

намическом воздействии со стороны соседних закипающих частиц. Рассчитаны углы действия максимальных сил. Установлено, что процесс дробления закипающих включений протекает при различных максимумах усилий (различных углах β) в сравнении с незакипающими частицами. Это указывает на необходимость нахождения как минимум двух максимальных усилий, которые могут совпадать по углу своего действия на каплю либо значительно различаться по этому углу. Конечно, необходим учет как деформации поверхности включений, так и их перемещения, а также неравномерности при закипании капель различных размеров. Большое значение имеют также ПАВ, которые позволяют раздробить частицу при гораздо меньших прикладываемых к ней усилиях со стороны других закипающих включений. Остается открытым вопрос о поведении двух и более капель при их сближении, а также влиянии соседей на рост данной капли. Учет этих явлений позволит еще более детально и точ-

но рассматривать процессы роста и дробления включений дисперсной фазы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Смазочно-охлаждающие* технологические средства для обработки металлов резанием: Справочник / Под ред. С.Г. Энтелеса – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
2. *Долинский А.А., Павленко А.М., Басок Б.И.* Теплофизические процессы в эмульсиях. – К.: Наукова думка, 2005. – 265 с.
3. *Павленко А.М., Климов Р.А., Басок Б.И.* Дробление дисперсной фазы при вскипании эмульсии // Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №3. – С.14-22.
4. *Павленко А.М., Климов Р.А., Басок Б.И.* Кинетика испарения в процессах гомогенизации // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28, №6. – С.14 – 20.

Получено 24.07.2007 г.

УДК 536.24:533.6.011

**ПИСЬМЕННЫЙ Е.Н., ТЕРЕХ А.М.,
РОГАЧЕВ В.А., БУРЛЕЙ В.Д., РАЛЬЧУК В.В.**

Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт”

АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ В ШАХМАТНЫХ ПУЧКАХ ТРУБ СО СПИРАЛЬНО-ЛЕНТОЧНЫМ РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Запропоновано узагальнюючі експериментальні залежності для визначення аеродинамічного опору шахових пучків труб з розрізним спірально-стрічковим оребрением в інтервалах змінення числа Рейнольдса $Re_e = (5...50) \cdot 10^3$ параметра розміщення $S_1/S_2 = 0,8...2,5$, приведеної довжини $H/F = 5...39$.

Предложены обобщающие зависимости для определения аэродинамического сопротивления шахматных пучков труб с разрезным спирально-ленточным оребрением в интервалах изменения числа Рейнольдса $Re_e = (5...50) \cdot 10^3$, параметра размещения $S_1/S_2 = 0,8...2,5$, приведенной длины $H/F = 5...39$.

Generalized relations for determining aerodynamic resistance of staggered cross-flow tube bundles with cut spiral-band fins are considered. It is guided by results of the experimental investigation in the value interval of Reynolds number $Re_e = (5...50) \cdot 10^3$ with placement parameters $S_1/S_2 = 0.8...2.5$ and reduced length $H/F = 5...39$.

D – внешний диаметр ребра;
 d – диаметр несущей трубы;
 $d_э$ – эквивалентный диаметр минимального проходного сечения пучка;
 F – минимальное поперечное проходное сечение;
 H – полная омываемая поверхность одного поперечного ряда труб;
 h – высота ребра;
 L – длина участка между точками измерения давления без учета длины пучка;
 ΔP – потери давления;
 Re – число Рейнольдса;
 S – шаг труб;
 s – ширина лепестка;
 t – температура воздуха в канале, шаг ребер;
 w – расчетная скорость потока;
 w_T – скорость воздуха в незагражденном трубами канале;

z – число рядов труб;
 δ – толщина ребра;
 ρ – плотность теплоносителя;
 $\lambda_{тр}$ – коэффициент сопротивления трения;
 ξ_m – суммарный коэффициент местных сопротивлений.

Индексы:

1 – поперечный;
 2 – продольный;
 б – базовый;
 в – вход;
 оп – опытный;
 р – расчетный, разрезка;
 ст – статический;
 э – эквивалентный.

Введение

Важным шагом в повышении эффективности и надежности теплоэнергетического оборудования явилось создание и внедрение трубчатых оребренных с наружной газовой стороны поверхностей нагрева. К настоящему времени разработано множество конструкций компактных теплообменных поверхностей для теплообменников “газ – жидкость”, характеризующихся большим отношением площади к объему: конвективные поверхности из труб с поперечным спирально-ленточным, круглым, гофрированным, биспиральным, проволочным оребрениями [1,2]. Заменяя собой традиционные гладкотрубные поверхности, они дают возможность заметно уменьшить удельный расход металла, сократить габариты теплообменника и упростить его конструкцию.

В задачу расчета теплообменника входит определение как тепловых потоков между теплоносителями, так и мощности источника механической энергии, расходуемой на преодоление сил трения и сопротивления, возникающих при движении газа (воздуха) через теплообменник. Компактные оребренные поверхности могут иметь множество разнообразных и, как правило, сложных геометрических форм. Очевидно, что только для поверхностей с простыми конфигурациями

оребрений можно произвести численные исследования их основных теплоаэродинамических характеристик, для остальных поверхностей они могут быть получены лишь экспериментальным путем с использованием законов моделирования и определением диапазона применимости полученных результатов.

Эффективным методом интенсификации теплоотдачи в теплообменных устройствах является использование пучков труб с поперечным разрезным оребрением. Такое оребрение к настоящему времени обеспечено промышленной технологией и высокопроизводительным оборудованием и образуется за счет приварки к несущей трубе токами высокой частоты заранее просеченной (разрезанной) стальной ленты [3].

Первые исследования шахматных пучков труб с разрезным оребрением были выполнены в работе [4]. Однако имеющиеся в ней данные по расчету аэродинамического сопротивления представлены для ограниченного по шаговым характеристикам количества шахматных компоновок. Кроме того, в [4] отсутствует сравнительная оценка пучков труб с традиционным спирально-ленточным и разрезным оребрениями, которая бы позволила выявить изменение аэродинамического сопротивления по отношению к величине интенсификации теплообмена за счет разрезки ребра.

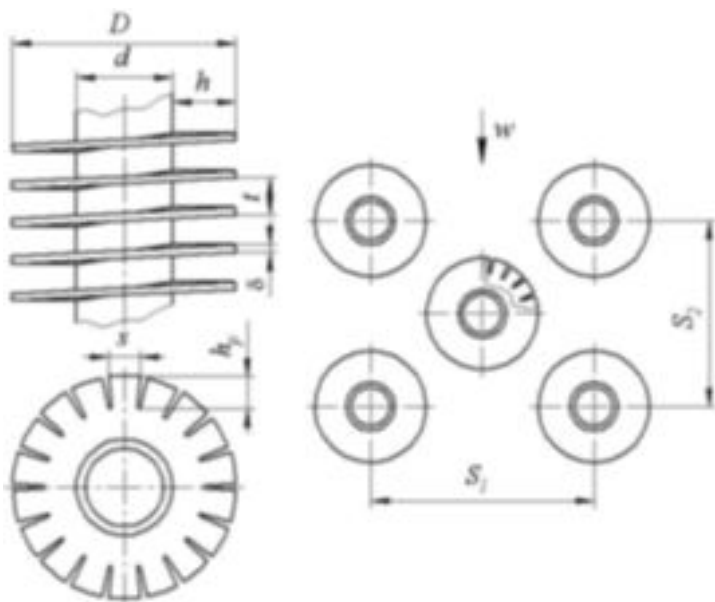


Рис. 1. Труба с разрезным спирально-ленточным оребрением.

С целью определения влияния разрезки ребра на сопротивление и взаимосвязь его с интенсивностью теплоотдачи, а также разработки инженерной расчетной методики в НТУУ «КПИ» проведены экспериментальные исследования аэродинамики шахматных пучков труб со спирально-ленточным разрезным оребрением.

1. Методика исследований

Исследования аэродинамического сопротивления выполнены по результатам измерения перепадов давления на пучках на аэродинамической трубе прямоугольного сечения по методике [5]

Табл. 1. Основные геометрические характеристики оребренных труб

Номер серии	d , мм	h , мм	t , мм	δ , мм	s , мм	h_p , мм
1	32	14,5	5,0	1,0	4,0	6,0
2	32	16,5	5,0	1,0	4,0	7,0
3	32	14,5	10,0	1,0	4,0	6,0
4	42	16,0	5,0	1,2	4,0	7,0
5	42	19,5	8,0	1,3	4,0	12,5
6	38	17,3	4,5	1,0	4,0	10,0
7	38	16,9	5,0	1,0	4,0	10,0

в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_3 = (1...50) \cdot 10^3$ при температурах изотермического потока воздуха $t_B = 17... 27$ °С. Общие виды исследованных оребренной трубы и трубного пучка представлены на рис. 1

Основные геометрические характеристики исследованных труб с разрезным оребрением приведены в табл.1.

Изучению подвергнуты компоновки с числом поперечных $z_2 = 7...8$ и продольных $z_1 = 3...4$ рядов труб в пучке. Основные геометрические характеристики части из исследованных шахматных пучков труб с разрезным оребрением представлены в табл.2.

С целью удобства анализа и обработки экспериментальных данных каждый трубный пучок обозначался двузначным номером, объединяющим номера серий (типов труб) и размещений труб в пучке. Например, номер пучка «11» – серия 1 (см.табл.1), номер размещения 1 (см.табл.2). В табл.2 представлена выборка 21-го типоразмера пучков из общего числа исследованных пучков труб с разрезным оребрением, равным 34-м.

За определяющий линейный размер в числе Рейнольдса принят эквивалентный диаметр минимального проходного сечения пучка d_3 , в котором вычислялась определяющая скорость w .

Потери давления находились по измеренной разности статических давлений до и после пучка с учетом потерь на трение в прямой рабочей части аэродинамической трубы и местных сопротивлений сужения и расширения канала из-за использования профилированных вставок [5]:

Табл. 2. Геометрические характеристики шахматных пучков труб

Номер размещ.	S_1 , мм	S_2 , мм	S_1/S_2	H/F	d_3 , мм
Серия 1					
1	62	55	1,127	38,6	7,1
2	70	55	1,273	29	9,5
3	70	65	1,077	29	9,5
4	70	85	0,824	29	9,5
5	111	50	2,220	12,7	21,5
6	111	75	1,484	12,7	21,5
7	124	50	2,490	10,8	24,6
Серия 2					
3	70	65	1,077	33,1	8,3
7	124	50	2,490	12,2	21,6
Серия 3					
3	70	65	1,077	13,2	18,0
7	124	50	2,490	5,2	45,7
Серия 4					
8	135	60	2,250	14,7	19,9
9	86	75	1,146	34,1	9,8
Серия 5					
8	135	60	2,250	11,9	28,6
9	86	75	1,146	27,4	12,8
Серия 6					
10	86	85	1,012	33,3	9,3
11	96	85	1,129	26,8	11,6
12	91	79	1,152	29,8	10,5
Серия 7					
10	86	85	1,012	27,8	10,7
11	96	85	1,129	22,4	13,3
12	91	79	1,152	24,8	11,9

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ст}} - \left(\lambda_{\text{тр}} \frac{L}{d_3} + \xi_{\text{м}} \right) \frac{\rho w_{\text{ст}}^2}{2} .$$

$$Eu_0 = \frac{Eu}{z_2} .$$

По рассчитанным величинам ΔP определялись числа подобия Эйлера для пучка труб:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho w^2}$$

и числа Эйлера, отнесенные к одному поперечному ряду труб

Анализ экспериментальных [5] и литературных [1, 2, 6] данных по обобщению результатов исследований аэродинамического сопротивления разнообразных теплообменных поверхностей показывает, что в качестве основного определяющего параметра, учитывающего геометрию и компоновку оребренных труб, целесообразно принимать приведенную длину развитой поверхности H/F .

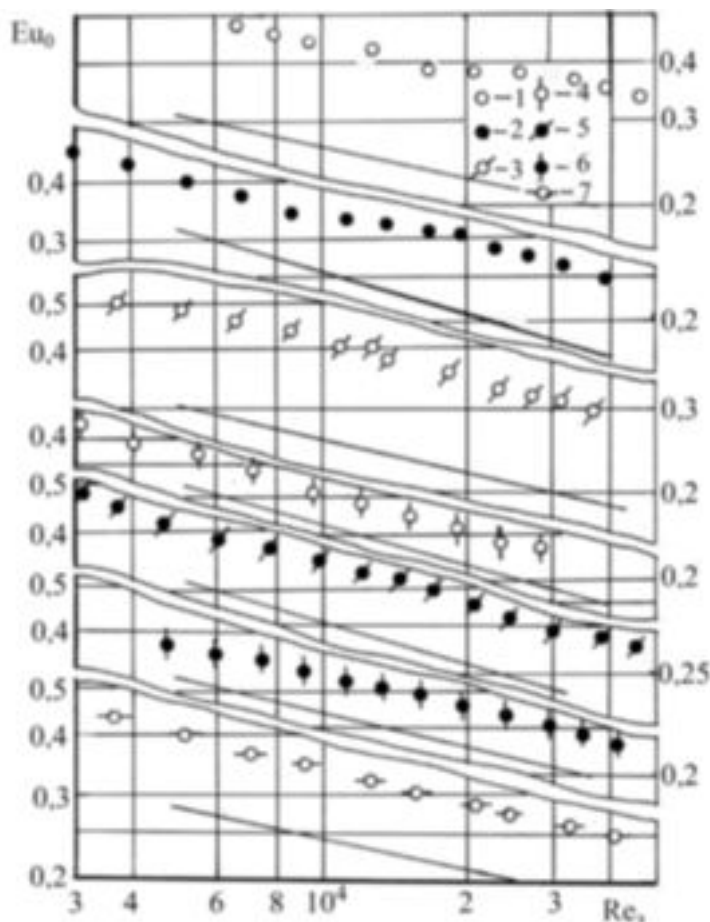


Рис. 2. Данные по аэродинамическому сопротивлению шахматных пучков труб со спирально-ленточным разрезным оребрением: 1 – пучок №48; 2 – №49; 3 – №58; 4 – №59; 5 – №11; 6 – №16; 7 – №17 (обознач. в соответствии с табл. 1,2).

2. Результаты исследований, их анализ и обобщение

Результаты исследования аэродинамического сопротивления в диапазоне $Re_3 = (3...50) \cdot 10^3$ представлены на рис. 2 и аппроксимированы в виде уравнения подобия

$$Eu_0 = C_r Re_3^{-n}, \quad (1)$$

где C_r и n опытные величины, зависящие от геометрических характеристик оребренных труб и параметров их размещения в пучках.

На рис. 2 нанесены в виде сплошных линий зависимости для аэродинамического сопротивле-

ния пучков труб с обычным спирально-ленточным оребрением, определяемые по формулам [7] и служащие в качестве базовых данных при сравнении с данными для пучков труб с разрезным оребрением.

Анализ экспериментальных данных на рис. 2 показал, что разрезное оребрение во всех рассматриваемых случаях приводит к росту аэродинамического сопротивления. Его приращения по отношению к базовому пучку лежат в пределах 10...60%. Наименьшее значение роста сопротивления соответствует меньшим значениям шагового параметра S_1/S_2 . Уменьшение шага ребер, например, с 5,0 мм до 4,5 мм повышает аэродинамическое сопротивление на 10...15%.

При обобщении опытных данных пучков труб с разрезным оребрением во внимание принимался тот факт, что показатель степени n при числе Re_3 в формуле (1) мало отличается от соответствующих значений для базовых пучков со спирально-ленточным оребрением, рассчитываемых по соотношению [7]:

$$n = 0,17(H/F)^{0,25} (S_1/S_2)^{0,57} \exp(-0,36 \cdot S_1/S_2). \quad (2)$$

Формула для расчета безразмерного коэффициента C_r в (1) представлена как произведение двух величин:

$$C_r = C_r^{\delta} C_n', \quad (3)$$

где C_n' – поправка на приращение аэродинамического сопротивления в пучках труб с разрезным оребрением, являющаяся функцией приведенной длины H/F и параметра размещения S_1/S_2 и имеющая следующий вид:

$$C_n' = 0,55(H/F)^{0,25} (S_1/S_2)^{0,4}. \quad (4)$$

C_r^{δ} – комплексный коэффициент для пучков труб со спирально-ленточным оребрением рассчитывается по рекомендациям [7]:

$$C_r^{\delta} = 1,4(H/F)^{0,53} (S_1/S_2)^{1,3} \exp(-0,9 S_1/S_2). \quad (5)$$

Таким образом, для расчета аэродинамического сопротивления шахматных пучков труб с разрезным оребрением при изотермическом обдуве воздуха в пределах $H/F = 5,0... 39,0$ и $S_1/S_2 = 0,8... 2,5$ в области чисел Рейнольдса $Re_3 = (3...50) \cdot 10^3$, предлагается система уравнений (1) – (5). Оценка точности обобщающих формул (1) – (5) осу-

существовала сопоставлением опытных $E_{u_{оп}}$ и расчетных $E_{u_{р}}$ значений чисел Эйлера для 34-х различных типоразмеров пучков труб. Указанная система с максимальной относительной погрешностью $\pm 20\%$ описывает массив опытных данных исследованных пучков труб.

Для пучков труб с разрезным оребрением серий 6,7 и размещений 10–12 (см.табл.1,2) были выполнены исследования в интервале небольших чисел Рейнольдса $10^3 \leq Re_{\rho} < 5 \cdot 10^3$, которые часто встречаются в процессах энерготехнологических производств. Анализ полученных экспериментальных данных в области $Re_{\rho} \approx 3 \cdot 10^3$ обнаружил отклонение закономерностей изменения чисел E_{u_0} от предлагаемых зависимостей (1) – (5), проявившееся в увеличении показателя степени n при числе Re_{ρ} , связанном с новыми условиями омывания пучка. Поэтому предлагаемые зависимости не могут быть использованы для расчета аэродинамических сопротивлений пучков при низких скоростях обдува порядка $w = 0,5...2,5$ м/с.

Первичные экспериментальные данные по аэродинамическому сопротивлению были обработаны по известной методике Escoa Fintube Corp [8], что позволило сравнить ее точность с предложенной методикой НТУУ “КПИ”. В методике Escoa применяется относительно сложная система расчетных соотношений для определения фактора трения, используемого в вычислениях аэродинамического сопротивления. По признанию самого автора [8], методика Escoa дает приемлемые результаты для так называемых “равносторонних” шахматных компоновок, но при расчете, например, “равнобедренных” шахматных пучков труб возможны большие погрешности.

Результаты сравнения опытных данных НТУУ “КПИ” с расчетами по методикам Escoa [4,8] и НТУУ “КПИ” показали расхождение в расчетах по этим методикам, превышающее $\pm 20\%$.

Выводы

1. Результатом экспериментальных исследований позволяют отметить, что применение труб с разрезным оребрением приводит к увеличению аэродинамического сопротивления на 10...60% по сравнению с обычным спирально-ленточным

оребрением, при этом на 25...35% возрастает интенсивность теплообмена и одновременно на 15...20% снижается металлоемкость и габариты теплообменной поверхности.

2. Разработанная в НТТУ “КПИ” инженерная методика расчета аэродинамического сопротивления шахматных пучков труб со спирально-ленточным разрезным оребрением является более точной и универсальной, чем [8], и может использоваться в широком диапазоне режимных и геометрических параметров.

3. Необходимо продолжить исследования влияния относительной глубины и формы разрезки, шаговых характеристик пучка на аэродинамическое сопротивление.

4. Перспективными могут оказаться новые исследования аэродинамического сопротивления пучков труб с разрезным оребрением в области низких чисел Рейнольдса $Re_{\rho} < 5 \cdot 10^3$.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Письменный Е.Н.* Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб. – К.: Альтерпрес, 2004. – 244 с.
2. *Письменный Е.Н.* Расчет конвективных поперечно-оребрённых поверхностей нагрева. – К.: Альтерпрес, 2003. – 184 с.
3. *Левченко Г.И. и др.* Оребренные поверхности нагрева паровых котлов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 168 с.
4. *Weirman C.* Correlations Ease the Selections of Finned Tubes// Oil and Gas J. – 1976. – Vol.74, № 36. – P.94–100.
5. *Терех А.М.* Теплообмен и аэродинамика поперечно-омываемых пучков труб с винтовым, подогнутым и сегментным оребрениями. Дис. ... канд.техн.наук: – Киев, 1997, – 160 с.
6. *Кейс В.М., Лондон А.Л.* Компактные теплообменники. – М.: Энергия, 1967. – 224 с.
7. *PTM 108.030.140-87.* Расчет и рекомендации по проектированию поперечно- оребренных конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов. – Л.:Минэнергомаш, 1988. – 30 с.
8. *Escoa Fintube Corp Turb - X* (Нормативный метод расчета корпорации). – USA, 1979. – 33 с.

Получено 21.03.2007 г.