

УДК 536.24 : 533.6.011

В.Я. ГОРБАТЕНКО, канд. техн. наук, И.В. ГАЛУЦАК

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
г. Харьков, Украина*

## **АЭРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОПЕРЕЧНО-ОМЫВАЕМЫХ ПУЧКОВ ТРУБ С ПРОСЕЧНЫМ СПИРАЛЬНО-ЛЕНТОЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ**

Представлено результати експериментального дослідження аеродинамічного опору поперечно-омиваних коридорних пучків труб із просіченим спірально-стрічковим оребрением в інтервалі зміни геометричних параметрів труб та пучків  $H/F = 8,787...13,713$ ,  $S_1/S_2 = 0,662...1,633$  і числа Рейнольдса  $Re = 5 \cdot 10^3...3,6 \cdot 10^4$ . На основі результатів дослідження одержані залежності для розрахунку опору пучків у зазначених межах зміни визначальних параметрів.

The results of the experimental research of the aerodynamic resistance of cross-flow in-line tube banks with cut spiral fins in the region of changing geometrical values of bank and tubes  $H/F = 8,787...13,713$ ,  $S_1/S_2 = 0,662...1,633$  and of Reynolds number  $Re = 5 \cdot 10^3...3,6 \cdot 10^4$  are presented. By generalized experimental research's foundation there were getting a dependence for a calculation of resistance banks in pointed limits of change of certain parameters.

### **Введение**

Снижение массы и габаритов газо-жидкостных теплообменников различного назначения и поверхностей нагрева котлов, особенно низкотемпературных котлов-утилизаторов, в частности, в составе газопаротурбинных установок, всегда представляло повышенный интерес. Достижение этой цели требует интенсификации теплообмена со стороны газообразного теплоносителя при приемлемом аэродинамическом сопротивлении теплообменника или значительного увеличения поверхности теплообмена с газовой стороны. Последнее обычно достигается оребрением теплообменной поверхности, при этом наиболее широкое применение получило наружное спирально-ленточное оребрение.

Само по себе это оребрение не интенсифицирует теплообмен, а при малом шаге ребер и большой их высоте даже снижает его вследствие выключения из теплообмена части цилиндрической поверхности труб нарастающим пограничным слоем и снижения тепловой эффективности ребер [1, 2]. Для интенсификации теплообмена рекомендуют создавать вихревой режим течения в межреберных полостях [2] путем различных деформаций ребер, в основном, разрезки их на отдельные лепестки [3, 4] или рассечки на глубину 2,5...4,0 мм и отгибов периферийной части ребер [5, 6].

В работах [3, 4, 6] отмечается увеличение теплоотдачи на 10–30 % с опережающим ростом аэродинамического сопротивления деформированного оребрения. В работе [5] получено увеличение теплоотдачи на 57 % при увеличении сопротивления на 38 %. Во всех работах рассматривается оребрение из мягких цветных металлов (медь, алюминий, латунь), которые не применяются для изготовления поверхностей нагрева котлов.

Для оребрения из стали предложено оребрение из просечной ленты [7], аэродинамические характеристики которого, как и тепловые, исследованы недостаточно. По-существу, до настоящего времени опубликованы результаты лишь трех работ по исследованию теплоаэродинамических характеристик поперечно-омываемых пучков труб с просечным спирально-ленточным оребрением [2, 7, 8]. В двух из них [7, 8] выполнены обобщения результатов экспериментальных исследований

сопротивления коридорных пучков труб с целью получения расчетных зависимостей. Результаты этих работ несколько различны. В частности в [7] в качестве определяющего геометрического размера принят наружный диаметр несущей трубы и постоянное значение показателя степени при числе Рейнольдса в соотношениях для определения аэродинамического сопротивления. Кроме того, в расчетные соотношения введен ряд коэффициентов, определяемых по графикам; в работе использована Британская система единиц, что создает неудобства использования предложенных соотношений.

В работе [8] в качестве определяющего геометрического размера принят эквивалентный диаметр и установлено влияние геометрических характеристик пучков труб на показатель стенки при числе Рейнольдса. В работе охвачен широкий диапазон определяющих параметров и предложены простые соотношения для расчета аэродинамического сопротивления; установлено, что сопротивление просечного оребрения на 15–45 % выше, чем сплошного спирально-ленточного оребрения. Однако и в этой работе не охвачен весь диапазон возможного изменения определяющих параметров. Поэтому целесообразно проведение дополнительных экспериментальных исследований при других геометрических характеристиках оребрения труб и пучков.

#### **Методика исследования**

Измерения аэродинамического сопротивления коридорных пучков труб проводилось на экспериментальном стенде, представляющем собой открытую аэродинамическую трубу сечением 240×295 мм общей длиной 4200 м, в которую нагнетался воздух вентилятором. Расход воздуха изменялся цилиндрической щелевой дроссельной заслонкой на всасе вентилятора и измерялся трехканальным зондом, установленным с помощью координатника в суженном сечении канала размерами 150×150 мм. Сечение предварительно протарировано; тарифовочные коэффициенты в рабочем диапазоне изменения расходов воздуха составляют 0,98...1,025; тарифовочный коэффициент зонда – 0,995.

Перепад давлений на пневмометрической зонде и разность статических давлений измерялись микроманометрами ММН-300 класса точности 0,6.

Между сужающим участком трубы и выхлопным патрубком вентилятора установлена демпфирующая проволочная сетка. Перед рабочим участком длиной 1000 мм установлен стабилизирующий участок длиной 1500 мм. После измерительного участка установлен также прямой участок длиной 1000 мм. Размеры поперечного сечения этих участков такие же, как измерительного участка.

В измерительном участке устанавливались опытные пучки горизонтально расположенных труб. Потеря давления в пучках измерялась микроманометром ММН-240 класса точности 1,0.

В отдельных опытах в качестве контроля, сопротивление пучков параллельно измерялось электронным дифференциальным манометром testo-506. Показания обоих приборов практически совпадали. Точки отбора статических давлений были расположены на расстоянии 500 мм до участка установки пакетов труб и 700 мм после него. Для отбора статических давлений использованы алюминиевые трубки внутренним диаметром 3,5 мм.

Опыты проведены в изотермических условиях при температуре воздуха 20...22 °С в интервале измерения чисел Рейнольдса  $5 \cdot 10^3 \dots 3,6 \cdot 10^4$ .

В опытах использовались трубы, геометрические характеристики которых представлены в таблице 1.

**Таблица 1. Геометрические характеристики труб**

Серия	Диаметр ребер, $d$ , м	Высота ребер $h$ , м	Шаг ребер, $S_p$ , м	Толщина ребер, $\delta$ , м	Ширина лепестка, $b$ , м	Высота лепестка $h_l$ , м	Коэффициент оребрения, $\psi$
1	0,028	0,0145	0,005	0,001	0,004	0,0095	10,01
2	0,028	0,0145	0,006	0,001	0,004	0,0095	8,509
3	0,028	0,0145	0,008	0,001	0,004	0,0095	6,632

Геометрические характеристики исследованных пучков труб представлены в таблице 2 (номер пучка включает две цифры – первая означает номер серии, вторая – номер компоновки).

Исследовались, в основном, пучки с четырьмя поперечными рядами труб. Для установления влияния числа поперечных рядов на перепад давления проведены опыты также с числом поперечных рядов  $z_2 = 1, 2, 3, 4, 5$ .

Перепад давлений на пучке определялся по разности измеренного перепада статических давлений и сопротивления канала без труб, но с элементами креплений и дистанционирования трубных досок, изготовленных из фанеры толщиной 10 мм

$$\Delta P_{\text{п}} = \Delta P_{\text{ст}} - \Delta P_{\text{хк}}. \quad (1)$$

Сопротивление холостого канала измерялось при том же диапазоне расходов воздуха, в котором измерялось сопротивление пучков, и включало в себя сопротивление трения и местные сопротивления.

По найденным значениям  $\Delta P_{\text{п}}$  рассчитывались значения чисел Эйлера пучка

$$Eu = \frac{\Delta P_{\text{п}}}{\rho W^2} \quad (2)$$

и числа Эйлера, отнесенные к одному поперечному ряду

$$Eu_0 = \frac{Eu}{z_2}, \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха при температуре перед пучком,  $\text{кг/м}^3$ ;  $W$  – скорость воздуха в минимальном сечении одного поперечного ряда,  $\text{м/с}$ .

Далее устанавливалась взаимосвязь между  $Eu_0$  и  $Re_3$  в виде известной зависимости

$$Eu_0 = C_S Re_3^{-n}. \quad (4)$$

Значения чисел Рейнольдса вычислялись по эквивалентному диаметру

$$d_3 = \frac{2[S_{\text{рб}}(S_1 - d) - 2h\delta]}{2h + S_{\text{рб}}}, \quad (5)$$

где  $S_1$  – поперечный шаг труб в пучке,  $\text{м}$ ;  $d$  – наружный диаметр несущей трубы,  $\text{м}$ .

Остальные величины, входящие в (5), ясны из таблицы 1.

Значения коэффициентов  $C_S$  и  $n$  в уравнении (4) определялись по методу наименьших квадратов с помощью ПК.

### Результаты исследования

Первичные результаты исследования представлены частично на рис. 1 в виде зависимостей (4) и в таблице 2. На этом рисунке сплошными линиями нанесены также результаты расчетов  $Eu_0$  по зависимостям [8] применительно к условиям эксперимента.

**Таблица 2. Геометрические характеристики пучков и значения коэффициентов в уравнении (4)**

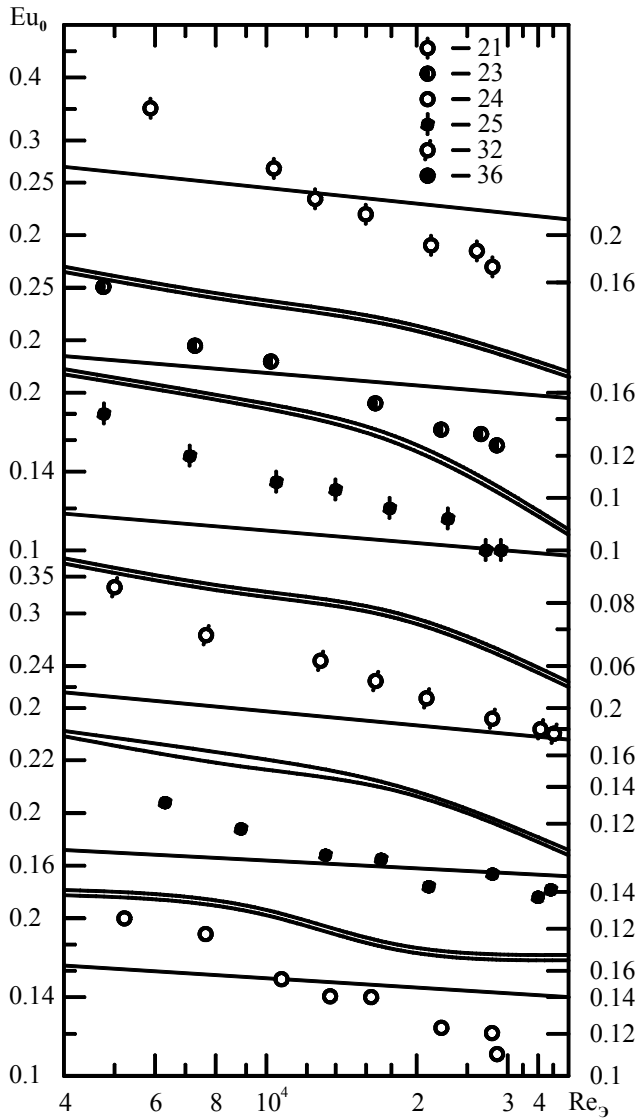
Номер пучка	$S_1, \text{ м}$	$S_2, \text{ м}$	$S_1/S_2$	$d_3, \text{ м}$	Приведенная длина					
					8,787		11,484		13,713	
					$n$	$C_S$	$n$	$C_S$	$n$	$C_S$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
11	0,098	0,148	0,662	0,01888	–	–	–	–	0,449	12,62
12	0,098	0,120	0,817	0,01888	–	–	–	–	0,408	5,396
13	0,098	0,098	1,000	0,01888	–	–	–	–	0,367	4,360
14	0,098	0,085	1,153	0,01888	–	–	–	–	0,360	3,630
15	0,098	0,074	1,324	0,01888	–	–	–	–	0,346	3,560
16	0,098	0,060	1,633	0,01888	–	–	–	–	0,306	1,780
21	0,098	0,148	0,662	0,02234	–	–	0,404	11,07	–	–
22	0,098	0,120	0,817	0,02234	–	–	0,367	4,73	–	–
23	0,098	0,098	1,000	0,02234	–	–	0,330	3,826	–	–
24	0,098	0,085	1,153	0,02234	–	–	0,324	3,187	–	–
25	0,098	0,074	1,324	0,02234	–	–	0,311	3,125	–	–
26	0,098	0,060	1,633	0,02234	–	–	0,275	1,560	–	–
31	0,098	0,148	0,662	0,02870	0,320	8,933	–	–	–	–
32	0,098	0,120	0,817	0,02870	0,291	3,820	–	–	–	–
33	0,098	0,098	1,000	0,02870	0,262	3,088	–	–	–	–
34	0,098	0,085	1,153	0,02870	0,257	2,572	–	–	–	–
35	0,098	0,074	1,324	0,02870	0,247	2,522	–	–	–	–
36	0,098	0,060	1,633	0,02870	0,218	1,259	–	–	–	–

Данные рис. 1 и таблицы 2 подтверждают общий характер зависимости  $E_{u0} = f(\text{Re}_3)$  и отмеченную в [8] тенденцию увеличения  $n$  с уменьшением отношения  $S_1/S_2$  и увеличения  $H/F$ . В то же время в исследованных диапазонах изменения в опытах чисел Рейнольдса,  $S_1/S_2$ ,  $H/F$  и геометрии оребрения получены более высокие значения показателя степени  $n$  при  $\text{Re}$  и значения коэффициента  $C_S$ , которые изменяются в пределах 0,218...0,449 и 1,259...12,62, соответственно. Значения чисел Эйлера также, в среднем, несколько выше, чем рассчитанные по [8], хотя в интервале чисел  $\text{Re}$   $8 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$  они достаточно близки. Максимальные расхождения наблюдаются в области малых значений  $\text{Re}$ . Одной из возможных причин отмеченных расхождений может быть значительно большее отношение высоты лепестка к наружному диаметру несущей трубы, чем в работе [8], однако это требует дополнительного выяснения.

Обобщение результатов опытов выполнено по приведенной и обоснованной в [8] методике – в качестве определяющего параметра геометрических характеристик труб принята приведенная длина развитой поверхности  $H/F$ , в качестве параметра, характеризующего компоновку труб в пучках – отношение шагов труб  $S_1/S_2$ . Зависимости  $n = f(S_1/S_2)$  при постоянных значениях  $H/F$ , представленные на рис. 2, подтверждают обоснованность этого решения.

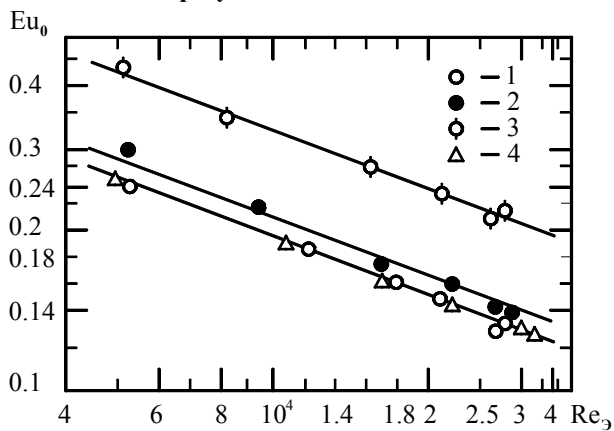
По значениям коэффициентов  $n$  и  $C_S$ , приведенным в таблице 2, путем математической обработки на ПК получены следующие обобщающие соотношения для коридорных пучков из труб с просечным оребрением

$$n = 5,127 \cdot 10^{-2} \left( \frac{H}{F} \right)^{0,766} \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{-0,404}, \quad (6)$$



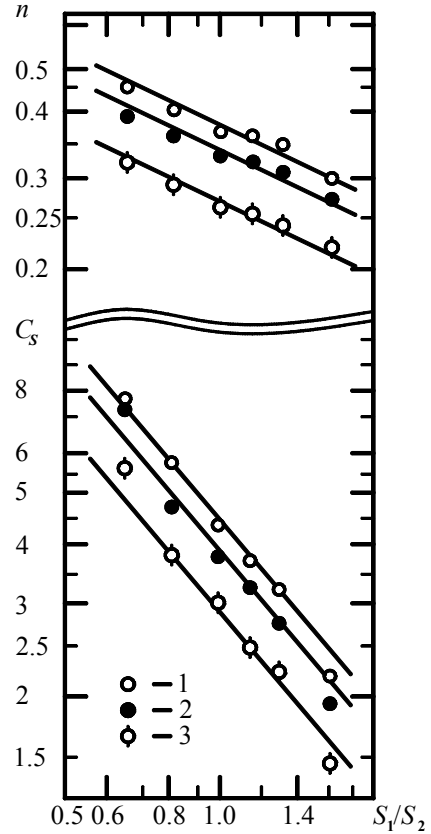
21, 23, 24, 25, 32, 36 – номера пучков в соответствии с таблицей 2

Рис. 1. Зависимости  $Eu_0 = f(Re_3)$ , построенные по результатам опытов



1 –  $z_2 = 3$ ; 2 –  $z_2 = 2$ ; 3 –  $z_2 = 1$ ; 4 –  $z_2 = 4$

Рис. 3. Зависимости  $Eu_0 = f(Re_3)$  для пучков с различным числом поперечных рядов  $z_2$



1 –  $H/F = 13,713$ ; 2 –  $H/F = 11,489$ ; 3 –  $H/F = 8,787$

Рис. 2. Зависимости  $n = f(S_1/S_2)$  и  $C_S = f(S_1/S_2)$  при различных  $H/F = \text{const}$

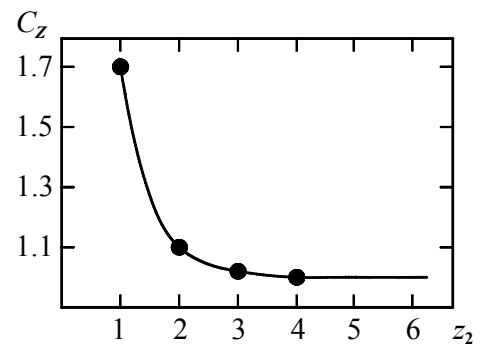


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $C_Z$  от числа поперечных рядов труб  $z_2$

$$C_s = 0,429 \left( \frac{H}{F} \right)^{0,927} \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{-1,982} \quad (7)$$

Влияние на аэродинамическое сопротивление числа поперечных рядов видно из рис. 3, где представлены зависимости  $Eu_0 = f(Re_0)$  для одно-, двух-, трех- и четырехрядных пучков. Приведенные данные показывают, что, начиная с трехрядного пучка, сопротивление практически не изменяется.

Обработка опытных данных позволила получить значения коэффициента  $C_Z$  для малорядных пучков: для однорядного пучка оно оказалось равным 1,676; для двухрядного – 1,108; трехрядного – 1,01; четырехрядного – 1,003, что практически совпадает с данными [9].

Изменение  $C_Z$  от числа поперечных рядов труб представлено на рис. 4, из которого видно, что при  $z_2 \leq 4$  следует в уравнение (4) вводить поправку  $C_Z$ :

$$Eu_0 = C_Z C_s Re_0^{-n} \quad (8)$$

Для расчета  $C_Z$  следует использовать формулу из [9].

В заключение можно отметить, что максимальное расхождение опытных значений чисел Эйлера со значениями, рассчитанными по соотношениям (4) – (7) составляет 13,8 %.

#### Литература

1. Стасюлявичус Ю.К., Скринска А.Ю. Теплоотдача поперечно обтекаемых пучков ребристых труб. – Вильнюс: Минтис, 1974. – 243 с.
2. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечно-оребрённых труб. – Л.: Машиностроение, 1982. – 189 с.
3. Таранян И.Г. Исследование влияния параметров оребрения на теплопередачу и сопротивление шахматных пучков труб с поперечными гладкими и интегральными ребрами / И.Г. Таранян, Ф.М. Иофедов, В.Б. Кунтыш // Теплофизика высоких температур. – 1972. Т. 10, № 5. – С. 1049-1054.
4. Кунтыш В.Б., Кузнецов Н.М. Тепловой и аэродинамический расчеты оребренных теплообменников воздушного охлаждения. – СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 1992. – 280 с.
5. Кокарев Б.И. Результаты исследования теплообменных труб с разрезными поперечными ребрами / Б.И. Кокарев, В.Г. Вишневский, С.М. Семенов, Ю.В. Плаксин // Теплоэнергетика. – 1978. – № 2. – С. 35-37.
6. Кунтыш В.Б. Интенсификация теплоотдачи шахматных пучков труб периферийной насечкой спиральных ребер // Известия Вузов. Энергетика, 1993. – № 5-6. – С. 111-117.
7. Weierman C. Correlations Ease the Selection of Finned Tubes // Oil and Gas Journal. – 1976. – Vol. 74, № 36. – P. 94-100.
8. Шаповал О.Е. Аэродинамическое сопротивление поперечно-омываемых коридорных пучков труб с разрезным оребрением / О.Е. Шаповал, Е.Н. Письменный, А.М. Терех // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23, № 4-5. – С. 63-68.
9. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб. – Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.