

УДК 536.244

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАЛОРЯДНЫХ ШАХМАТНЫХ ПУЧКОВ ИЗ ОРЕБРЕННЫХ ТРУБ

В. Б. КУНТЫШ, И. В. ЮРКИН

Архангельский лесотехнический институт

Малорядные шахматные пучки из круглых оребренных труб применяют в калориферах лесосушильных камер и котельных агрегатов, в секциях подогрева воздуха центральных кондиционеров, в воздушных радиаторах гусеничных и колесных автотракторных машин. Число рядов  $z$  труб по направлению движения воздуха изменяется от 1 до 3, но в большинстве случаев  $z = 1$  или  $z = 2$  рядам.

В связи с этим возникают вопросы. Какой тип пучка энергетически целесообразен при прочих одинаковых условиях для практического применения? Какую компоновку пучка калорифера теплоэнергетически обоснованно применять для нагрева воздуха: одно- или двухрядную?

Отсутствие научных рекомендаций на поставленные вопросы способствует принятию противоречивых конструкторских решений при проектировании оребренных пучков промышленных теплообменников. Например, в лесосушильной камере УЛ-1 применены калориферы с однорядным пучком из биметаллических труб с накатными алюминиевыми ребрами; трубы симметрично расположены по обеим сторонам вентилятора; в лесосушильной камере СПВ-62М — калориферы с двухрядным шахматным пучком [1] из биметаллических оребренных труб с параметрами, близкими к параметрам труб калориферов камеры УЛ-1.

Из-за недостатка данных по теплообмену и аэродинамическому сопротивлению поперечно обтекаемых воздухом малорядных пучков из оребренных труб предлагаемое исследование направлено на получение таких показателей, которые позволили бы изучить энергетическую эффективность подобных пучков и разработать рекомендации по их компоновке.

Анализ исследований [3, 5, 7] показал, что в слаботурбулизированном набегающем потоке воздуха теплоотдача первого ряда в двухрядном шахматном пучке из оребренных труб на 7...17% ниже теплоотдачи второго ряда, а теплоотдача однорядного пучка в зависимости от параметров ребер и шага разбивки труб в пучке на 0...5% меньше теплоотдачи первого ряда двухрядного пучка. Данные по распределению аэродинамического сопротивления по рядам оребренных труб шахматного пучка приведены в табл. 1.

В табл. 1 прослеживается тенденция перераспределения сопротивления первого и второго рядов между собой с увеличением диаметра  $d_0$  несущей трубы: сопротивление второго ряда становится меньше сопротивления первого ряда или сопротивления однорядного пучка. Например, для труб [3] сопротивление снижается в 1,33...1,23 раза в диапазоне изменения  $Re = 10^4 \dots 3 \cdot 10^4$ . Следовательно, сопротивление второго ряда для труб увеличенного диаметра становится меньше, а теплоотдача этого ряда выше по сравнению с такими характеристиками первого ряда или однорядного пучка. Отсюда следует, что целесообразно применять малорядные шахматные пучки вместо однорядных.

Для однозначного решения задачи нами экспериментально исследованы теплоотдача и аэродинамическое сопротивление обтекаемых

Таблица 1

Характеристика пучка $\sigma_1/\sigma_2$	Сопротивление ряда — Eu						Ис-точ-ник ли-те-ра-ту-ры	Параметры ребер и трубы, мм
	Re = 10 <sup>4</sup>		Re = 2 · 10 <sup>4</sup>		Re = 3 · 10 <sup>4</sup>			
	Номер ряда							
	1	2	1	2	1	2		
1,04/0,91	0,56	0,74	0,49	0,59	0,47	0,49	[2]	$d = 43,4; d_0 = 23,4; h = 10;$ $s = 3,5; \Delta = 0,6; \varphi = 9,32$
1,035/0,897	0,39	0,42	0,3	0,33	0,26	0,28	[5]	$d = 57; d_0 = 25; h = 16;$ $s = 3,6; \Delta = 0,3; \varphi = 15,4$
1,28/1,28	0,36	0,36	0,34	0,31	0,33	0,28	[7]	$d = 50; d_0 = 32; h = 9;$ $s = 6; \Delta = 1,3; \varphi = 5,1$
1,035/0,896	0,453	0,34	0,36	0,29	0,32	0,26	[3]	$d = 100; d_0 = 44,5; h = 27,75;$ $s = 6,56; \Delta = 1; \varphi = 14,93$

\* $\sigma_1 = S_1/d$  — относительный поперечный шаг;  $\sigma_2 = S_2/d$  — относительный продольный шаг.

перпендикулярным потоком воздуха шахматных двухрядных пучков из оребренных труб увеличенного диаметра [4], рекомендованных для применения в калориферах лесосушильных камер.

Пучки собирали из биметаллических труб с накатными однозаходными непрерывными ребрами из алюминиевого сплава АД1М. Параметры ребер и труб следующие: наружный диаметр ребра  $d = 69,5$  мм; высота  $h$ , шаг  $s$  и средняя толщина ребра  $\Delta$  равны соответственно 14,8; 3 и 0,6 мм; диаметр у основания (несущий) ребра  $d_0 = d - 2h = 39,9$  мм; коэффициент оребрения трубы  $\varphi = 14,67$ ; внутренний диаметр стальной гладкой несущей трубы  $d_1 = 33$  мм, а толщина стенки ее  $\delta_1 = 2,5$  мм.

Всего было испытано пять пучков. Поперечный шаг  $S_1$  в пучке I был равен 74 мм, в пучке II — 80 мм, в III — 100, в IV — 120, в пучке V — 133 мм. Продольный шаг  $S_2$  размещения труб для всех пучков принят одинаковым и равным 74 мм. Выбор значений шага  $S_1$  обусловлен тем, что с указанными шагами выполнено исследование теплоаэродинамических характеристик однорядных пучков [4] из этих же труб.

Опыты проведены в аэродинамической трубе по методике, приведенной в работе [6]. Теплоотдачу изучали локальным тепловым моделированием, при котором трубку-калориметр устанавливали в центре каждого поперечного ряда пучка. По опытным измерениям рассчитывали приведенный  $\alpha_i$  коэффициент теплоотдачи  $i$ -го ряда пучка, вычисленный по температурному напору, равному разности средней температуры стенки трубы у основания ребер и температуры набегающего воздуха.

Экспериментальные данные представляли в числах подобия

$$Nu_i = \frac{\alpha_i d_0}{\lambda}; \quad Nu = \frac{\alpha d_0}{\lambda}; \quad Re = \frac{w d_0}{\nu}; \quad Eu = \frac{\Delta p}{\rho w^2},$$

где  $\alpha$  — средний приведенный коэффициент теплоотдачи пучка, вычисленный общезвестными приемами [6];

$w$  — скорость воздуха в узком поперечном сечении пучка, м/с;

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

Физические константы воздуха  $\lambda, \nu, \rho$  принимали по его средней температуре в пучке. Коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_i$  и  $\alpha$  вычислены по полной наружной теплоотдающей площади поверхности оребрения калориметрической трубки.

В ходе экспериментов переменные изменялись в следующих диапазонах: средняя температура набегающего потока воздуха  $t_1 = 21 \dots 29,1$  °С; средняя температура воздуха за пучком  $t_2 = 22,7 \dots 32,2$  °С; средняя температура стенки трубы  $t_{ст} = 93,84 \dots 73,84$  °С; скорость воздуха  $w = 1,41 \dots 16,57$  м/с.

Результаты опытов по теплоотдаче (рис. 1) 1- и 2-го рядов пучков I—V аппроксимируются критериальным уравнением

$$Nu_i = C_i Re^{n_i}. \quad (1)$$

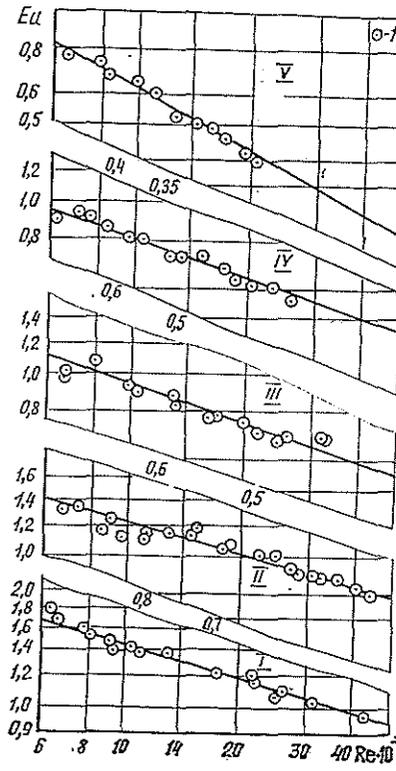
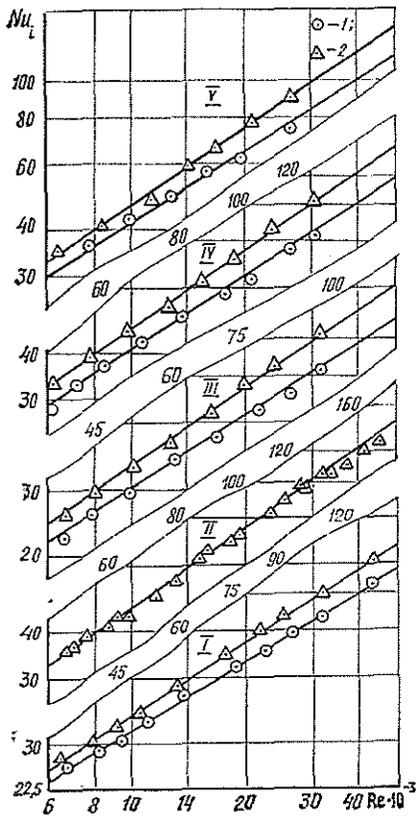


Рис. 1. Теплоотдача пучков: 1 — первый ряд; 2 — второй ряд; I, II, III, IV, V — номера пучков; сплошные линии — расчеты теплоотдачи проведены по формуле (1)

Рис. 2. Аэродинамическое сопротивление пучков: 1 — опытные точки; I, II, III, IV, V — номера пучков; сплошные линии — расчеты сопротивления проведены по формуле (3)

Средняя теплоотдача пучков I—V подчиняется критериальному уравнению

$$Nu = C Re^n \tag{2}$$

Аэродинамическое сопротивление двухрядных пучков I—V (рис. 2) описывается критериальным уравнением

$$Eu = C_1 Re^{-n_1} \tag{3}$$

Коэффициенты  $C$ ,  $C_1$ ,  $n$  и  $n_1$  в формулах (1) — (3) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Но- мер пуч- ка	Постоянные коэффициенты							
	$C_i$ для ряда		$n_i$ для ряда		$C$	$n$	$C_1$	$n_1$
	1-го	2-го	1-го	2-го				
I	0,172	0,1320	0,60	0,64	0,152	0,62	19,00	0,28
II	0,113	0,0815	0,64	0,69	0,101	0,66	16,10	0,28
III	0,110	0,0800	0,64	0,69	0,099	0,66	19,17	0,33
IV	0,113	0,0815	0,64	0,69	0,101	0,66	16,86	0,33
V	0,113	0,0815	0,64	0,69	0,101	0,66	66,60	0,51

Первому ряду исследованных пучков свойственна пониженная интенсивность теплоотдачи по сравнению с теплоотдачей второго ряда. Уменьшение теплоотдачи составляет 1,08... 1,11 раза для низких значений числа  $Re$  и 1,16... 1,21 раза для наибольших значений  $Re$ , достигнутых в опытах. Рост  $Re$  сопровождается развитием повышенной турбулентности потока за первым рядом и соответствующим наращиванием теплоотдачи второго ряда. Следовательно, теплообмен во втором ряду пучка в среднем на 12... 16 % протекает более интенсивно по отношению к этой же характеристике первого ряда. Полученные соотношения характерны для обтекания первого ряда низкотурбулизированным набегающим потоком воздуха, который обеспечен в экспериментах расположением пучков от вентилятора на расстоянии, превышающем длину участка гидродинамической стабилизации.

Средняя теплоотдача пучков II—V практически одинакова, несмотря на увеличение поперечного шага от  $S_1 = 80$  мм до  $S_1 = 133$  мм, т. е. в 1,67 раза. Теплоотдача тесного пучка I в 1,06... 1,02 раза превышает теплоотдачу пучков II—V.

Аэродинамическое сопротивление пучков непрерывно уменьшается с увеличением  $S_1$  при  $S_2 = \text{const}$ . Например, для  $Re = 12\,500$  сопротивление пучка II в 1,18 раза меньше сопротивления пучка I, а пучка V в 2,5 раза меньше.

Сравним теплоаэродинамические характеристики двухрядных пучков I, II, как наиболее интересных для промышленного аппаратостроения ввиду большей компактности, с подобными характеристиками однорядных пучков [4] из таких же труб и одинакового шага  $S_1$ . Значения теплоотдачи однорядного пучка и первого ряда двухрядного пучка равны между собой в исследованном диапазоне  $Re$ . Значит, суммарная теплоотдача двух однорядных пучков при  $Re = \text{const}$  меньше теплоотдачи идентичного двухрядного пучка. А как обстоит дело с соотношением по сопротивлению таких пучков?

Анализ показал, что сопротивление двухрядного пучка ниже сопротивления двух вместе взятых однорядных пучков. Например, сопротивление пучка I соответствует при  $Re = 6 \cdot 10^3 - Eu = 1,66$ , а при  $Re = 25 \cdot 10^3 - Eu = 1,11$  (рис. 2). Суммарное сопротивление двух однорядных пучков с таким же  $S_1$  по [4] для указанных значений  $Re$  соответственно равно  $Eu = 1,92$  и 1,2.

Для количественной оценки преимущества двухрядного пучка по сравнению с однорядным на рис. 3 сопоставлены характеристики пучков в энергетических координатах: средняя теплоотдача пучка  $\alpha$  и удельная затрата мощности  $N_0$  на прокачку воздуха через пучок. При всех значениях  $N_0$  теплоотдача двухрядных пучков выше теплоотдачи однорядных пучков. Например, для  $N_0 = 2$  Вт/м<sup>2</sup> коэффициент теплоотдачи

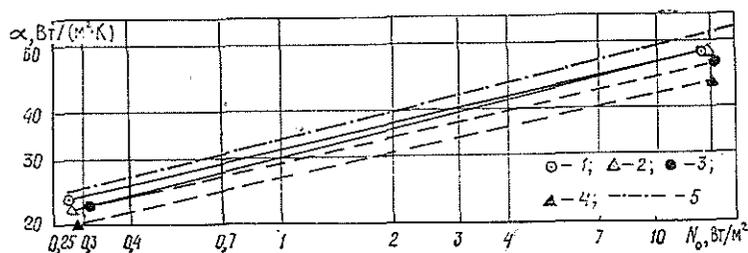


Рис. 3. Зависимость энергетической эффективности от числа рядов в пучке: 1, 2 — соответственно двухрядные пучки I, II; 3, 4 — соответственно однорядные пучки I, II; 5 — двухрядный пучок I в высокотурбулизированном потоке

двухрядного пучка I в 1,06 раза, а пучка II — в 1,16 раза превышает теплоотдачу соответствующих однорядных пучков.

Следовательно, двухрядная шахматная компоновка пучка из оребренных труб энергетически выгоднее однорядной компоновки.

Тепловую эффективность двухрядных пучков можно повысить, помещая их в высокотурбулизированный набегающий поток, возникающий непосредственно за вентилятором и распространяющийся на длину нескольких калибров воздушного канала. При длине больше 5...7 калибров вихревые возмущения в потоке затухают, течение стабилизируется. Высокая степень турбулентности набегающего потока интенсифицирует теплоотдачу первого ряда, увеличивая ее до уровня второго ряда. Средняя теплоотдача пучков I—V по теоретическим оценкам возрастает на 12...16%. Однако аэродинамическое сопротивление пучка, обтекаемого потоком высокой турбулентности, не возрастает, а, наоборот, имеет тенденцию к уменьшению в связи со смещением точки отрыва пограничного слоя в кормовую половину трубы и сужением вихревого следа, что приводит к снижению доли сопротивления давления.

На рис. 3 штрихпунктирной линией нанесена тепловая эффективность пучка I для случая протекания теплообмена в высокотурбулизированном потоке, рассчитанная по изложенным исходным предпосылкам. Коэффициент теплоотдачи пучка при  $N_0 = idem$  возрастает на 10%, а по сравнению с однорядными пучками тепловая эффективность двухрядных пучков для принятого расположения их по отношению к вентилятору повышается на 40%.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1]. Богданов Е. С., Козлов В. А., Пейч Н. Н. Справочник по сушке древесины.— М.: Лесн. пром-сть, 1981.— 192 с. [2]. Кунтыш В. Б., Иохвеев Ф. М., Таранян И. Г. Влияние числа поперечных рядов оребренных труб и угла атаки ребра на сопротивление шахматных и коридорных пучков // Энергетика.— 1974.— № 12.— С. 114—117. (Изв. высш. учеб. заведений). [3]. Кунтыш В. Б., Аникин А. И., Васьута В. Ф. Тепловая эффективность пучков из труб с насадными отбортованными ребрами промышленных калориферов // Лесн. журн.— 1981.— № 6.— С. 73—78. (Изв. высш. учеб. заведений). [4]. Теплообмен и аэродинамическое сопротивление однорядных биметаллических калориферов для лесосушильных камер / В. Б. Кунтыш, В. И. Мелехов, Е. С. Богданов и др. // Деревообраб. пром-сть.— 1985.— № 9.— С. 7—9. [5]. Федотова Л. М., Кунтыш В. Б., Кузнецов Н. М. Теплоотдача и сопротивление пучков, оребренных навитой лентой, труб аппаратов воздушного охлаждения с различным числом рядов // Энергетика.— 1980.— № 5.— С. 112—115. (Изв. высш. учеб. заведений). [6]. Экспериментальное исследование теплоотдачи и сопротивления пучков АВО из биметаллических труб / В. Б. Кунтыш, А. Э. Пиир, А. И. Егоров и др. // Энергетика.— 1977.— № 12.— С. 89—93. (Изв. высш. учеб. заведений). [7]. Юдин В. Ф. Теплообмен поперечнооребранных труб.— Л.: Машиностроение, 1982.— 189 с.

Поступила 6 декабря 1985 г.

УДК 674.093.26-416.05

### ПЛАНИРОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ РАБОТЫ ЛУЩИЛЬНОГО СТАНКА

Т. А. ДУБИНИНА, А. Н. КЛИМОВ, Ю. Н. СТРИЖЕВ

НПО Научфанпром

Задачу повышения производительности лущильных станков можно решить совершенствованием конструкции лущильного станка и совершенствованием управления лущильным станком.

Если первое направление сопряжено со значительными временными и финансовыми затратами (цикл разработки нового лущильного станка