

## ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОАЭРОДИНАМИЧЕСКИХ И ГАБАРИТНО-МАССОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШАХМАТНЫХ СТЕСНЕННЫХ ПУЧКОВ ТРУБ СО СПИРАЛЬНО-НАКАТНЫМИ РЕБРАМИ

Докт. техн. наук, проф. КУНТЫШ В. Б., канд. техн. наук, доц. СЕНИН Н. Н.

*Архангельский государственный технический университет*

К настоящему времени достаточно полно изучены теплоотдача и гидравлическое сопротивление внешнеобтекаемых шахматных пучков из труб со спиральными и кольцевыми ребрами, в которых максимальная скорость потока находится в сжатом поперечном (фронтальном) сечении пучка. Шахматные оребренные пучки с максимальной скоростью в сжатом диагональном сечении называются стесненными [1], и для них характерно свободное расположение труб в поперечных рядах с тесным поджатым расположением их в продольных рядах. При таких компоновках труб при обтекании их потоком появляются новые гидродинамические явления, которые не наблюдаются в традиционных шахматных компоновках. Вместе с тем расчетные критериальные уравнения теплоотдачи и аэродинамического сопротивления фактически построены по опытным данным традиционных пучков из-за ограниченных исследований стесненных пучков: в [1] приводятся результаты по 5, в [2] – по 12, в [3] – по 4, в [4] – по 5 пучкам. Обобщенные уравнения для расчета теплоотдачи и сопротивления стесненных оребренных пучков в широком интервале изменения компоновочных характеристик не использовались по указанной причине. Кроме теоретического, исследование таких пучков обусловливается практическим интересом ввиду их распространенного применения в теплосберегающих установках, например в теплоуловителях сушильной части бумаго- и картоноделательных машин, теплоутилизаторах сушильных камер.

Цель работы – дальнейшее расширение и накопление банка опытных данных по теплоотдаче и сопротивлению шахматных стесненных пучков из оребренных труб в поперечном потоке воздуха.

Объектом экспериментального исследования являлись шахматные пучки, собранные из биметаллических круглых труб с накатными алюминиевыми ребрами  $d \times d_0 \times h \times s \times \Delta = 55,85 \times 25,85 \times 15,0 \times 2,56 \times 0,75$  мм. Коэффициент оребрения трубы  $\varphi = 19,9$ . Ребра накатаны на стальной несущей трубе наружного диаметра  $d_n = 25$  мм с толщиной стенки  $\delta = 2$  мм. Трубы снаружи омывались принудительным перпендикулярным потоком воздуха с начальной температурой 15...18 °С. Для проведения опытов использовали аэродинамическую трубу [4] разомкнутого типа с поперечным сечением рабочего участка 350 × 350 мм, работающую по нагнетательной схеме.

Теплоотдачу определяли методом локального теплового моделирования при помощи одного парозлектрического калориметра [4], последовательно устанавливаемого в середине 1-го, 2-го, 3-го, 4-го поперечных рядов пучка. Теплоотдачу 5-го и 6-го рядов принимали равной теплоотдаче стабилизированных рядов, которыми в исследованных пучках являлись третий и последующий [4, 5]. Температура кипения воды в калориметре составляла  $\approx 100$  °С. Приведенный коэффициент  $\alpha_i$  теплоотдачи

$i$ -го поперечного ряда пучка определяли по конвективному тепловому потоку, отнесенному к полной наружной поверхности  $F$  оребрения трубы-калориметра и арифметической разности средних температур трубы у основания ребер и потока воздуха перед пучком в рабочем участке. Приведенный средний коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  вычисляли арифметическим усреднением коэффициента теплоотдачи  $\alpha_i$  всех рядов пучка.

Компоновочными параметрами шахматного пучка являются поперечный  $S_1$ , продольный  $S_2$ , диагональный  $S_2'$  шаги расположения труб в решетке; относительные поперечный  $\sigma_1 = S_1/d$ , продольный  $\sigma_2 = S_2/d$ , диагональный  $\sigma_2' = S_2'/d$  шаги; коэффициент компактности  $\Pi = \pi d_0 \phi / (S_1 S_2)$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ; конструктивный симплекс, иногда называемый коэффициентом формы пучка, вычисляемый без учета влияния размеров ребер трубы по соотношению

$$\beta = (S_1 - d_0) / (S_2' - d_0) \quad (1)$$

или с учетом размеров ребер

$$\beta' = \left( S_1 - d_0 - \frac{2h\Delta}{s} \right) / \left( S_2' - d_0 - \frac{2h\Delta}{s} \right), \quad (2)$$

где  $d_0 = d - 2h$  — диаметр трубы у основания ребер;  $d$  — наружный диаметр ребер;  $h$ ,  $s$ ,  $\Delta$  — высота, шаг и средняя толщина ребра.

Вычисление коэффициента  $\beta$  по (1) производится аналогично его расчету в гладкотрубных пучках, где  $\beta = (S_1 - d_H) / (S_2' - d_H)$ .

Коэффициенты загромождения сжатого поперечного и диагонального сечений оребренного пучка вычисляли по формулам:

$$\chi_{\text{фр}} = 1 - \frac{1}{S_1} \left( d_0 + \frac{2h\Delta}{s} \right); \quad (3)$$

$$\chi_{\text{д}} = \frac{1}{S_1} \left[ 2(S_2' - d_0) - \frac{4h\Delta}{s} \right]. \quad (4)$$

Скорости воздуха в поперечном  $w$  и диагональном  $w_{\text{д}}$  сжатых сечениях связаны между собой соотношением

$$w_{\text{д}} = w \chi_{\text{фр}} / \chi_{\text{д}}. \quad (5)$$

Анализ (3)–(5) показывает, что для пучка с  $\chi_{\text{фр}} > \chi_{\text{д}}$  наиболее загроможденным (сжатым) является диагональное сечение, в котором скорость воздуха наибольшая. Следовательно, шахматные пучки с  $\chi_{\text{фр}} > \chi_{\text{д}}$  относятся к группе стесненных. При  $\chi_{\text{фр}} = \chi_{\text{д}}$  скорость потока в сжатых поперечном и диагональном сечениях одинакова, достигается геометрическая равнопроходность пучка в этих сечениях. Каждому значению  $\chi$  соответствует единственное значение конструктивного симплекса  $\beta$  пучка. У гладкотрубных пучков геометрическая равнопроходность достигается всегда при  $\beta = 2$ , тогда как в равнопроходных оребренных пучках всегда  $\beta < 2$ , и в общем для таких пучков значение

$\beta = \text{var}$ , так как даже при постоянных величинах шагов  $S_1, S_2$  оно зависит от геометрических размеров ребер.

Опыты проведены с пучками I, II, III, у которых  $S_1 = 117$  мм,  $\sigma_1 = 2,09$ , а  $\chi_{\text{фр}} = 0,709$ . В нечетных поперечных рядах каждого пучка установлены по три цельных трубы, а в четных — по две, но с боковых сторон у этих рядов расположены полутрубы, обеспечивающие одинаковое по воздуху сечение каждого поперечного ряда. Конструкторско-компоновочные параметры пучков даны в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики оребренных пучков

Параметр или коэффициент	Ряд	Номер пучка		
		I	II	III
$S_2$ , мм		53,79	37,52	29,41
$S_2'$ , мм		79,5	69,5	65,5
$\sigma_2$		0,963	0,672	0,526
$\sigma_2'$		1,423	1,244	1,173
$\chi_d$		0,776	0,605	0,537
$\beta$		1,7	2,09	2,30
$\beta'$		1,836	2,362	2,669
$\Pi$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>		257,0	367,0	470,0
$C_i \cdot 10$	1	1,343/1,343	1,800/1,800	1,911/1,620
	2	0,508/0,508	0,891/0,800	0,907/0,739
	3–6	0,576/0,576	0,891/0,825	0,907/0,739
$n_i$	1	0,60	0,58	0,58
	2–6	0,72	0,67	0,67
$C \cdot 10$	—	0,638/0,638	0,966/0,882	0,983/0,802
$n$	—	0,70	0,66	0,66
$B$	—	20,06/20,06	35,06/27,06	52,85/33,41
$m$	—	0,26	0,32	0,36

Примечание. Данные в числителе относятся к обработке результатов по скорости в сжатом поперечном сечении, в знаменателе — по максимальной скорости в соответствующем сечении пучка.

Равнопроходность пучков для исследованных труб с шагом  $S_1 = 117$  мм наступает при  $S_2' = 75,6$  мм, а  $\beta = 1,83$ . Следовательно, опытные пучки II, III являются стесненными. Пучок I исследовали в качестве базового для сравнительного анализа результатов по стесненным пучкам. Учет влияния размеров ребер трубы на изменение величины конструктивного симплекса сопровождается увеличением ее на 8...16 % (табл. 1) (значения  $\beta'$  по сравнению с  $\beta$ ). Однако по сложившейся практике расчетов, и для предельного перехода [1] от оребренных пучков к гладкотрубным принято вычислять  $\beta$  по (1).

Опытные данные по приведенным коэффициентам теплоотдачи и аэродинамического сопротивления пучка обрабатывали в числах подобия:

$$Nu_i = \alpha_i d_0 / \lambda; \quad Nu = \alpha d_0 / \lambda; \quad Re = w d_0 / \nu \quad \text{или}$$

$$Re = w_d d_0 / \nu; \quad Eu = \Delta p / (\rho w^2) \quad \text{или} \quad Eu = \Delta p / (\rho w_d^2),$$

где  $\Delta p$  — перепад статического давления воздуха в пучке, Па.

Физические свойства воздуха  $\lambda$ ,  $\nu$ ,  $\rho$  принимали по его средней температуре в пучке.

Результаты опытов обобщены критериальными уравнениями подобия в степенной форме:

$$Nu_i = C_i Re^{n_i}; \quad (6)$$

$$Nu = C Re^n; \quad (7)$$

$$Eu = B Re^{-m}. \quad (8)$$

Значения констант  $C_i$ ,  $C$ ,  $B$ ,  $n_i$ ,  $n$ ,  $m$  даны в табл. 1. Числа  $Eu$  вычислены для шести рядов.

Максимальная относительная среднеквадратичная погрешность определения чисел  $Nu_i$ ,  $Re$ ,  $Eu$  не превышала 3,5; 3,2 и 4,1 % соответственно. Среднеквадратичная ошибка при расчете значений  $C_i$ ,  $C$ ,  $B$ ,  $n_i$ ,  $n$ ,  $m$  не превышает 2,8 %.

Уравнения (6)–(8) действительны в диапазоне  $Re = (2,5...25) \cdot 10^3$  при условии обработки данных по скорости воздуха  $w$  в сжатом поперечном сечении пучка.

На рис. 1, 2 приведены экспериментальные материалы по теплоотдаче различных рядов, а в нижней части этих рисунков – средней теплоотдаче пучков I, II, III для случаев вычисления значения чисел  $Re$  по скорости воздуха в сжатом поперечном и диагональном сечении пучков. Анализ расположения линий  $Nu_i = f(Re)$  указывает на стабилизацию теплоотдачи в стесненных пучках II, III со второго ряда, а теплоотдача 1-го ряда пониженная, и с ростом значений  $Re$  расхождение в теплоот-

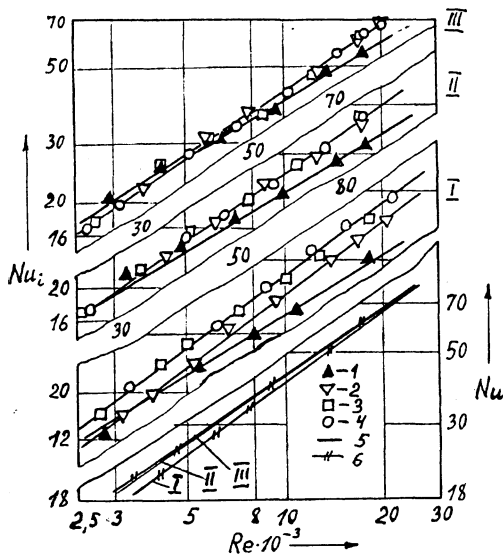


Рис. 1. Теплоотдача пучков по скорости воздуха в сжатом поперечном сечении: I, II, III – номера пучков; 1, 2, 3, 4 – опытные точки для 1-, 2-, 3-, 4-го рядов пучка; 5 – по (6); 6 – средняя теплоотдача пучка по (7)

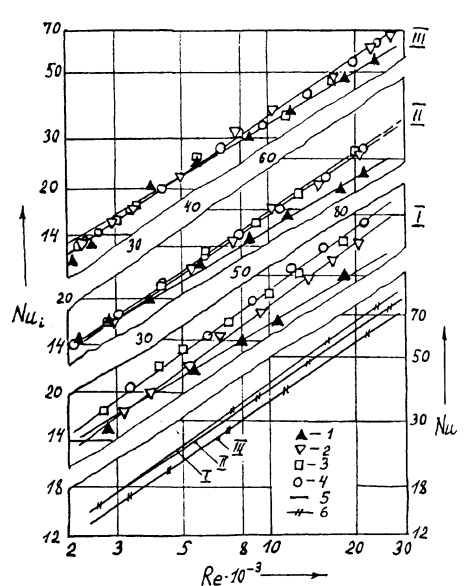


Рис. 2. Теплоотдача пучков по скорости воздуха в сжатом диагональном сечении (обозначения те же, что на рис. 1)

даче рядов увеличивается, достигая при  $Re = 20 \cdot 10^3$  величины в 20,7 и 15,7 % соответственно для пучков II, III. Полученная картина изменения теплоотдачи по рядам пучков не зависит от выбора скорости воздуха в числе  $Re$ , однако отличается от ранее полученных данных для стесненных пучков с близкими параметрами относительных шагов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , но собранных из труб такой же конструкции с другими геометрическими размерами ребер [3]. Стабилизация теплоотдачи в стесненных пучках наступала с 3-го ряда [3], а теплоотдача 2-го ряда занимала промежуточное положение между аналогичными характеристиками 1-го и 3-го рядов. Для установления и объяснения причины расхождения необходимо дальнейшее накопление опытных данных по тепловым характеристикам стесненных пучков.

В базовом пучке I теплоотдача стабилизируется с 3-го ряда, теплоотдача 2-го ряда меньше на 13 % во всем диапазоне  $Re$ , а интенсивность теплоотдачи 1-го ряда при  $Re = 3 \cdot 10^3$  составляет 87 % от теплоотдачи стабилизированного ряда, но при  $Re = 20 \cdot 10^3$  разрыв в уровнях теплоотдачи достигает 71 %. Полученные результаты хорошо согласуются с исследованиями пучков близких компоновочных параметров [1, 3].

Линия теплоотдачи на рис. 1, 2 стабилизированных рядов располагается более круто по сравнению с аналогичной характеристикой 1-го ряда, что является отражением повышения уровня турбулентности межтрубного потока воздуха, генерируемой 1-м рядом пучка, исполняющего роль турбулизирующей решетки. При обработке опытных данных по скорости воздуха в сжатом поперечном сечении теплоотдача 1-го ряда пучков II, III при  $Re = idem$  выше теплоотдачи такого ряда базового пучка. Например, для  $Re = 20 \cdot 10^3$  рост теплоотдачи составил 10 и 17 % соответственно для пучков II и III по сравнению с теплоотдачей 1-го ряда пучка I. В случае обработки данных по максимальной скорости воздуха, которая в стесненных пучках находится в сжатом диагональном сечении, картина изменения теплоотдачи 1-го ряда несколько иная. Для  $Re = 20 \cdot 10^3$  в пучке II теплоотдача повысилась на 10 %, что естественно из-за поджатия потока в кормовой области 2-м рядом труб вследствие меньшего значения  $S_2$  по сравнению с этим параметром пучка I. Но в пучке III теплоотдача 1-го ряда снизилась приблизительно до значений теплоотдачи такого ряда базового пучка I, несмотря на дальнейшее уменьшение шага  $S_2$ . Схожая картина относительного изменения теплоотдачи при обработке опытов по  $w$  и  $w_d$  характерна также для стабилизированных рядов.

В нижней части рис. 1, 2 изображены графики средней теплоотдачи пучков I...III, соответствующие функциональной зависимости  $Nu = f(Re)$ . Анализ показывает, что линии средней теплоотдачи пучков распадаются независимо от выбора определяющей скорости, причем величина расслоения приблизительно одинакова при вычислении значения  $Re$  по  $w$  или  $w_d$ , но порядок относительного расположения линий теплоотдачи меняется. При обобщении по  $w$  для  $Re = idem$  меньшие значения  $Nu$  характерны для пучка I, далее располагаются данные для пучков II и III, причем числа  $Nu$  стесненных пучков различаются между собой не более 1,7 %. В случае использования при обобщении скорости  $w_d$  значения  $Nu$  для базового пучка наибольшие и превышают соответствующие значения  $Nu$  пучка III в среднем на 15 %. Числа  $Nu$  пучка II на 10 % больше соответствующих значений для пучка III. Полученный характер изменения средней теплоотдачи стесненных пучков не противоречит результатам исследований [2, 3].

Опытные данные для шести рядов по аэродинамическому сопротивлению пучков I...III нанесены на рис. 3. Линии сопротивления пучков имеют различный наклон, которому соответствуют разные значения показателя степени  $m$  в (8). С ростом симплекса  $\beta$  абсолютное значение  $m$  также увеличивается (табл. 1). При вычислении  $Re$  и  $Eu$  по скорости  $w$  для одинаковых  $Re$  численные значения  $Eu$  стесненных пучков возрастают, а в случае использования скорости  $w_d$  значения  $Eu$  уменьшаются. Наглядное представление об этом дают следующие пропорции: при расчете по  $w$  для  $Re = 3 \cdot 10^3 - Eu/Eu_I = 1 : 1,08 : 1,18$ ; для  $Re = 20 \cdot 10^3 - Eu/Eu_I = 1 : 0,965 : 0,978$ ; при расчетах по  $w_d$  для этих же чисел  $Re$  получается соответственно соотношение  $1 : 0,836 : 0,748$  и  $1 : 0,744 : 0,618$ . Здесь  $Eu_I$  — значение числа Эйлера для пучка I, а  $Eu$  — то же, для пучков I, II, III.

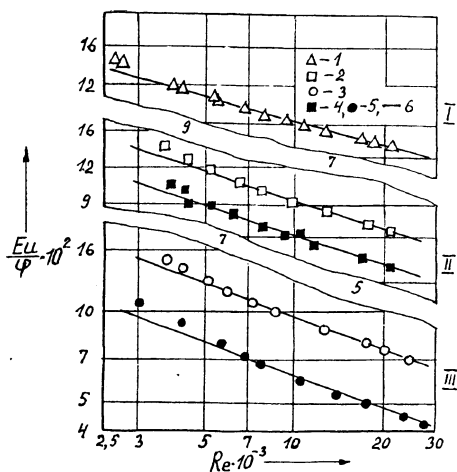


Рис. 3. Аэродинамическое сопротивление пучков: I, II, III — номера пучков; 1, 2, 3 — опытные точки по скорости  $w$ ; 4, 5 — то же, по  $w_d$ ; 6 — то же, по (8)

Средняя теплоотдача пучков I...III (рис. 4а) с разбросом опытных точек, не превышающим  $\pm 5\%$ , обобщается уравнением

$$Nu = 0,0788\beta^{0,15}Re^{0,67}, \quad (9)$$

которое действительно для  $\beta = 1,7...2,3$  и использования в качестве определяющей скорости  $w$ .

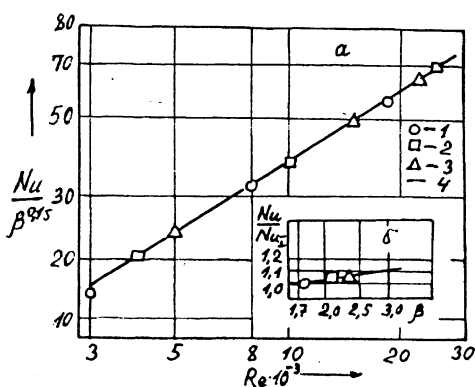


Рис. 4. Обобщение опытов по: а — средней теплоотдаче и б — влиянию параметра  $\beta$  на интенсивность теплоотдачи пучка по скорости воздуха в сжатом поперечном сечении; 1, 2, 3 — данные для пучков I, II, III; 4 — по (9)

При выборе определяющей скорости  $w_d$  средняя теплоотдача (рис. 5а) этих же пучков с разбросом опытных точек не более  $\pm 5\%$  обобщается уравнением

$$Nu = 0,0943\beta^{-0,25}Re^{0,67}. \quad (10)$$

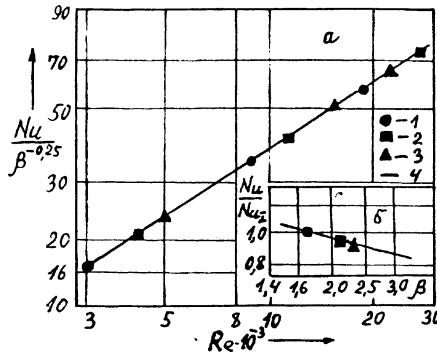


Рис. 5. Обобщение опытов по: а – средней теплоотдаче и б – влиянию параметра  $\beta$  на интенсивность теплоотдачи пучка по скорости воздуха в сжатом диагональном сечении; 1, 2, 3 – данные для пучков I, II, III; 4 – по (10)

Рис. 4б, 5б построены для  $Re = 10^4$ , на них  $Nu$  – число Нуссельта для пучков I, II, III;  $Nu_1$  – то же, для пучка I.

Для оценки тепловой эффективности, относительных габаритной и массовой характеристик пучков I...III была применена общеизвестная методика В. М. Антуфьева, в соответствии с которой выполнены расчеты в исследованном интервале числа  $Re$ . При одинаковой удельной затрате мощности  $N_0$ , Вт/м<sup>2</sup>, на прокачку воздуха приведенный коэффициент теплоотдачи стесненных пучков II, III на 4...7 % больше теплоотдачи базового пучка I во всем диапазоне изменения  $N_0$ . При  $N_0 = idem$  интенсивность теплоотдачи пучков II, III одинакова. При вычислении относительной габаритной характеристики, представляющей отношение объемов  $V/V_{эт}$  при  $N_0 = idem$  и  $Q = idem$ , за эталон принят пучок I с относительным объемом  $V_{эт} = 1$ . Получены следующие значения  $V/V_{эт}$  для пучков: II – 0,66; III – 0,52. Следовательно, объем пучка II на 34 %, а пучка III на 48 % меньше объема пучка I. Таким образом, стесненные пучки обладают более выгодной габаритной характеристикой по сравнению с традиционным шахматным пучком I. По относительной массовой характеристике пучки разделяются так же, как и по габаритной. Это связано с тем, что сравниваемые пучки собраны из однотипных труб, для которых масса 1 м<sup>2</sup> площади поверхности теплоотдачи  $b$ , кг/м<sup>2</sup>, одинакова.

В заключение нами выполнен анализ применимости существующих обобщенных критериальных уравнений Центрального котлотурбинного института имени И. И. Ползунова (ЦКТИ) [1], Архангельского лесотехнического института (АЛТИ) [4], Института физико-технических проблем энергетики (ИФТПЭ) АН Литовской ССР [5] и Киевского политехнического института (КПИ) совместно с ЦКТИ [6] для расчета теплоотдачи и аэродинамического сопротивления поперечно обтекаемых пучков из круглорезбистых труб к исследованным опытным пучкам I...III. Сравнивали расчетные значения средних приведенных  $\alpha_p$  и опытных  $\alpha_0$  коэффициентов теплоотдачи и перепадов давления воздуха в

пучке  $\Delta p_p$  и  $\Delta p_o$ , выполненных по указанным обобщенным уравнениям и частным уравнениям (7), (8). Расчеты произведены для средней температуры воздуха 50 °С, его скоростей 1,736 и 17,36 м/с в сжатом поперечном сечении пучка, которые соответствуют концам изученного интервала по  $Re = 2500$  и  $25000$ . Связь приведенного коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  с конвективным  $\alpha_k$ , коэффициент неравномерности распределения конвективной теплоотдачи по ребру  $\psi_p$ , определяющий линейный размер  $l$ , эквивалентный диаметр  $d_3$  наименьшего проходного сечения пучка для воздуха определяли по формулам [1]. Коэффициент эффективности  $E$  круглого спирального ребра находили по номограммам [4]. Поправку на локальный метод моделирования теплоотдачи вводим в значения  $\alpha_o$  по данным [1, 4]. Расчет  $d_3$  для пучка I выполняли по  $S_1$ , для пучков II, III – по  $S_2'$ . Для пучков I, II, III получено  $l = 43,22$  мм. В качестве расчетной в анализируемых методиках [1, 4–6] принята средняя скорость в наименьшем проходном сечении пучка.

Величину отклонения между расчетными и опытными значениями теплоотдачи и сопротивления, %, определяли по формулам:

$$\delta = \frac{\alpha_p - \alpha_o}{\alpha_p} 100; \quad \delta_1 = \frac{\Delta p_p - \Delta p_o}{\Delta p_p} 100. \quad (11)$$

Сравнение опытных и расчетных значений тепло- и аэродинамических характеристик пучков I...III приведено в табл. 2. Числовые опытные значения  $\alpha_{oc}$  соответствуют теплоотдаче стабилизированных рядов пучков I...III. В методике [4] обобщенные уравнения даются для теплоотдачи стабилизированных рядов, измеренной локальным моделированием.

Поэтому при расчетах по (11) значений  $\delta$  для этой методики вместо  $\alpha_p$  и  $\alpha_o$  соответственно подставляли  $\alpha_{pc}$  и  $\alpha_{oc}$ .

Анализ табл. 2 показывает, что наилучшее совпадение по теплоотдаче расчетных и опытных величин обеспечивает методика КПИ–ЦКТИ, а методика АЛТИ – лишь в области  $Re \geq 8000$  ( $w \geq 5,2$  м/с). При  $Re < 8000$

Таблица 2

Результаты сравнения теплоаэродинамических характеристик пучков

Параметры	Источник	Значения параметров для номера пучка при $w$ , м/с					
		1,736			17,36		
		I	II	III	I	II	III
$\alpha_o$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	–	16,67	18,72	18,41	83,58	85,57	84,16
$\Delta p_o$ , Па		8,64	9,51	10,38	474,4	455,4	453,2
$\alpha_{oc}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)		17,60	18,97	18,4	92,39	88,72	86,06
$\Delta p_p$ , Па	[1]	9,53	16,3	20,8	537,5	915,3	1169,0
$d_3$ , мм		12,95	5,48	4,85	12,95	5,48	4,85
$\delta_1$ , %		9,3	41,7	50,0	11,3	59,2	61,2
$\alpha_p$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	[4]	18,93	21,72	23,80	90,50	104,10	112,50
$\delta$ , %		35,8	41,3	49,3	1,37	–4,3	–13,0
$\alpha_{pc}$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	[5]	22,4	28,1	24,4	109,7	135,7	153,2
$\delta$ , %		21,2	32,4	24,6	15,8	33,2	43,8
$\alpha_p$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	[6]	14,8	12,5	14,8	85,1	80,7	98,4
$\delta$ , %		18,2	–2,7	18,6	–4,9	–34,6	–29,9
$\Delta p_p$ , Па		8,64	10,47	10,80	485,7	631,0	710,6
$\delta_1$ , %		0,0	9,6	3,9	2,2	27,9	36,0



расчетные значения теплоотдачи на 35...50 % превышают опытные. Приемлемое согласование по сопротивлению расчетных с опытными значениями обеспечивает методика КПИ–ЦКТИ, однако в области  $Re > 15000$  расчетные значения сопротивления стесненных пучков II, III оказываются завышенными в среднем на 30 %.

Таким образом, выполненная работа показала необходимость дальнейшего накопления банка экспериментальных данных теплоаэродинамических характеристик стесненных пучков для корректировки существующих методик расчета теплоотдачи и потери давления воздуха в таких пучках из труб со спиральными поперечными ребрами.

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ю д и н В. Ф. Теплообмен поперечно оребренных труб. – Л.: Машиностроение, 1982. – 189 с.

2. П и с ь м е н н ы й Е. Н., Л е г к и й В. М. К расчету теплообмена многорядных шахматных пучков с кольцевым поперечным оребрением // Теплоэнергетика. – 1984. – № 6. – С. 62–65.

3. К у н т ы ш В. Б. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление шахматных стесненных пучков из труб с накатными ребрами // Известия вузов. Лесной журнал. – 1991. – № 2. – С. 74–80.

4. К у н т ы ш В. Б., К у з н е ц о в Н. М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. – СПб.: Энергоатомиздат, 1992. – 280 с.

5. Ж у к а у с к а с А., У л и н с к а с Р. Теплоотдача поперечно обтекаемых пучков труб. – Вильнюс: Мокслас, 1986. – 204 с.

6. Р у к о в о д я щ и й технический материал РТМ 108.030.140–87. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребранных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов /НПО ЦКТИ. – СПб., 1988. – 31 с.

Представлена кафедрой  
промышленной теплоэнергетики

Поступила 7.09.2000

УДК 635.9:631.563

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕННОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ГИПОБАРИЧЕСКОМ ХРАНИЛИЩЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ В НЕМ ДАВЛЕНИЯ**

**Докт. техн. наук ПИСАРЕВ В. Е., канд. техн. наук ДАВЫДЕНКО Б. В.**

*Киевский национальный университет строительства и архитектуры*

Из принятой ранее в [1] физической модели процесса вентилирования гипобарического хранилища сельскохозяйственной продукции следует, что при изменении в нем абсолютного давления могут периодически совершаться два политропных процесса: сжатие воздуха с его нагревом и увлажнением и расширение воздуха с понижением его температуры и выделением влаги. В [1] рассмотрена задача определения температуры воздушной среды в гипобарическом хранилище при изменении в нем давления с учетом линейной зависимости влагосодержания