

УДК 536.24:533.6.011

И. В. ГАЛУЩАК, старший преподаватель

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

ТЕПЛООТДАЧА ПОПЕРЕЧНО-ОБТЕКАЕМЫХ ШАХМАТНЫХ ПУЧКОВ ТРУБ С ПРОСЕЧНЫМ СПИРАЛЬНО-ЛЕНТОЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Представлены результаты экспериментального исследования конвективного теплообмена в шахматных пучках труб с просечным спирально-ленточным оребрением при поперечном омывании газовым потоком. Предложены эмпирические зависимости для инженерных расчетов теплообмена с учетом характеристик компоновки пучка, коэффициента оребрения трубы и высоты просечной части ребра.

Подані результати експериментального дослідження конвективного теплообміну в шахматних пучках труб з просічним спірально-стрічковим оребренням при поперечному обтіканні потоком газів. Запропоновані емпіричні залежності для інженерних розрахунків теплообміну з урахуванням характеристик компоновання пучка, коефіцієнта оребрення труби та висоти просічної частини ребра.

Введение

Основными конвективными элементами современных паровых и водогрейных котлов являются, как известно, теплообменники, в которых передается теплота от газообразных продуктов сгорания к рабочему телу – воде, пароводяной смеси, пару. Теплофизические свойства греющей и нагреваемой сред существенно различны, вследствие чего теплоотдача от газов к теплообменной поверхности на один-два порядка меньше теплоотдачи от поверхности к нагреваемой среде. Для повышения эффективности теплообмена указанное обстоятельство требует развития поверхности нагрева на стороне греющего газообразного теплоносителя.

Рабочее тело, как правило, находится под давлением. Высокую надежность в этих условиях обеспечивает трубчатая поверхность нагрева с протеканием рабочей среды внутри труб. Для развития внешней поверхности конвективных элементов котлов применяется оребрение разных типов. Наиболее широкое применение получило спирально-ленточное оребрение благодаря технологичности изготовления, широкой возможности варьирования геометрии оребрения и достижения достаточно высоких коэффициентов оребрения. Увеличение коэффициента оребрения достигается либо уменьшением шага ребер, либо увеличением их высоты, либо тем и другим. Однако, имеются ограничения как шага оребрения, так и высоты ребер. Уменьшение шага ограничивается гидродинамическими условиями течения газов и теплообмена в межреберных каналах, увеличение высоты ребер – условиями технологии изготовления и теплоотдачи. Высота ребер должна отвечать условию $h_p \leq 0,4d$ [1]. При увеличении высоты ребер возрастает их термическое сопротивление и снижается среднеповерхностный коэффициент теплоотдачи.

Кроме того, относительное уменьшение ширины межреберного зазора вызывает снижение теплоотдачи вследствие утолщения пограничных слоев у корня ребер и выключения части поверхности ребер и несущей трубы из активного теплообмена [2, 3].

Учитывая большую металлоемкость и громоздкость конвективных элементов котлов, поиск способов интенсификации теплообмена в них представляет весьма актуальную задачу.

Анализ исследований и публикаций

Установлено, что для интенсификации теплообмена в пучках ребристых труб требуется создать условия для разрушения утолщенных пограничных слоев и формирования вихревого режима течения в межреберных каналах [2]. Этот принцип хорошо реализуется путем расчленения сплошного ребра на отдельные пластины-

лепестки, при обтекании которых уменьшается толщина пограничных слоев на каждом лепестке и происходит турбулизация потоков при отрыве от острых кромок лепестков. Коэффициент теплоотдачи за счет этого, по оценке разных авторов, увеличивается в 1,3...1,8 раза при пропорциональном или опережающем росте аэродинамического сопротивления.

В большинстве этих работ использованы различные технологии изготовления разрезных ребер, но все они применимы лишь для накатанного оребрения из мягких цветных металлов, которые не применяются в котлостроении. Для стальных труб и стальных приварных ребер расчленение их на отдельные лепестки осуществляется предварительной просечкой стальной ленты на определенную высоту с последующей навивкой и приваркой ленты к трубе по технологии изготовления сплошного спирально-ленточного оребрения. Ширина просечки обычно составляет 1,6...2,0 мм.

После навивки и приварки ленты образуется множество лепестков с острыми кромками, которые, в зависимости от шага ребер, несколько смещены относительно друг друга.

Фрагменты просечного оребрения представлены на рис. 1.

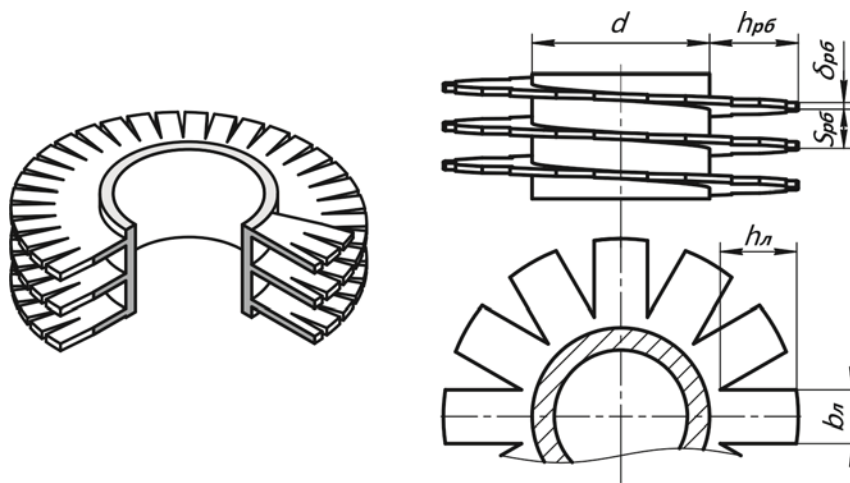


Рис. 1. Фрагменты труб с просечным спирально-ленточным оребрением

По теплообмену в пучках труб с просечным оребрением информация ограничена несколькими публикациями. При этом имеются противоречивые оценки его тепловой эффективности.

Первые результаты исследования теплообмена в пучках труб с просечным оребрением и их обобщение приведены в [4]. Расчеты конвективной теплоотдачи по соотношениям, рекомендуемым [4], показывают, что среднеповерхностный коэффициент теплоотдачи просечного оребрения на 18...37% выше, чем для сплошного оребрения и, тем самым, подтверждают высокую тепловую эффективность просечного оребрения.

Можно отметить некоторые особенности работы [4]. Показатель степени при числе Рейнольдса принят постоянным. Влияние высоты и шага ребер на теплообмен отдельно не рассмотрено, установлено их совместное влияние с помощью корреляционного коэффициента $C_a = f(h_p / (S_p - \delta_p))$, пропорционального коэффициенту теплоотдачи конвекцией. В области изменения $h_p / (S_p - \delta_p)$ от нуля до 2,4 коэффициенты C_3 для сплошного и просечного оребрения равны. Следовательно, если, например, $S_p = 5$ мм, $\delta_p = 1,0$ мм, коэффициенты теплоотдачи получаются одинаковыми при h_p от нуля до 9,6 мм, что не подтверждается результатами других исследований. При том же шаге ребра и его высоте 16,0 мм, $h_p / (S_p - \delta_p) = 4,0$ теплоотдача разрезного оребрения превышает таковую для сплошного оребрения всего лишь в 1,07 раза. При увеличении шага от 5 до 8 мм при $h_p = 16$ мм коэффициент C_3 увеличивается в 1,17 раза.

Влияние глубины просечки ленты (высоты лепестков) на теплообмен не установлено.

Количество поперечных рядов труб в шахматном пучке учитывается корреляционным коэффициентом C_5 , зависящим от числа поперечных рядов и отношения продольного шага труб к поперечному (S_2/S_1). Значение этого коэффициента для однорядных пучков независимо от отношения S_2/S_1 постоянно и равно 0,7. С увеличением числа рядов труб Z_2 коэффициент C_5 увеличивается и тем больше, чем меньше S_2/S_1 . Для $Z_2 > 4$ C_5 при всех значениях S_2/S_1 принимается неизменным.

В [5] представлены результаты сравнительного экспериментального исследования теплообмена в шахматных пучках труб с просечным и сплошным оребрением. Исследование проведено при одной компоновке пучка и одной геометрии оребрения ($d = 114$ мм, $h_p = 13$ мм, $S_p = 5,9$ мм, $S_1/d = 1,75$, $S_2/d = 1,4$ и коэффициент оребрения $\psi = 5,4$). Коэффициенты теплоотдачи сплошного и просечного оребрения оказались одинаковыми, а сопротивление пучка с просечным оребрением – выше на 20...30 %. На основании этих результатов автор работы не рекомендует использовать трубы с просечным оребрением. Наиболее полно исследован теплообмен в шахматных пучках с просечным оребрением в [6, 7].

В качестве определяющего геометрического параметра оребренной трубы в этой работе принят коэффициент оребрения – ψ ; в качестве параметра, определяющего геометрию пучка – отношение поперечного шага труб в пучке к продольному – S_1/S_2 . Числа Re и Nu отнесены к наружному диаметру трубы, несущей оребрение. Исследование проведено в интервалах чисел Рейнольдса $Re_d = (5...50) \cdot 10^3$, параметра размещения труб в пучке $S_1/S_2 = 0,8...2,5$, коэффициента оребрения $\psi = 5,1...11,3$.

Установлено, что характер влияния геометрии труб и пучков, а также числа Re_d на среднеповерхностный теплообмен такой же, как для пучков труб со сплошным спирально-ленточным оребрением [7].

На этом основании рекомендуется рассчитывать теплообмен в пучках с просечным оребрением по соотношениям, предложенным ранее для расчета пучков со сплошным спирально-ленточным оребрением [8]. Различие заключается только в содержании коэффициента C , входящего в уравнение

$$Nu_d = CRs^m \quad (1)$$

Этот коэффициент дополнен множителем C_n , являющимся функцией параметров S_1/S_2 и ψ , равным $C_n = 1,3$. Он и определяет интенсификацию теплообмена просечным оребрением относительно сплошного.

Следует отметить, что в исследовании [6,7] использовались трубы разных диаметров (32, 38 и 42 мм) с различной высотой ребра и лепестка ($h_p = 14,5...19,5$; $h_n = 6,0...12,5$). Большинство составляют трубы с отношением высоты лепестка к высоте ребра $h_n/h_p = 0,414...0,438$ и частично – 0,592...0,641. Однако, влияние параметра h_n/h_p на теплообмен не установлено, так как геометрия исследованных серий труб не позволяла выделить отдельно изменение h_n/h_p при неизменных прочих параметрах.

Изменение интенсивности теплообмена в малорядных пучках учитывается коэффициентом C_z , также являющимся одним из множителей коэффициента C в уравнении (1).

Значение C_z рекомендуется определять по эмпирическим формулам для двух областей изменения S_1/S_2 : для области $S_1/S_2 \geq 2$ и области $S_1/S_2 < 2$, как и для сплошного оребрения [6,8]. Для области $S_1/S_2 \geq 2$ значения C_z , несколько больше, чем для области $S_1/S_2 < 2$. Для

однорядных пучков значения C_{Σ} получаются различными; при $Z_2 > 8$ $C_{\Sigma} = 1,0$ для обеих областей.

Несогласованность результатов различных исследований как в части тепловой эффективности просечного оребрения, так и в части влияния на теплообмен геометрических характеристик оребренных труб и компоновки пучков предполагает необходимость проведения дополнительных исследований с другой геометрией труб и пучков и обобщения результатов с учетом результатов предшествующих исследований.

Основная часть

Экспериментальное исследование проведено с целью определения среднеповерхностного коэффициента теплоотдачи шахматных пучков труб с просечным спиральным оребрением при максимальной глубине просечки ленты (высоте лепестка), неизменных значениях диаметра трубы и высоты ребра при различных значениях шага ребер; путем сопоставления полученных результатов с данными [6] установить влияние высоты лепестка на среднеповерхностный теплообмен.

Методика исследований

Исследование теплообмена проведено методом полного теплового моделирования на лабораторном стенде, состоящем из открытой аэродинамической трубы, центробежного вентилятора, пучков труб с просечным спиральным оребрением, системы питания электронагревателей всех труб пучка и комплекса измерительных устройств. Аэродинамическая труба длиной 3500 мм и поперечным сечением 240 x 296 мм состоит из трех участков: входного стабилизирующего, длиной 1500 мм, рабочего, длиной 1000 мм, и выходного, длиной 1000 мм. Перед трубой установлено сужающее устройство в виде трубы Вентури длиной 700 мм и минимальным поперечным сечением 150 x 150 мм. В этом сечении установлен трехканальный пневмометрический зонд для измерения расхода воздуха. Зонд установлен с помощью координатника. Между выхлопным патрубком вентилятора и трубой Вентури установлена проволочная сетка для выравнивания поля скоростей воздуха. Сечение канала трубы Вентури, где установлен пневмозонд, предварительно протарировано при шести расходах воздуха. Тарировочные коэффициенты в рабочем диапазоне расходов воздуха составляли 0,98...1,026, тарировочный коэффициент зонда – 0,995. Расход воздуха изменялся цилиндрической щелевой дроссельной заслонкой на всасе вентилятора. Перепад давлений на пневмозонде измерялся микроманометром ММН-300 класса точности 0,6.

Исследуемые пучки труб устанавливались в рабочем участке аэродинамической трубы. Пучки составлялись из натуральных труб-образцов длиной 280 мм, изготовленных Подольским машиностроительным заводом. Трубы в пучке располагались горизонтально. Рабочая оребренная длина труб-образцов – 240 мм. Количество труб в одном поперечном ряду в зависимости от шага S_1 составляло $Z_1 = 2,0...4,5$.

В случаях, когда верхняя и нижняя стенки измерительного участка пересекали пучок по осям труб, для получения эффекта «бесконечного пучка» [3] к стенкам крепились полутрубки (половинки разрезанных вдоль оребренных труб). Количество поперечных рядов составляло $Z_2 = 6...12$. Верхняя и нижняя металлические стенки рабочего участка внутри закрывались листами фанеры толщиной 12 мм. Геометрия пучков формировалась сеткой отверстий в трубных досках из фанеры толщиной 10...12 мм, через которые выводились неоребренные торцы труб. Все трубы пучка обогревались внутри электрическими нагревателями из нихромовой проволоки. Внутреннее пространство труб заполнялось мелким кварцевым песком. Концы проволоки нагревателей выводились через торцевые пробки из фторопласта с помощью винтов. Нагреватели питались переменным током от автотрансформаторов. Питание труб-калориметров – через стабилизатор напряжения. На трубах-калориметрах установлены термомпары для измерения температуры поверхности несущей трубы и ребер в трех точках по высоте: 3,0; 7,0 и 13,0 мм от поверхности трубы. На таких же расстояниях по высоте в середине межреберного зазора

установлены горячие спаи термопар для измерения температуры воздуха. Все температуры измерялись термопарами стандартной градуировки ХА из изолированных термоэлектродов диаметром 0,15 мм. Предварительно сплюсненные горячие спаи термопар приваривались к трубе и ребрам конденсаторным способом и покрывались тонким слоем термостойкого клея. Таким же клеем покрывались оголенные горячие спаи термопар для измерения температуры воздуха.

Конструкцией трубных досок предусмотрена возможность поворота труб-калориметров вокруг своей оси на 180° по потоку с фиксацией через каждые 30°. При каждом угле поворота измерялись поля температур стенки и воздуха во всех точках.

Трубы-калориметры устанавливались в 5...11 ряду в зависимости от общего числа поперечных рядов. В каждом ряду пучка одна труба, кроме калориметра, оснащалась термопарами, приваренными к поверхности несущей трубы в межреберных каналах через 45° по окружности трубы от нуля до 180°.

Холодные спаи всех термопар подключались к групповому термостату и сосуду Дьюара с тающим льдом. Термо-э.д.с. термопар измерялась вольтметром В7-34А.

Температура воздуха перед измерительным участком и после него измерялась ртутными термометрами типа СП-25 на пределы измерения 10...40°С с ценой деления 0,2°С и дублировалась термопарами стандартной градуировки ХК.

Для определения энергии, выделяемой трубами-калориметрами, измерялись напряжение вольтметром В7-38 и сила тока амперметром Д50141 класса точности 0,2. Сила тока в цепи питания нагревателей остальных труб пучка измерялась стрелочным амперметром с зеркальной шкалой класса точности 0,5 через трансформатор тока U54М класса точности 0,2.

Среднеповерхностный коэффициент теплопередачи конвекцией труб-калориметров рассчитывался по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{Q_K}{H_K(\bar{t}_{ст} - \bar{t}_в)}, \text{ Вт/м}^2\text{°С},$$

где Q_K – тепловыделение калориметра, Вт;

H_K – полная площадь поверхности труб-калориметров, м²;

$\bar{t}_{ст}$ – усредненная температура поверхности калориметра, °С;

$\bar{t}_в$ – средняя температура воздуха в ряду установки калориметра, °С.

Усредненная температура поверхности калориметра определялась по формуле

$$\bar{t}_{ст} = \frac{\sum t_i H_i}{\sum H_i},$$

где t_i – температура поверхности участка калориметра, в котором установлена i -тая термопара.

Средняя температура воздуха в ряду установки калориметра вычислялась из соотношения

$$\bar{t}_в = t'_в + \frac{\sum Q'_{р.к} + 0,5Q_{р.к}}{G},$$

где $t'_в$ – температура воздуха на входе в пучок, °С;

$Q_{р.к}$ – тепловыделение ряда, в котором установлен калориметр, Вт;

$\sum Q'_{р.к}$ – суммарное тепловыделение рядов, предшествующих ряду установки калориметра, Вт;

G – расход воздуха через пучок, кг/с;

C – удельная массовая теплоемкость воздуха, кДж/(кг °С).

Исследование теплообмена проведено в стационарных условиях.

Результаты исследования

Среднеповерхностная теплоотдача глубинных рядов труб исследована на 27 пучках. Геометрические характеристики оребренных труб представлены в табл. 1, геометрия пучков – в табл. 2.

Таблица 1

Геометрические характеристики труб

Серия	Диаметр трубы, d, мм	Высота ребра, h _р , мм	Толщина ребра, δ, мм	Шаг ребер, S _р , мм	Ширина лепестка, b _л , мм	Высота лепестка, h _л , мм	Коэффициент оребрения, ψ
1	28,0	14,5	1,0	5,0	4,0	9,5	9,012
2	28,0	14,5	1,0	6,0	4,0	9,5	7,677
3	28,0	14,5	1,0	8,0	4,0	9,5	6,010

Для определения количественных соотношений между числами Nu_d и Re_d были построены зависимости экспериментальных значений чисел Nu_d от чисел Re_d в логарифмических координатах. Числа Nu_d и Re_d отнесены к диаметру несущей трубы.

Таблица 2

Геометрические характеристики исследованных пучков труб

Номер компоновки	S ₁ , мм	S ₂ , мм	S ₁ /S ₂	Серия труб					
				1		2		3	
				m	C _q	m	C _q	m	C _q
1	66	132	0,500	0,669	0,163	0,663	0,177	0,655	0,197
2	85	132	0,644	0,671	0,161	0,664	0,179	0,655	0,202
3	85	85	1,000	0,681	0,153	0,674	0,171	0,660	0,201
4	85	74	1,149	0,683	0,150	0,676	0,171	0,666	0,195
5	85	53	1,604	0,703	0,133	0,696	0,149	0,685	0,174
6	98	53	1,849	0,721	0,118	0,716	0,130	0,694	0,159
7	98	48	2,042	0,736	0,104	0,730	0,117	0,716	0,136
8	118	48	2,458	0,770	0,074	0,761	0,085	0,753	0,099
9	147	48	3,063	0,806	0,043	0,794	0,051	0,784	0,059

Число Re_d изменялось в пределах 6,5...41·10³. Часть этих зависимостей представлена на рис. 2. Данные рис. 2 подтверждают, во-первых, степенной характер взаимосвязи указанных критериев, а, во-вторых, зависимость параметров m и C_q как от геометрии оребрения, так и от геометрии пучков.

Для глубинных рядов эта зависимость имеет вид

$$Nu_d = C_q Re_d^m \quad (1a)$$

Обработка полученных зависимостей по методу наименьших квадратов с помощью ПК позволила определить значения коэффициентов m и C_q для всех пучков. Среднеквадратичная погрешность аппроксимации составила 0,33...1,30 %. Изменение этих параметров при изменении параметров S_1/S_2 и ψ представлены на рис. 3.

Следует отметить, что полученные значения показателя степени при числе Рейнольдса m – очень близко совпадают со значениями, рассчитанными по [6]; коэффициенты m и C_q изменяются по закону гиперболического тангенса (рис. 3). Эти обстоятельства дали основания выполнять последующее обобщение результатов исследования по методике [6, 8].

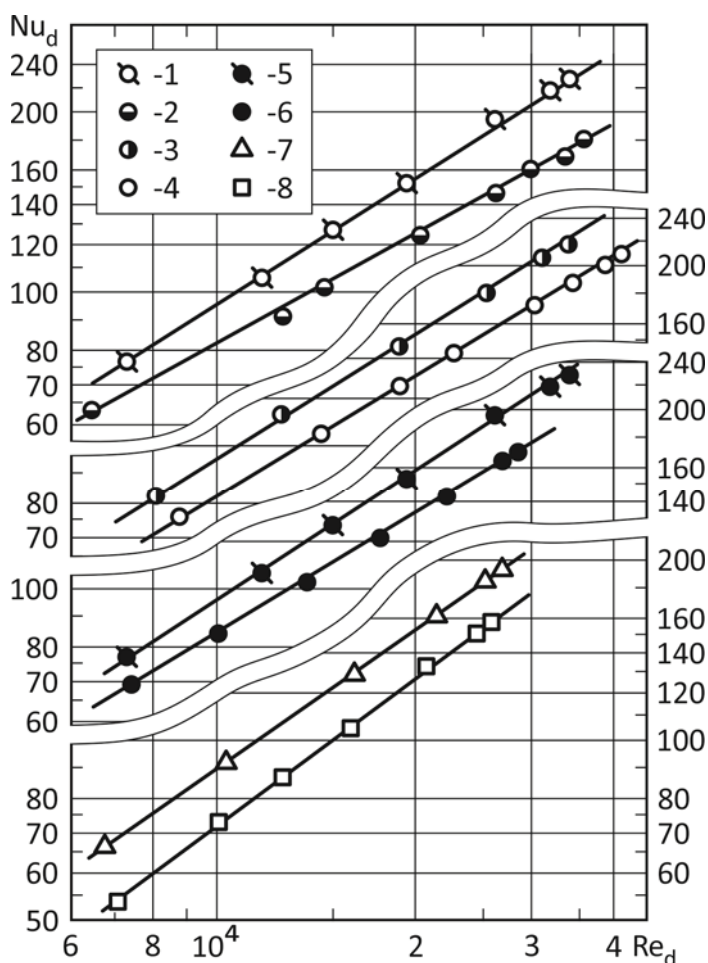


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $Nu_d = f(Re_d)$:

1 – пучок № 26; 2 – пучок № 27; 3 – пучок № 25; 4 – пучок № 31; 5 – пучок № 35; 6 – пучок № 23; 7 – пучок № 18; 8 – пучок № 19; 1–7– номера пучков в соответствии с табл. 1 и 2 (первая цифра – номер серии труб, вторая – номер компоновки пучка)

Согласно [8] изменение m может быть описано функцией вида

$$m = b_1 th \left[\frac{S_1}{S_2} - \left(\frac{S_1}{S_2} \right)_0 \right] + m_0 \quad (2)$$

Коэффициент b_1 определен из разностей значений m на границах исследованного диапазона S_1/S_2 для всех тангенсоид $\psi = Const$. Значение этого коэффициента оказалось равным 0,08, что совпадает с данными [8]. Значения координат точек перегиба тангенсоид определены путем графического их дифференцирования. Зависимости координат точек перегиба от степени оребрения ψ в исследованном диапазоне ее изменения представлены на рис. 4. Значение координаты $(S_1/S_2)_0$ совпадает с расчетом по [8], в связи с чем для расчета этой координаты принимается соответствующая функция из [8].

$$\left(\frac{S_1}{S_2}\right)_0 = 1,26/\psi + 2 \quad (3)$$

Зависимость координаты m_0 от ψ в исследованном диапазоне, как видно из рис. 4, линейна и с достаточной точностью аппроксимируется функцией

$$m_0 = 0,685 + 0,0067\psi \quad (4)$$

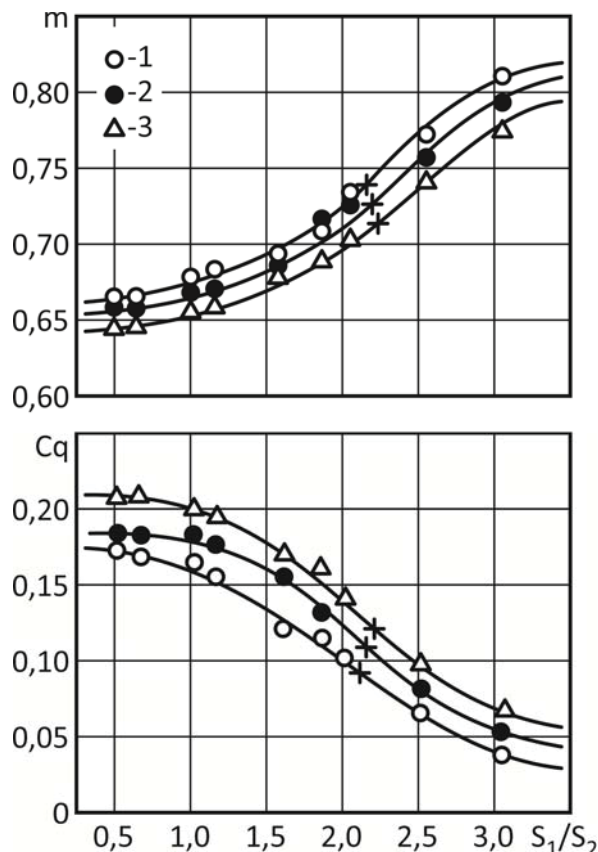


Рис. 3. Зависимости $m = f(S_1/S_2; \psi)$, $\psi = \text{Const}$ и $C_q = f(S_1/S_2; \psi)$, $\psi = \text{Const}$:
 1 – $\psi = 9,012$; 2 – $\psi = 7,677$; 3 – $\psi = 6,01$

С учетом (2), (3), и (4) и численного значения коэффициента b_1 для расчета показателя степени m при числе Re_d рекомендуется следующая обобщающая зависимость

$$m = 0,685 + 0,08 \operatorname{th} \left(\frac{S_1}{S_2} - \frac{1,26}{\psi} + 2 \right) + 0,0067\psi \quad (5)$$

Погрешность аппроксимации значений m уравнением (5) не выходит за пределы $\delta = -0,43 \dots +0,76 \%$.

Для обобщения опытных значений коэффициента C_q принята функция типа [8]:

$$C_q = -b_2 \operatorname{th} \left[\frac{S_1}{S_2} - \left(\frac{S_1}{S_2} \right)_0 \right] + C_0 \quad (6)$$

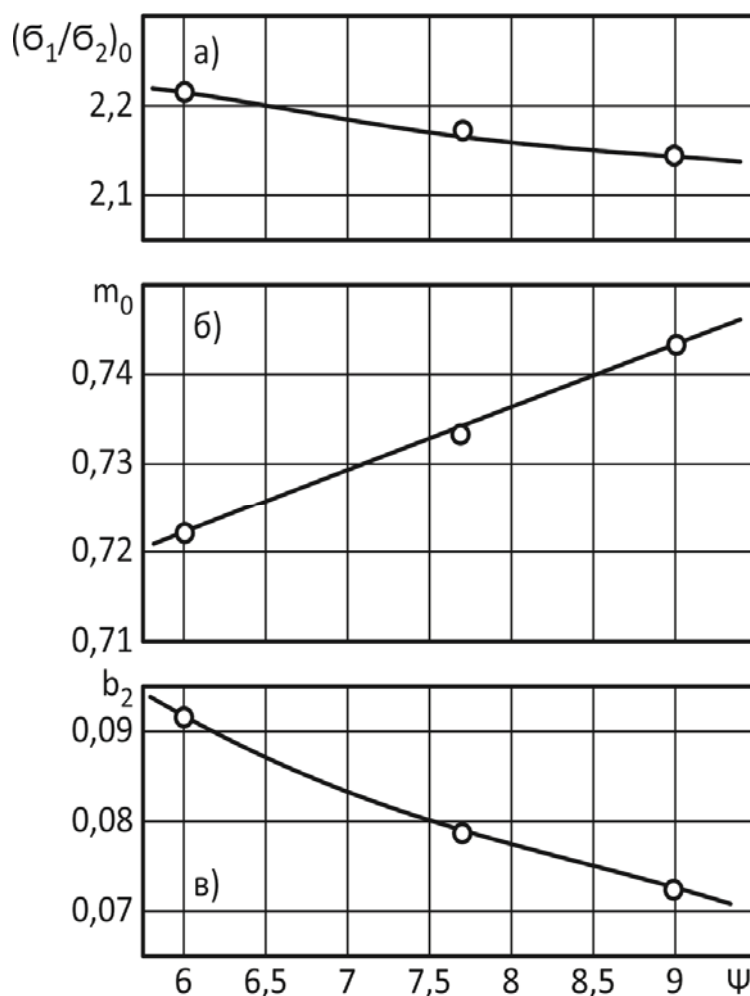


Рис. 4. Зависимости $(\sigma_1/\sigma_2)_0$ - (а), m_0 - (б) и b_2 - (в)

В этом уравнении значения $(S_1/S_2)_0$ зависят от коэффициента оребрения и определяются по зависимостям $c_q = f(S_1/S_2; \psi)$, представленным на рис. 3. Численно они совпадают со значениями, найденными по зависимостям $m = f(S_1/S_2; \psi)$. Другая координата точек перегиба тангенсoid $c_q - f(S_1/S_2; \psi) - c_0$ – определена по графикам. Обработка и анализ опытных данных показали, что численные значения коэффициентов c_0 и b_2 изменяются примерно одинаково при изменении ψ . Зависимость $b_2 = f(\psi)$ представлена на рис. 4,б и может быть аппроксимирована с достаточной точностью. уравнением

$$b_2 = 0,251\psi^{-0,866} \quad (7)$$

Отношение $c_0/b_2 = \text{Const} \approx 1,357$. С учетом найденных значений $(S_1/S_2)_0$, b_2 , c_0 и c_0/b_2 формула для расчета c_q принимает вид:

$$c_q = \left[1,357 - \text{th} \left(\frac{S_1}{S_2} - \frac{1,26}{\psi} - 2 \right) \right] \cdot 0,251\psi^{-0,866} \quad (8)$$

Среднеквадратичная погрешность аппроксимации экспериментальных значений c_q уравнением (8) составляет от -5,58% до +0,67%.

Изменение итоговой характеристики теплообмена – критерия Нуссельта – в зависимости от параметра компоновки пучков (S_1/S_2) и степени оребрения труб ψ при $Re_d = 15 \cdot 10^3 = \text{Const}$ представлено на рис. 5. Зависимости имеют экстремальный характер, максимальные значения Nu_d находятся в зоне $S_1/S_2 = 2,0 \dots 2,5$, т.е. в зоне $(S_1/S_2)_0$. По обе стороны от максимумов опытные значения уменьшаются, причем более резко – в области $S_1/S_2 > 2,5$. Увеличение степени оребрения труб приводит к уменьшению чисел Nu_d во всем диапазоне изменения S_1/S_2 и ψ .

Отмеченные особенности изменения интенсивности конвективного теплообмена являются следствием изменения гидродинамических условий обтекания оребренных труб в пучках с различной геометрией и степенью оребрения. Анализ этих условий при обтекании пучков труб со сплошным спирально-ленточным оребрением приведен в [8]. Судя по полученным зависимостям $Nu_d = f(S_1/S_2, \psi)$, можно предположить, что и в случае просечного оребрения характер влияния на теплообмен гидродинамических условий обтекания труб в пучках подобен отмеченному.

Результаты исследования теплоотдачи, представленные на рис. 5, были сравнены с результатами расчета по методике [6] для тех же условий ($Re_d = 15 \cdot 10^3$, геометрия труб – из табл. 1, геометрия пучков – из табл. 2). Характер зависимостей $Nu_d = f(S_1/S_2, \psi)$ оказался достаточно близким, но опытные значения Nu_d (рис. 5) во всех случаях превышают расчетные по [6] на 8...12 %. В таком же соотношении находятся значения Nu_d , рассчитанные по [6], а также по соотношениям (3), (7) –(8) и (1а) для труб и пучков из табл.1 и 2 [6] и $Re_d = 15 \cdot 10^3$.

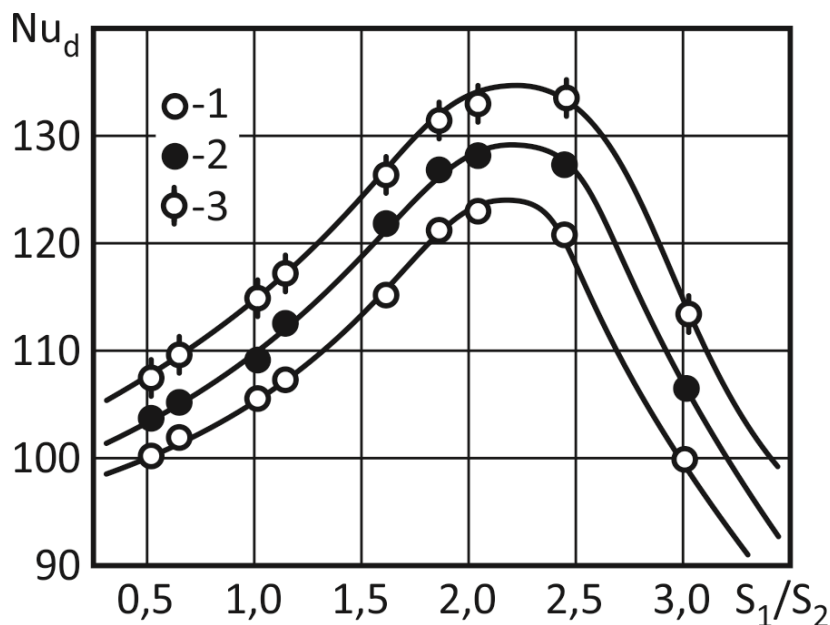


Рис. 5. Зависимости $Nu_d = f(S_1/S_2, \psi), \psi = \text{Const}$:
 1 – $\psi = 6,01$; 2 – $\psi = 7,677$; 3 – $\psi = 9,012$

Анализ результатов расчетов показал, что причиной отмеченных расхождений является различие относительной высоты лепестков. В [6] обобщение выполнено на базе просечного оребрения с $h_{\pi}/h_p = 0,414 \dots 0,641$ (большинство составляет оребрение с $h_{\pi}/h_p = 0,414 \dots 0,438$); предлагаемое в этой статье обобщение выполнено на базе просечного оребрения с максимальной высотой лепестков $h_{\pi}/h_p = 0,655$. Максимальная высота лепестка определяется условиями технологии изготовления – исключением образования трещин и

разрывов ленты у основания лепестков – и составляет $\approx 0,66h_p$

Экспериментальное исследование теплоотдачи пучков труб с различной высотой лепестков при прочих одинаковых геометрических размерах оребрения в настоящее время затруднено по причине весьма ограниченной возможности изготовления нескольких десятков коротких натуральных труб-образцов требуемой геометрии на высокопроизводительном промышленном оборудовании. В связи с этим, в данной работе анализ влияния относительной высоты лепестков на интенсивность теплообмена выполнен численным методом [9]. Метод позволил определить значения среднесреднего конвективного коэффициента теплоотдачи в межреберных каналах, варьируя только высотой лепестка при постоянной скорости потока газов применительно к геометрии труб серии 2, табл. 1.

Результат численного исследования представлен на рис. 6 в виде зависимости $Nu/Nu^{max} = f(h_p/h_p^{max})$. Эта зависимость в пределах изменения $h_p/h_p^{max} = 0,1 \dots 1,0$ аппроксимируется степенной функцией

$$Nu/Nu^{max} = 0,995(h_p/h_p^{max})^{0,9221} \tag{9}$$

со среднеквадратичной относительной погрешностью $\delta = 1,84 \%$.

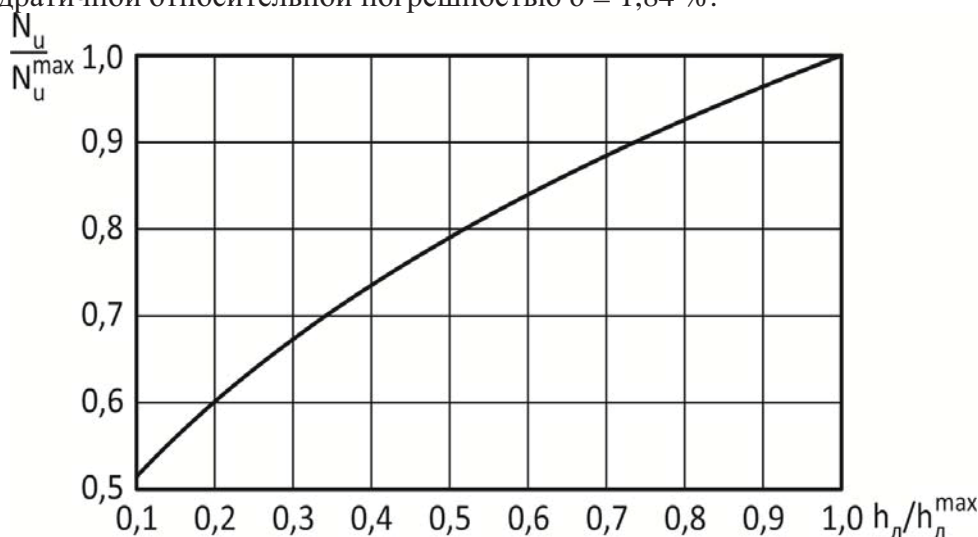


Рис. 6. Зависимость отношения Nu_d/Nu_d^{max} от относительной высоты лепестка

Усредненное значение h_p/h_p^{max} в [6] согласно табл. 1 составляет $\sim 0,75$. По графику рис. 6 число Nu_d составит $\sim 0,9Nu_d^{max}$. Как отмечалось выше, примерно в таком же соотношении находятся опытные значения чисел Nu_d с расчетными по [6].

Следовательно, для учета влияния относительной высоты лепестков в уравнение (1а) следует ввести поправку

$$C_h = 0,995(h_p/h_p^{max})^{0,9221}, \tag{10}$$

вычисляя Nu_d^{max} по соотношениям (1а), (5) и (8).

При использовании труб с просечным оребрением могут оказаться актуальными малорядные пучки с $Z_2 = 2 \dots 5$. Для определения теплоотдачи конвекцией таких пучков проведено дополнительно 24 опыта с $Z_2 = 1 \dots 4$ при различной компоновке пучков ($S_1/S_2 = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5$ и $3,0$).

В результате обработки результатов этого исследования получено следующее обобщающее выражение для определения коэффициента C_h :

$$C_z = 0,712 \left(\frac{\xi_1}{\xi_2} \right)^{-0,032} \cdot Z_2^{0,2285} \quad (11)$$

С учетом (10) и (11) для расчета конвективной теплоотдачи шахматных пучков труб при омывании их воздухом рекомендуется выражение

$$Nu_d = C_z C_q C_h Re^m$$

При омывании пучков другими газами в последнее уравнение следует ввести число Прандтля в степени 0,33 и коэффициент 1,13, равный $1/Pr_2^{0,33}$. Тогда окончательное выражение для расчета Nu_d в отмеченных выше пределах изменения определяющих параметров, охваченных экспериментом, принимает вид

$$Nu_d = 1,13 C_z C_q C_h Re^m Pr_2^{0,33} \quad (12)$$

Сопоставление опытных значений Nu_d и рассчитанных по предлагаемым соотношениям показывает, что максимальная погрешность расчета Nu_d составляет 6,5 %.

Для определения эффективности применения просечного спирального оребрения выполнены расчеты величины и массы поверхности нагрева, а также аэродинамического сопротивления котла-утилизатора П-83 газопаротурбинного энергоблока ПГУ-345 при замене сплошного оребрения просечным с теми же высотой, толщиной и шагом ребер и максимальной высотой лепестков. В результате установлено, что за счет повышения $\bar{\alpha}_k$ на 38% масса поверхностей нагрева (труб и коллекторов) уменьшается на 345 т (25 %) при практически одинаковом падении давления газов в котле. Кроме экономии металла, достигается значительная экономия энергоресурсов. По данным [10] отраслевая (металлургическая) энергоемкость производства 1 т стального проката составляет 1262,8 кг у.т./т. Следовательно, экономия энергоресурсов составит $345 \times 1262,8 = 425666$ кг у.т.

Выводы

1. Подтверждена значительная интенсификация теплообмена в шахматных пучках труб с просечным спиральным оребрением относительно пучков труб со сплошным оребрением (на 30...40 %).
2. Величина интенсификации теплообмена существенно зависит от относительной глубины просечки ленты (высоты лепестка). Например, при $h_p/h_p^{max} \approx 0,6$, коэффициент $\bar{\alpha}_k$ уменьшается на 16 % относительно максимально достижимого за счет просечки ленты.
3. Предложены обобщающие соотношения для инженерного расчета теплоотдачи конвекцией шахматных пучков труб с просечным спирально-ленточным оребрением с учетом отношения h_p/h_p^{max} .
4. Показано, что применение для поверхностей нагрева котлов просечного спирально-ленточного оребрения труб позволяет существенно (до 25 %) снизить металлоемкость поверхностей нагрева и настолько же снизить расход энергии на производство материала для труб.
5. Актуальной остается задача экспериментального исследования влияния относительной высоты лепестков на интенсивность теплоотдачи.

Список литературы

1. Мигай В. К., Быстров П. Г., Федотов В. В.. Теплообмен в поперечно-обтекаемых пучках труб с оребрением лепесткового типа // Тяжелое машиностроение, 1992, № 7. – С. 8–10.
2. Антуфьев В. М., Гусев Е. К. Интенсификация теплообмена оребренных поверхностей при поперечном обтекании // Теплоэнергетика. – 1968. – № 7. – С. 31–34.
3. Стасюлявичус Ю. К., Скринска А. И. Теплоотдача поперечно обтекаемых пучков ребристых труб. Вильнюс: «Минтис». – 1974. – 243 с.
4. C. Weierman. Correlation Ease the Selection of Finned Tubes // Oil and Gas Journal. – 1976. – Vol.74. – № 36. – P. 94–100.
5. Юдин В. Ф. Теплообмен поперечно-оребранных труб, Л.: Машиностроение. – 1982. – 189 с.
6. Письменный Е. Н., Терех А. М., Рогачев В. А., Бурлей В. Д., Горащенко О. С. Теплообмен

в шахматных пучках труб со спирально-ленточным разрезным оребрением // Промышленная теплотехника, 2007. – Т. 29. – № 6. – С. 15–22.

7. Терех А. М. Теплообмен и аэродинамика поперечно-омываемых пучков труб с винтовым, подогнутым и сегментным оребрением. Дисс... канд. техн. наук. – Киев. – 1997. – 160 с.

8. Письменный Е. Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб. – К.: Альтерпрес, 2004. – 244 с.

9. Галушак И. В., Горбатенко В. Я., Шевелев А. А. Метод численного моделирования теплового состояния трубы с просечным спирально-ленточным оребрением // Теплоэнергетика. – 2011. – № 5. – С. 72–77.

10. Сталинский Д. В., Каневский А. Л., Лесовой В. В., Литвиненко В. Г. Энергоемкость производства продукции на металлургических предприятиях Украины // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2010. – № 4. – С. 126–130.

HEAT TRANSFER IN CROSS-FLOW STAGGERED TUBE BANKS WITH CUT-THROUGH COILED RIBBON FINNING

I. V. GALUSHCHAK, seniora teacher

The paper presents results of the experimental study of convection heat transfer in staggered tube banks with cut-through coiled ribbon finning in transverse gas flow. It offers empirical relationships for engineering calculations of heat transfer considering the characteristics of the bank arrangement, the finned tube factor and the height of the cut-through part of the fin.

1. Migai V. K., Bistrov P. G., Fedotov V.V. Heat exchange in cross streamline bunches of pipes with an orebreniye of petal type [Migay V. K., Bistrov P. G., Fedotov V. V. Teploobmen v poperechno-obtekaemykh puchkakh trub s orebreniem lepectkovogo tipa] Heavy mechanical engineering, 1992, p. 8-10.

2. Antufiev V. M., Gusev E. K. Heat exchange intensification the ribbed surfaces at a cross flow [Antuffev V. M., Gusev E. K. Intensifikatsia teploobmena orebrennykh poverkhnostey pri poperechnom obtekanii] Heat-and-power engineering. – 1968. – № 7. – p. 31–34.

3. Stasyalayvichus U.K., Skrinska A.I. Thermolysis of cross streamline bunches of ridge pipes [Stasyulyavichyus Yu. K., Skrinska A. I. Teplootdacha poperechno-obtekaemykh puchkov rebristykh trub] Vilnius: "Mintis". – 1974. – 243 p.

4. C. Wierman. Correlation Ease the Selection of Finned Tubes [C. Weierman. Correlation Ease the Selection of Finned Tubes] Oil and Gas Journal. – 1976. – Vol.74. – № 36. – p. 94–100.

5. Judin V. F. Heat exchange cross ribbed pipes [Yudin V. F. Teploobmen poperechno-orebrennykh trub.] L.: Mechanical engineering. – 1982. – 189 p.

6. Pismenniy E. N., Terekh A. M., Rogachov V. A., Burlei V. D., Gorashchenko O. S. Heat exchange in chess bunches of pipes with a spiral and tape ribbing [Pismennyy E. N. Terekh A. M. Rogachov V. A., Burley V. D., Gorashchenko O. S. Teploobmen v shakhmatnykh puchkakh trub so spiralno-lentochnym razreznym orebreniem] Industrial heating engineer, 2007. – t. 29. – № 6. – p. 15–22.

7. Terekh A. M. Heat exchange and aerodynamics cross washed bunches of pipes with the screw turned-in and segment Ribbing [Terekh A. M. Teploobmen i aerodinamika poperechno-omyvaemykh puchkov trub s vintovym, podognutym i segmentnym orebreniem] Diss...kand.tekhn.nauk. – Kiev. – 1997. – 160 p.

8. Pismenniy E. N. Heat exchange and aerodynamics of packages cross ribbed pipes [Pismennyy E. N. Teploobmen i aerodinamika paketov poperechno-orebrennykh trub.] – K.: Altpress, 2004. – 244p.

9. Galushchyak I. V., Gorbatenko V. Y., Shevelev A. A. Method of numerical modeling of a thermal condition of a pipe with a prosechny spiral and tape ribbing [Galushchak I. V., Gorbatenko V. Ya., Shevelev A. A. Metod chislennoy modelirovaniya teplovogo sostoyaniya trub s prosechnym spiralno-lentochnym orebreniem] Power system. – 2011. – № 5. – p. 72–77.

10. Stalinskiy D. V., Kanevskiy A. L., Lesivoy V. V., Litvinenko V. G. Power consumption of production at the metallurgical enterprises of Ukraine [Stalinskiy D. U., Kanevskiy A. L., Lesovoy V. V., Litvinenko V. G. Energoyomkost proizvodstva produktsii na metallurgicheskikh predpriyatiyakh] Metallurgical and mining industry. – 2010. – № 4. – p. 126–130.

Поступила в редакцию 10.10 2013 г.