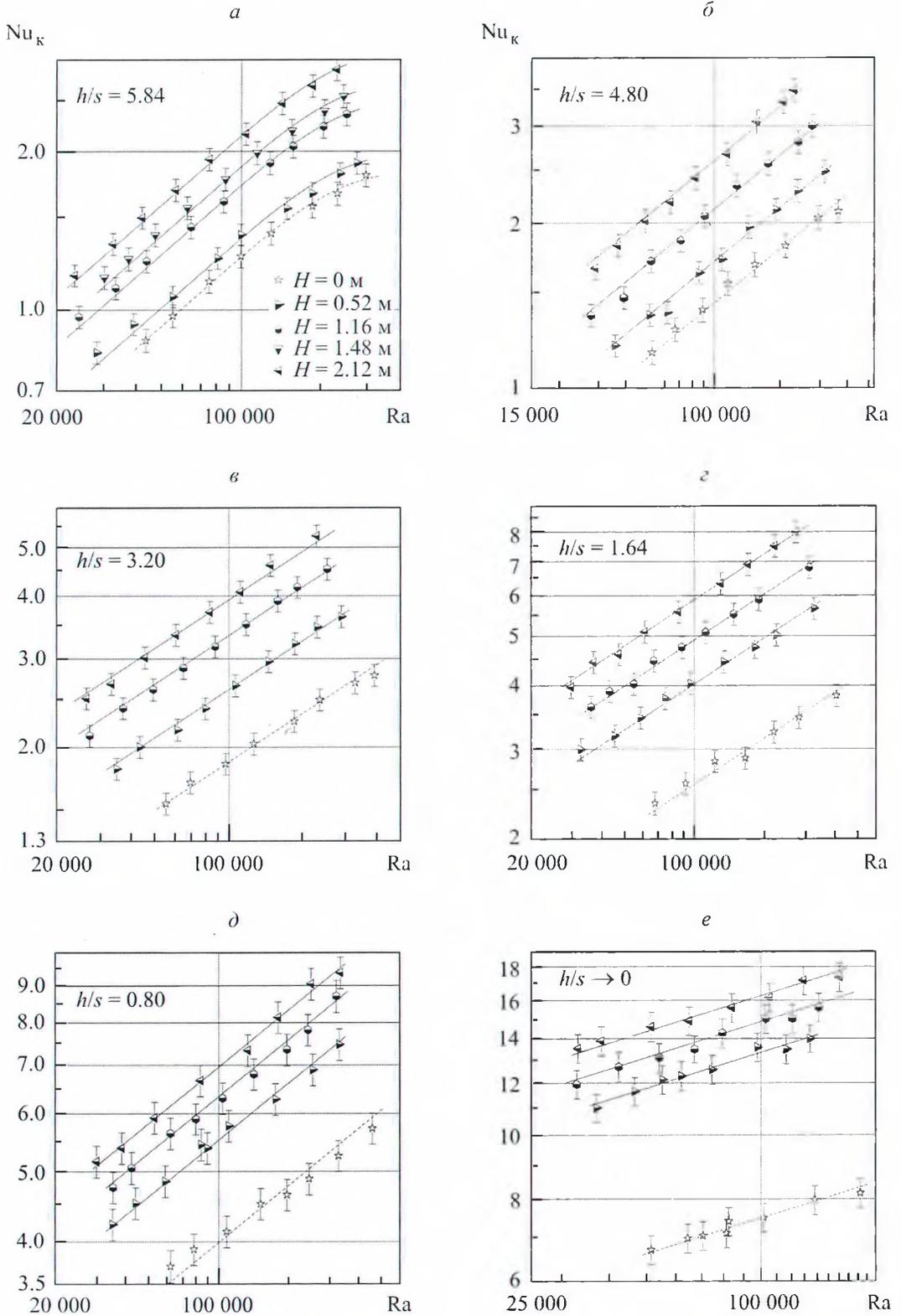


Рис. 2. Теплоотдача однорядных пучков различных типов: *a* — I; *б* — II; *в* — III; *г* — IV; *д* — V; *е* — VI в режимах свободной конвекции и при ее интенсификации вытяжной шахтой

Определяющей температурой для нахождения теплофизических свойств воздуха является температура окружающего воздуха  $t_0$ .

Диапазон полученных абсолютных значений средних приведенных коэффициентов теплоотдачи в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты, составил: для однорядного пучка I типа с наименьшей теплоотдачей —  $\alpha_k = 0.78\text{--}3.80 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ , а для однорядного пучка VI типа (гладкий пучок) с наибольшей теплоотдачей —  $\alpha_k = 9.80\text{--}17.30 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ . Доля лучистой составляющей от суммарной теплоотдачи составляет 8–20%, с уменьшением высоты ребра труб незначительно снижается, а при увеличении  $H$  уменьшается в 1.8–2.5 раза.

Экспериментальные данные по теплоотдаче однорядных пучков в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью вытяжной шахты, на рис. 2 с отклонением для однорядных пучков I–V типов — до  $\pm 5\%$  и VI типа — до  $\pm(5\text{--}8)\%$  обобщались уравнением вида

$$\text{Nu}_k = AC_e \text{Ra}^n, \tag{5}$$

где  $A, n, C_e$  — коэффициенты, зависящие от геометрических размеров оребренных труб и компоновочных характеристик пучка, а также геометрических параметров вытяжной шахты.

Показатель  $n$  отражает темп увеличения теплоотдачи ( $n = 0.44$  для пучка I типа,  $n = 0.33$  — II типа,  $n = 0.32$  — III типа,  $n = 0.3$  — IV типа,  $n = 0.26$  — V типа,  $n = 0.18$  — VI типа), а  $C_e$  — изменение темпа увеличения теплоотдачи при  $\text{Ra} \geq 250\,000$  ( $C_e = (1 - \exp(-6 \cdot 10^5/\text{Ra}))$  для пучка I типа и  $C_e = 1$  для пучков типов II–VI).

Зависимость коэффициента  $A$  от относительной высоты  $H_{\text{п-ш}} = \frac{(H + d)S_1\chi}{d_0^2 z \phi \pi}$  системы пучок–шахта [12] представлена на рис. 3, где  $\chi = f_{\text{сж}}/(mS_1)$  — коэффициент загромождения оребренными трубами поперечного сечения пучка для прохода воздуха; площадь сжатого сечения пучка равна  $f_{\text{сж}} = lmS_1[1 - (d_0 + 2hd/s)/S_1]$ ; число рядов в пучке —  $z = 1$  шт. Зависимости на рис. 3 с увеличением высоты ребра меняют свой вид от линейного до степенного.

Согласно графическим данным, представленным на рис. 2 и 3, интенсификация свободной конвекции воздуха установкой над пучком вытяжной шахты позволяет увеличить интенсивность теплоотдачи для: VI типа (гладкого пучка), обладающего наибольшей теплоотдачей — в 1.7–2.2 раза; V типа — в 1.3–1.7 раза; VI типа — в 1.6–2.3 раза; III типа — в 1.4–2.1 раза; II типа — в 1.2–1.8 раза; I типа — в 1.1–1.7 раза.

Для оценки влияния относительной высоты ребра труб  $h/s$  и высоты шахты  $H$  на тепловую эффективность пучков были построены зависимости  $\text{Nu}_k \phi = f(h/s)$  и  $\text{Nu}_k \phi = f(H_{\text{п-ш}})$  при постоянном числе Релея  $\text{Ra} = 100\,000$ , представленные на рис. 4. Согласно данным, представленным на рис. 4, а, при увеличении высоты шахты наблюдается рост теплоотдачи. Полученные результаты хорошо согласуются с данными работ [18, 19] для однорядных пучков оребренных труб с  $\phi = 21$  в режимах свободной и смешанной конвекции воздуха. На рис. 4, б видно, что наибольшая теплоотдача однорядного пучка, отнесенная к площади поверхности труб по основанию оребрения, характерна для пучка I типа (с наибольшей относительной высотой ребра  $h/s = 5.84$ ,  $\phi = 19.3$ ), величина которой больше для гладкого пучка VI типа в 2.5–3.0 раза.

**Анализ эффективности системы теплообменной пучок–вытяжная шахта.** Анализ эффективности системы пучок–шахта выполнен на основании уравнения теплового баланса при условии,

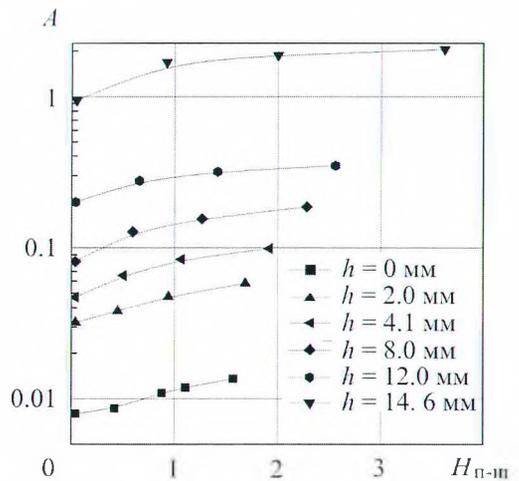


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропорциональности  $A$  от относительной высоты  $H_{\text{п-ш}}$  системы пучок–шахта

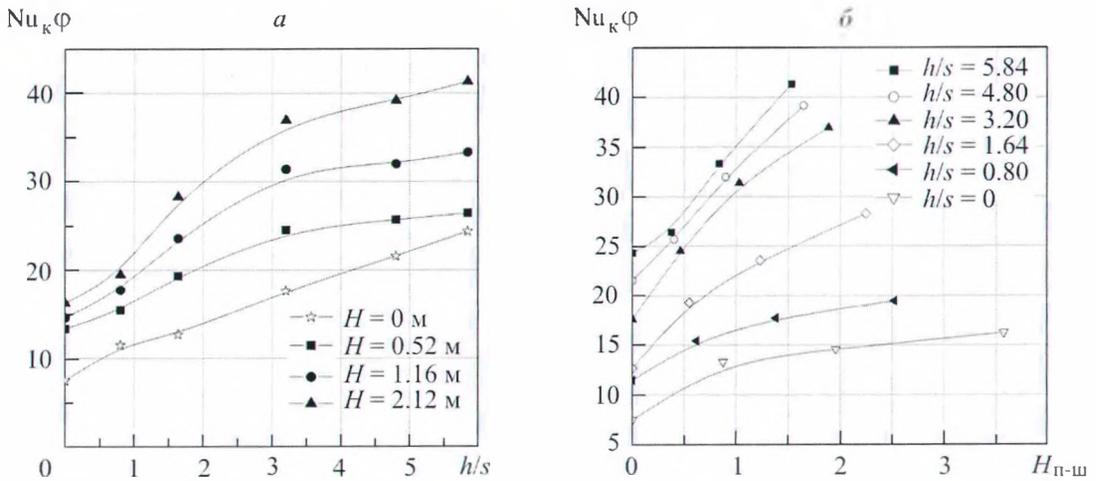


Рис. 4. Влияние относительной высоты  $h/s$  ребра труб (а) и геометрических параметров вытяжной шахты (б) на интенсивность теплоотдачи однорядного пучка (типы I–VI), отнесенной к площади поверхности труб по основанию оребрения в режиме свободной конвекции, интенсифицированной с помощью шахты при  $Ra = 100\ 000$

что все тепло, отводимое от пучка оребренных труб, передается потоку воздуха, движущегося в вытяжную шахту:

$$\alpha(t_{ст} - t_0)Fm = c_p \rho f_{сж} w(t_{ш} - t_0). \quad (6)$$

Тогда из (3) и (6) получим число Нуссельта в виде

$$Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda} = \frac{f_{сж}}{Fm} \frac{w d_0}{\lambda} c_p \rho \frac{t_{ш} - t_0}{t_{ст} - t_0} = \frac{f_{сж}}{Fm} Re Pr \theta_t, \quad (7)$$

где число Рейнольдса равно  $Re = w d_0 / \nu$ ; число Прандтля —  $Pr = \nu c_p \rho / \lambda$ ; относительный перепад температуры на пучке —  $\theta_t = (t_{ш} - t_0) / (t_{ст} - t_0)$ . Параметр  $\theta_t$  может быть также выражен формулой

$$\theta_t = \frac{Nu Fm}{Re Pr f_{сж}} < 1. \quad (8)$$

Для определения максимального значения числа Рейнольдса, достигаемого в системе пучок–шахта, воспользуемся выражением для расчета скорости потока воздуха в сжатом сечении пучка, полученным в [11] для данной экспериментальной установки:

$$w = \chi_{ш} \frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}} \sqrt{\frac{Hg\theta}{Eu_{тр} + Eu_{зав} + Eu_{п} \frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}} \chi_{ш}^2 - \frac{\psi}{2}}}, \quad (9)$$

где относительная разность плотностей равна  $\theta = \frac{\rho_0 - \rho_{ш}}{\rho_{ш}}$ ; число Эйлера для трения в шахте —  $Eu_{тр} = \lambda_{тр} \frac{H - h_{диф}}{2d_{ш}}$ ; число Эйлера завихрения потока в шахте —  $Eu_{зав} = 5.5 \frac{\chi_{отв} - 0.03}{\chi_{отв} + 0.3}$ ;  $\psi = 3.74 - 2.44\chi_{кр}$  — коэффициент образования области нагретого воздуха над шахтой; соотношение площади проходного сечения шахты к площади фронтального сечения пучка  $f_{фр} = S_1 ml$  равно  $\chi_{отв} = f_{ш} / f_{фр}$ ; коэффициент отверстия в крышке вытяжной шахты с площадью крышки  $f_{кр}$  —  $\chi_{кр} = f_{ш} / f_{кр}$ .

С увеличением высоты шахты  $H$  скорость потока воздуха в сжатом сечении пучка растет. При  $H \rightarrow \infty$  определяющими потерями становятся потери на трение в шахте, а скорость потока достигает максимального значения для диаметра шахты  $d_{ш}$ :

$$w_{\max} = \chi_{ш} \frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}} \sqrt{\frac{2d_{ш}g\theta}{\lambda_{тр}}}, \quad (10)$$

$$Re_{\max} = \frac{d_0}{\nu_{п}} \chi_{ш} \frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}} \sqrt{\frac{2d_{ш}g\theta}{\lambda_{тр}}}. \quad (11)$$

Тогда из (7) и (11) максимальное число Нуссельта, достигаемое при теплоотдаче пучка с вытяжной шахтой, можно записать как

$$Nu_{\max} = \frac{f_{сж}}{Fm} Re_{\max} Pr\theta_l = \frac{f_{отв}}{Fm} Pr\theta_l \frac{d_0}{\nu_{п}} \frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}} \sqrt{\frac{2d_{ш}g\theta}{\lambda_{тр}}}, \quad (12)$$

где плотность воздуха  $\rho_{ш}$  определяется по температуре  $t_{ст}$ , плотность  $\rho_{п}$  и кинематическая вязкость  $\nu_{п}$  воздуха — по средней температуре  $0.5(t_{ст} + t_0)^{\circ}C$ ,  $\lambda_{тр} \approx 0.032$  для экспериментальной шахты, выполненной из полипропилена в условиях эксперимента.

Поскольку всегда  $\theta_r < 1$  (9), то максимальное число Нуссельта в пучке для числа Рейнольдса  $Re_{\max}$  и числа Прандля  $Pr$  равно

$$Nu_{\max} < Nu_{\max 0} = \frac{f_{отв}}{Fm} Pr \frac{d_0}{\nu_{п}} \frac{\rho_{ш}}{\rho_{п}} \sqrt{\frac{2d_{ш}g\theta}{\lambda_{тр}}}. \quad (13)$$

При этом энергетическую эффективность системы пучок–шахта можно оценить с помощью параметра энергетической эффективности:

$$\eta_3 = \frac{Nu}{Nu_{\max 0}} = \theta_r \eta_a, \quad (14)$$

где аэродинамическая эффективность системы пучок–шахта  $\eta_a = Re/Re_{\max}$  выражает эффективность вытяжной шахты в качестве интенсифицирующего устройства прокачки воздуха через данный теплообменный пучок.

На рис. 5 представлены зависимости энергетической и аэродинамической эффективности системы пучок–шахта в зависимости от высоты оребрения и вытяжной шахты. Как видно, энергетическая эффективность интенсивно увеличивается с ростом высоты оребрения до 8 мм (пучок III типа) до значений 35–50%, а затем рост эффективности существенно снижается или прекращается. Следовательно, можно рекомендовать к применению для пучков труб исследуемого типоразмера с вытяжной шахтой высоту оребрения около 8 мм, что совпадает с выводами, сделанными в работе [13] по массогабаритным характеристикам.

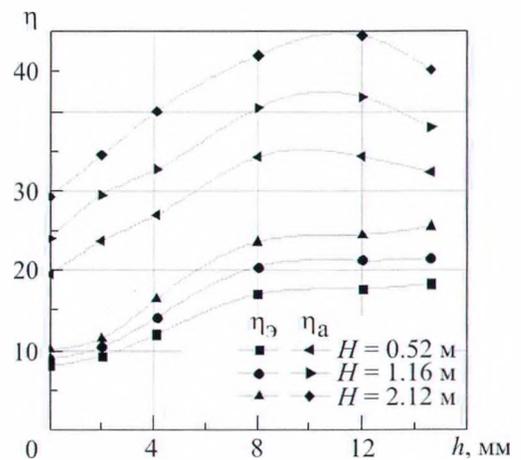


Рис. 5. Зависимости энергетической  $\eta_3$  и аэродинамической  $\eta_a$  эффективностей системы пучок–шахта от высот оребрения  $h$  и вытяжной шахты  $H$

**Заключение.** Оптимальная высота оребрения для пучков исследуемых труб с вытяжной шахтой составляет ~8 мм. Энергетическая и аэродинамическая эффективности для экспериментальной системы имеют низкие значения (менее 25 и 50% соответственно), что стимулирует развитие методов интенсификации теплоотдачи и повышение эффективности вытяжной шахты за счет оптимизации значений ее диаметра и высоты.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта "Создание и развитие научного центра мирового уровня "Передовые цифровые технологии" по приоритету научно-технологического развития "Передовые цифровые технологии и искусственный интеллект, роботизированные системы, материалы нового поколения" соглашение № 075-15-2022-312 от 20 апреля 2022 года.

### Обозначения

$a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $c_p$  — средняя изобарная теплоемкость воздуха,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $d$  — наружный диаметр оребрения трубы, м;  $d_0$  — диаметр оребрения по основанию, м;  $d_{\text{ш}}$  — диаметр вытяжной цилиндрической шахты, м;  $Eu$  — число Эйлера;  $F$  — площадь теплоотдающей оребренной поверхности трубы,  $\text{м}^2$ ;  $f_{\text{сж}}$  — сжатое поперечное сечение пучка,  $\text{м}^2$ ;  $g$  — ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;  $H$  — высота вытяжной шахты, м;  $H_{\text{п-ш}}$  — относительная высота системы пучок–шахта;  $h$  — высота ребер трубы, м;  $h_{\text{диф}}$  — высота диффузора над пучком, м;  $l$  — длина теплоотдающей оребренной части трубы, м;  $m$  — число обогреваемых труб в первом ряду пучка, шт;  $Nu$  — число Нуссельта;  $Pr$  — число Прандтля;  $Q_k$  — конвективный тепловой поток, Вт;  $Q_{\text{л}}$  — лучистый тепловой поток, Вт;  $Q_{\text{п}}$  — тепловые потери через торцы труб и токоподводы, Вт;  $Ra$  — число Рейнольдса;  $Re$  — число Рейнольдса;  $S_1$  — поперечный шаг установки труб в пучке, м;  $s$  — шаг ребер трубы, м;  $t_{\text{ст}}$  — 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,  $^\circ\text{C}$ ;  $W$  — электрическая мощность, подводимая к калориметру, Вт;  $w$  — скорость воздуха в сжатом сечении пучка,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $z$  — число рядов в пучке, шт.;  $\alpha_k$  — средний приведенный конвективный коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_{\text{л}}$  — средний приведенный лучистый коэффициент теплоотдачи, отнесенный к полной наружной поверхности,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\varphi$  — коэффициент оребрения трубы;  $\Delta$  — средняя толщина ребра, м;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности воздуха,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\lambda_{\text{тр}}$  — коэффициент гидравлического трения;  $\nu$  — коэффициент кинематической вязкости воздуха,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\beta$  — коэффициент температурного расширения,  $\text{K}^{-1}$ ;  $\rho$  — средняя плотность воздуха в пучке,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{ш}}$  — средняя плотность воздуха в шахте,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\theta_i$  — относительный перепад температуры на пучке;  $\theta$  — относительная разность плотностей;  $\sigma_1$  — относительный поперечный шаг;  $\chi$  — коэффициент загромождения оребренными трубами поперечного сечения пучка для прохода воздуха;  $\chi_{\text{отв}}$  — соотношение площади проходного сечения шахты к площади фронтального сечения пучка;  $\chi_{\text{кр}}$  — коэффициент отверстия в крышке;  $\eta_a$  — аэродинамическая эффективность системы пучок–шахта;  $\eta_3$  — энергетическая эффективность системы пучок–шахта.

### Литература

1. Богословский В. Н., Сканава А. Н. *Отопление*. Москва: Стройиздат, 1991.
2. Кунтыш В. Б., Самородов А. В. Исследование влияния угла наклона круглоребристых труб на свободно-конвективный теплообмен шахматного пучка в неограниченном объеме воздуха. *Инженерно-физический журнал*. 2010. Т. 83, № 2. С. 338–344.
3. Соколов П. В. *Проектирование сушильных и нагревательных установок для древесины*. Москва: Лесная промышленность, 1965.
4. Кунтыш В. Б., Позднякова А. В., Мелехов В. И. Теплоотдача естественной конвекцией одиночного ряда вертикальных оребренных труб калориферов лесосушильных камер. *Известия высших учебных заведений. Лесной журнал*. 2002. № 2. С. 116–119.
5. Зорин В. М. *Атомные электростанции: учебное пособие*. Москва: Издательский дом МЭИ, 2012.
6. Васильев Ю. Н., Марголин Г. А. *Системы охлаждения компрессорных и нефтеперекачивающих станций*. Москва: Недра, 1977.
7. 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.
8. Кунтыш В. Б., Самородов А. В., Самыслов А. И. Экспериментальная установка и методика исследования теплоотдачи пучков из оребренных труб при смешанной конвекции воздуха. *Сб. научных трудов. Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов*. Архангельск, 1998. Вып. 4. С. 139–149.
9. Сухоцкий А. Б., Маршалова 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. Т. 61, № 6. С. 552–563; <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-6-552-563>.

10. **Маршалова Г. С., Сухоцкий А. Б., Кунтыш В. Б.** Повышение энергосбережения в аппаратах воздушного охлаждения интенсификацией внешнего теплообмена. *Химическое и нефтегазовое машиностроение.* 2020. № 1. С. 3–7.

11. **Маршалова Г. С., Сухоцкий А. Б.** Аэродинамическое сопротивление при малых числах Рейнольдса и методика расчета скорости воздуха в одно- и многорядных оребренных пучках с вытяжной шахтой. *Весті Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-матэматычных навук.* 2021. Т. 57, № 1. С. 108–118; <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2021-57-1-108-118>.

12. **Сухоцкий А. Б., Маршалова Г. С., Здитовская 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.

13. **Сухоцкий А. Б., Данильчик Е. С.** Конвективная теплоотдача однорядных пучков из труб с накатными алюминиевыми ребрами различной высоты при малых числах Рейнольдса. *Энергетика. Известия вузов и энергетических объединений СНГ.* 2021. Т. 64, № 4. С. 336–348.

14. **Данильчик Е. С.** Экспериментальные исследования теплоотдачи одиночной биметаллической ребристой трубы с различной высотой оребрения к воздуху в режиме свободной конвекции. *Тепло- и массоперенос–2019: сборник научных трудов.* Минск: Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 2020. С. 42–52.

15. **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.

16. **Сидорик Г. С.** Экспериментальный стенд для исследования тепловых и аэродинамических процессов смешанно-конвективного теплообмена круглоребристых труб и пучков. *Труды БГТУ. Сер. 1. Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов.* 2018. № 1. С. 85–93.

17. **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>.

18. **Сухоцкий А. Б., Сидорик Г. С.** Исследование смешанноконвективной теплоотдачи однорядных воздухоохлаждаемых теплообменников при различных поперечных шагах установки труб. *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики.* 2017. № 19. С. 3–11.

19. **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>.