

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Торопов А. С. Необходимая мощность привода пил большого диаметра при групповой раскряжке хлыстов // Лесн. журн.—1980.— № 5.— С. 96—100.— (Изв. высш. учеб. заведений). [2]. Торопов А. С. К определению параметров процесса раскряжки цепной пилой с вращательным движением подачи // Лесн. журн.—1988.— № 4.— С. 43—48.— (Изв. высш. учеб. заведений).

Поступила 11 декабря 1990 г.

УДК 536.24

## ТЕПЛОБМЕН И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ШАХМАТНЫХ СТЕСНЕННЫХ ПУЧКОВ ИЗ ТРУБ С НАКАТНЫМИ РЕБРАМИ

В. Б. КУНТЫШ

Архангельский лесотехнический институт

Трубы с накатными алюминиевыми ребрами применяют в калориферах лесосушильных камер, паровых котлов, системах вентиляции и отопления промышленных цехов и зданий, в теплообменниках воздушного охлаждения технологических продуктов. При этом обеспечивается заметное улучшение массогабаритных характеристик аппарата и экономия цветного металла. Теплорекуператоры из подобных труб (коэффициент оребрения  $\varphi = 11 \dots 16$ ; внутренний диаметр 35...38 мм) с насыщенной зоной охлаждения паровоздушной смеси (ПВС) используют в сушильной части бумаго- и картоноделательных машин [2]. Ограниченные потери напора ПВС в межтрубном пространстве удовлетворяются компоновкой оребренных труб в шахматном пучке со свободным поперечным  $S_1$  и поджатым продольным  $S_2$  шагами. При таком размещении наиболее загроможденным (сжатым) межтрубным сечением является диагональное. Шахматные пучки, удовлетворяющие этому условию, называются стесненными.

Теплоаэродинамические характеристики стесненных пучков оребренных труб мало изучены [5]. Существующие экспериментальные данные не позволяют с достаточной надежностью проверить возможность применения обобщенных уравнений подобия [1, 3, 5] шахматных компоновок к расчету конвективной теплоотдачи и аэродинамического сопротивления.

Цель настоящей работы — восполнить обнаруженные пробелы в проектировании компактных теплорекуператоров, что послужило основой при выборе геометрических размеров и характеристик объектов исследования.

Опыты проводили на биметаллических трубах Талинского машиностроительного завода им. Лауристана с накатными однозаходными алюминиевыми ребрами. Геометрические размеры ребер и трубы в мм: наружный диаметр ребра  $d = 69,5$ ; высота  $h = 14,8$ ; шаг  $s = 3$ ; средняя толщина ребра  $\Delta = 0,6$ ; диаметр трубы у основания ребра  $d_0 = d - 2h = 39,9$ ;  $\varphi = 14,67$ . Из этих труб собирали шахматные шестирядные пучки I—V, обтекаемые снаружи перпендикулярным потоком воздуха. При этом  $S_1 = 133$  мм, что соответствует относительному поперечному шагу  $\sigma_1 = S_1/d = 1,914$ . Пучки устанавливали вертикально в центре рабочего участка сечением  $400 \times 400$  мм разомкнутой аэродинамической трубы [4]. Теплоотдачу изучали локальным тепловым моделированием при помощи парозлектрического калориметра с температурой кипения воды  $\approx 100$  °С.

Методика исследования и обработки опытных данных изложена в работе [4]. Полученные геометрические характеристики пучков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	Числовые значения параметров для номера пучка				
	I	II	III	IV	V
$S_2$ , мм	66,44	55,16	48,00	40,76	36,00
$S_2'$ , мм	94,0	86,4	82,0	78,0	75,6
$\sigma_2$	0,956	0,794	0,690	0,586	0,518
$\sigma_2'$	1,350	1,240	1,180	1,122	1,088
$\beta$	1,72	2,00	2,21	2,44	2,61
$\chi_{фр}$	0,656	0,656	0,656	0,656	0,656
$\chi_д$	0,725	0,615	0,545	0,485	0,449
$\Pi$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	208	251	288	339	384

Примечание.  $\sigma_2$ ,  $\sigma_2'$  — относительные продольный и диагональный шаги:  $\sigma_2 = S_2/d$ ;  $\sigma_2' = S_2'/d$ .

Компоновочные характеристики пучка — коэффициент компактности  $\Pi = \pi d_0 \varphi / S_1 S_2$  и безразмерный конструктивный симплекс  $\beta$ , обычно рассчитываемый без учета влияния ребер по соотношению для гладкотрубной поверхности  $\beta = (S_1 - d_0) / (S_2' - d_0)$  [5]. Коэффициенты загромождения сжатого фронтального и диагонального сечений пучка вычисляли по формулам

$$\chi_{фр} = 1 - (d_0 + 2h\Delta/s) / S_1; \tag{1}$$

$$\chi_д = [2(S_2' - d_0) - 4h\Delta/s] / S_1. \tag{2}$$

где  $S_2'$  — среднедиагональный шаг.

Приведенные в табл. 1 значения  $\chi_{фр}$  и  $\chi_д$  определяли с учетом монтажных размеров опытных пучков. Скорости воздуха в диагональном  $w_д$  и фронтальном  $w$  сжатых сечениях пучка связаны между собой соотношением

$$w_д = w \chi_{фр} / \chi_д. \tag{3}$$

Наиболее загроможденное сечение (см. табл. 1) в пучках II—V — диагональное, так как  $\chi_{фр} > \chi_д$  (эти пучки относят к группе стесненных). Максимальная скорость воздуха в пучках II—V соответствует диагональному сечению, а в пучке I, который является базовым по отношению к стесненным, она находится во фронтальном загроможденном сечении. Разнопроходность пучка устанавливают равенством  $\chi_{фр} = \chi_д$ , откуда при  $S_1 = 133$  мм для изучаемой геометрии труб  $S_2' = 89,5$  мм, а  $\beta = 1,877$ . Для гладкотрубных пучков это условие всегда соблюдается при  $\beta = 2$ .

В экспериментах определяли приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha_i$   $i$ -го ряда пучка, а затем рассчитывали средний приведенный коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  [4]. Значения  $\alpha_i$  и  $\alpha$  вычислены по полной наружной площади поверхности оребрения калориметрической трубы. Измерения теплоотдачи проводили в 1, 2, 3 и 4-м рядах. Опытные данные по приведенным коэффициентам теплоотдачи и аэродинамическому сопротивлению пучка обрабатывали и представляли в числах подобия  $Nu_i$ ,  $Nu$ ,  $Re$  и  $Eu$ . За линейный размер принимали диаметр трубы  $d_0$ . Критерии  $Re$  и  $Eu$  вычисляли по скорости воздуха в сжатом фронтальном сечении  $w$  и максимальной скорости в диагональном сечении  $w_д$ . Максимальная относительная среднеквадратичная погрешность определения чисел  $Nu_i$ ,  $Re$ ,  $Eu$  не превышала 3,9; 3,5 и 4,8 % соответственно.

Теплоотдача различных рядов пучков I—V изображена опытными точками на рис. 1, а сопротивление шести рядов пучков — на рис. 2.

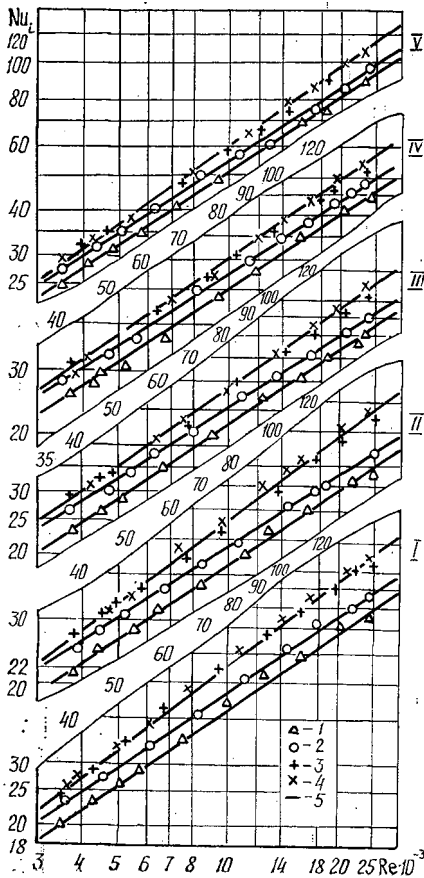


Рис. 1. Теплоотдача различных рядов пучков: I, II, III, IV, V — номера пучков; 1, 2, 3, 4 — опытные точки для 1-, 2-, 3-, 4-го рядов пучка; 5 — рассчитанные по уравнению (4)

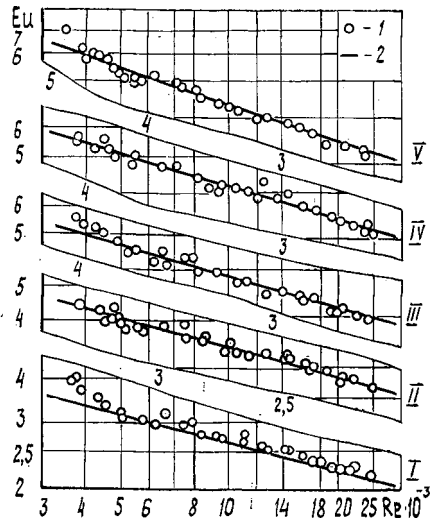


Рис. 2. Аэродинамическое сопротивление пучков: I, II, III, IV, V — номера пучков; 1 — опытные точки; 2 — рассчитанные по уравнению (5)

На этих рисунках значения критериев  $Re$  и  $Eu$  подсчитаны по скорости воздуха в сжатом фронтальном сечении пучков. С помощью критериальных уравнений определены теплоотдача  $i$ -го ряда и средняя теплоотдача пучков I—V

$$Nu_i = C_i Re^{n_i}; \quad Nu = C Re^n \quad (4)$$

и аэродинамическое сопротивление

$$Eu = B Re^{-m} \quad (5)$$

Значения коэффициентов пропорциональности  $C_i$ ,  $C$ ,  $B$  и показателей степени  $n_i$ ,  $n$ ,  $m$  даны в табл. 2.

Уравнения (4) и (5) действительны в диапазоне  $Re = (3 \dots 25) \times 10^3$  при условии обработки результатов по скорости  $w$ .

Анализ графиков (см. рис. 1) и значений коэффициентов  $C_i$ ,  $n_i$  (см. табл. 2) показывает, что стабилизация теплоотдачи в пучках I—V наступает с 3-го ряда. Теплоотдача 1-го и 2-го рядов пониженная, при этом ее наименьшие значения характерны для 1-го ряда. По интенсивности теплообмена 2-й ряд занимает промежуточное положение между 1-м и стабилизированными рядами, а кривая  $Nu_i = f(Re)$  этого ряда располагается более полого по отношению к кривым теплоотдачи остальных рядов.

Таблица 2

Коэффициенты	Ряд	Расчетные значения коэффициентов критериальных уравнений для пучка				
		I	II	III	IV	V
$n_l$	1	0,70	0,67	0,67	0,67	0,67
	2	0,67	0,64	0,64	0,64	0,64
	3, 4	0,75	0,75	0,70	0,70	0,70
$n$	—	0,72	0,71	0,68	0,68	0,68
	$t$	—	0,25	0,28	0,28	0,30
$C_l$	1	0,067	0,090	0,097	0,102	0,109
		0,067	0,086	0,085	0,083	0,085
	2	0,098	0,134	0,143	0,149	0,155
		0,098	0,128	0,127	0,123	0,122
	3, 4	0,056	0,057	0,091	0,094	0,097
		0,056	0,054	0,080	0,076	0,074
$C$	—	0,069	0,077	0,104	0,108	0,112
	—	0,069	0,073	0,092	0,088	0,087
$B$	—	26,84	44,86	51,10	66,04	100,8
	—	26,84	40,04	37,15	39,52	53,72

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

В базовом пучке I при  $Re = 3 \cdot 10^3$  теплоотдача 1-го ряда составляет 81 % от теплоотдачи стабилизированного ряда, но при  $Re = 25 \cdot 10^3$  разрыв в уровнях теплоотдачи достигает 70 %. В стесненных пучках II—V с уменьшением  $S_2$  наблюдают непрерывное сокращение разрыва между теплоотдачей этих рядов. Для пучка V с сильно поджатым  $S_2$  количественное соотношение между рядами равно 88 % при  $Re = 3 \cdot 10^3$  и 83 % при  $Re = 25 \cdot 10^3$ . В целом, меньшим  $S_2$  в стесненных пучках отвечают большие значения теплоотдачи как отдельных рядов, так и средние значения ее для пучка.

Однако эффект интенсификации теплоотдачи неоднозначный. В большей мере благоприятное влияние изменения  $S_2$  на рост теплоотдачи отмечают в 1-м ряду. Например, теплоотдача его в пучке V возрастает в среднем для интервала  $Re = (3 \dots 25) \cdot 10^3$  на 25 % по сравнению с пучком I. Это является следствием улучшенной гидродинамики обтекания кормовой поверхности труб и повысившейся турбулентности потока, так как течение потока до миделева сечения труб 1-го ряда остается неизменным. Теплоотдача стабилизированных рядов пучка V в этом же диапазоне увеличилась лишь на 11 % по отношению к этим же рядам пучка I. Следовательно, при обтекании рядов гидродинамически установившимся потоком, параметры которого сформировались в пучках с  $\sigma_1 = 1,914$  и  $\sigma_2 = 0,956 \dots 0,518$ , начиная с 3-го ряда, изменение условий омывания кормовой части труб в меньшей мере отражается на интенсивности теплоотдачи по сравнению с начальными рядами.

Средняя теплоотдача пучков II, III, IV, V от уменьшения  $S_2$  при  $S_1 = \text{const}$  возросла по отношению к пучку I для изученного диапазона  $Re$  в среднем на 1; 5; 9 и 13 % соответственно. Больше влияние  $S_2$  на теплоотдачу наступает в стесненных пучках при  $\beta > 2,0$ .

Аэродинамическое сопротивление пучков I—V с уменьшением  $S_2$  растет. Количественно для пучков II, III, IV, V по сравнению с пучком I сопротивление повысилось в среднем для интервала  $Re = (3 \dots 25) \times$

$\times 10^3$  на 27,0; 45,0; 61,5; 67,0 % соответственно, что значительно опережает прирост теплоотдачи.

Показатель  $m$  в уравнении (5) с уменьшением  $\sigma_2$  также снижается.

При обработке результатов по скорости воздуха во фронтальном сжатом сечении числа  $Nu$  и  $Eu$  при  $Re = \text{const}$  в пучках I—V увеличиваются с ростом  $\beta$ , что хорошо согласуется с гидродинамикой течения потока и данными работы [5]. В случае обработки по максимальной скорости  $\omega_d$  (см. табл. 2) числа  $Nu$  при  $Re = \text{const}$  уменьшаются для пучков I—V, а числа  $Eu$  — только для стесненных пучков II—V. Это не привело к ощутимому снижению расслоения кривых теплоотдачи и сопротивления. Например, кривые  $Eu = f(Re)$  для пучков II—V различаются между собой на 29,0 % и 30,5 % при обобщении по  $\omega_d$  и  $\omega$  соответственно.

Средняя теплоотдача пучков I—V (рис. 3, а) с разбросом опытных точек, не превышающим  $\pm 4$  %, обобщается уравнением:

$$Nu = 0,0781\beta^{0,26} Re^{0,69}, \quad (6)$$

которое действительно для  $Re = (3 \dots 25) \cdot 10^3$  и  $\beta = 1,72 \dots 2,61$ .

За расчетную скорость воздуха для критерия  $Re$  принята скорость в сжатом фронтальном сечении.

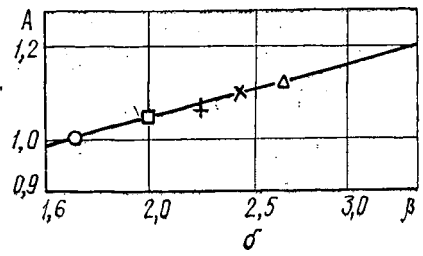
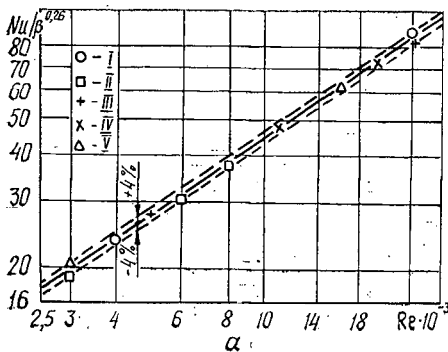


Рис. 3. Обобщение опытов по средней теплоотдаче (а) и влиянию параметра  $\beta$  на интенсивность теплообмена (б) пучка: I, II, III, IV, V — номера пучков

Из рис. 3, б видно, что теплоотдача в пучках I—V повышается пропорционально параметру  $\beta^{0,26}$ . На этом рисунке значения  $A = Nu/Nu_1$  вычислены для  $Re = 11 \cdot 10^3$  ( $Nu_1$  — число Нуссельта для пучка I).

Нами выполнен анализ применимости существующих методик Центрального котлотурбинного института (ЦКТИ) [5], Института физико-технических проблем энергетики (ИФТПЭ) АН ЛитССР [1] и Архангельского лесотехнического института (АЛТИ) [3] для расчета теплообмена и аэродинамического сопротивления поперечнообтекаемых пучков из ребристых труб к исследованным пучкам I—V. Сравнивали опытные и расчетные значения конвективных коэффициентов теплоотдачи ( $\alpha_{ко}$  и  $\alpha_{кр}$ ) и перепадов давлений ( $\Delta P_0$  и  $\Delta P_p$ ), вычисленных по указанным методикам. Расчеты проведены для средней температуры воздуха  $50^\circ\text{C}$ , его скоростей 1,35 и 11,25 м/с, которые соответствуют концам изученного интервала  $Re = (3 \dots 25) \cdot 10^3$ . Связь приведенного коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  с конвективным  $\alpha_k$ , коэффициент эффективности ребра  $\eta$ , определяющий линейный размер  $l$ , эквивалентный диаметр  $d_3$  наименьшего проходного сечения пучка для воздуха определяли по формулам работы [5]. Расчет  $d_3$  для пучка I выполняли по  $S_1$ , для пучков II—V — по  $S_2$ . Для пучков I—V  $l = 49,83$  мм. В значения  $\alpha_{кр}$  по

Таблица 3

Параметры	Ис-точ-ник	Числовые значения параметров при ш, м/с, для номера лучка									
		1,35					11,25				
		I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
$\alpha_{кр}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	—	16,1	16,5	17,6	18,4	19,1	80,7	80,9	81,1	84,3	89,4
$\Delta P_0, \text{Па}$		7,23	9,50	10,86	11,95	13,17	295	364	414	437	445
$\eta$		0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,91	0,91	0,91	0,90	0,89
$\alpha_{крр}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	[5]	19,4	20,6	22,8	25,0	26,6	89,9	95,8	105,4	116,0	123,0
$\Delta P_p, \text{Па}$		5,80	8,20	10,48	13,32	15,48	237	335	427	541	634
$\delta, \%$		-17,0	-19,9	-22,8	-26,4	-28,2	-10,2	-15,5	-23,0	-27,3	-27,3
$\delta_1, \%$		24,6	14,0	3,6	-10,3	-14,9	24,4	8,7	-3,0	-19,2	-29,8
$d_2, \text{мм}$		16,06	7,47	6,66	5,92	5,48	16,06	7,47	6,66	5,92	5,48
$l/d_2$		3,1	6,67	7,48	8,42	9,10	3,10	6,67	7,48	8,42	9,10
$\alpha_{крр}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	[1]	17,5	19,0	21,1	23,5	25,3	82,7	90,5	102,3	116,0	127,0
$\Delta P_p, \text{Па}$		8,42	10,40	13,76	18,28	22,14	344	423	558	743	905,0
$\delta, \%$		-8,0	-13,0	-16,6	-21,7	-24,5	-2,4	-10,6	-20,7	-27,3	-29,6
$\delta_1, \%$		-14,0	-8,7	-21,0	-34,6	-40,5	-14,2	-13,9	-25,8	-41,2	-50,8
$\alpha_{крр}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$	[3]	13,9	15,0	16,8	18,6	19,9	64,3	70,7	78,7	87,3	93,6
$\delta, \%$		15,8	10,0	4,8	-1,1	-4,0	25,5	14,4	3,0	-3,4	-4,5

методике [1, 3] введена поправка  $C_z = 0,97$  ( $z = 6$ ), отражающая влияние числа поперечных рядов в пучке. Поправку на локальный метод