

УДК 621.1.016

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

Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»

ТЕПЛООБМЕН В КОРРИДОРНЫХ ПОПЕРЕЧНООМЫВАЕМЫХ ПУЧКАХ ТРУБ С РАЗРЕЗНЫМ СПИРАЛЬНО-ЛЕНТОЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Подані результати експериментального дослідження теплообміну в поперечно-обмивних коридорних пучках труб з розрізним спіральним поребрінням. Показано, що інтенсивність теплообміну залежить від геометрії поребріння пучка і, в середньому, на 20 % вища в порівнянні з пучками труб з суцільним спіральним поребрінням.

The results of the experimental research of the heat transfer in cross-washed in-line tube banks with cut spiral fins are presented. It is shown that the intensity of the heat transfer is depend on the geometry of the fins and tube banks and overage on 20 % comparing with tube banks with unbroken spiral fins.

Газожидкостные или газопаровые теплообменники в виде пакетов труб находят широкое применение в теплоэнергетике, в системах теплоснабжения и вентиляции и др. Как правило, в теплообменниках такого типа жидкость или пар омывают трубы изнутри продольно, а газообразный теплоноситель – снаружи поперечным потоком. При этом результирующий теплообмен лимитируется теплоотдачей на стороне газового теплоносителя. Увеличение передачи теплоты возможно путем увеличения площади поверхности нагрева с газовой стороны. Для этой цели применяется оребрение наружной поверхности труб. Наибольшее распространение получило спирально-ленточное оребрение, отличающееся технологичностью изготовления и допускающее широкое варьирование геометрических характеристик.

В то же время интенсивность теплоотдачи с газовой стороны не возрастает и даже несколько снижается вследствие более низкой тепловой эффективности ребер в сравнении с тепловой эффективностью стенки трубы и снижения теплоотдачи излучением. Поэтому весьма актуальной задачей является интенсификация теплообмена в пучках оребренных труб.

Одним из способов интенсификации теплоотдачи спирально-ленточного оребрения является предварительная просечка ленты, вследствие чего при навивке ее на трубу образуется множество лепестков с острыми кромками [1]. При омывании газовым теплоносителем такого оребрения происходит периодическое возобновление гидродинамического и теплового пограничных слоев и уменьшение их толщины на каждом лепестке, а также турбулизация потока при срыве с острых кромок лепестков, что и предопределяет повышение интенсивности теплоотдачи. Однако эти же факторы вызывают и увеличение аэродинамического сопротивления.

В немногочисленных публикациях по просечному оребрению имеются противоречивые точки зрения относительно его эффективности. Так, по данным [1] оребрение из предварительно просеченной ленты характеризуется повышением коэффициента теплоотдачи примерно на 18-20 % в сравнении с оребрением из сплошной ленты, а увеличение коэффициента сопротивления компенсируется уменьшением числа рядов труб по ходу газов, обусловленным повышением интенсивности теплоотдачи. Согласно результатам экспериментального исследования [2] коэффициенты теплоотдачи оребрения из просечной и сплошной ленты в шахматном пучке оказались одинаковыми, а сопротивление пучка труб из просечной

ленты выше на 20-30 %. Следует отметить, что исследование [2] проведено при одной геометрии оребрения и пучка труб.

Более обширное и детальное исследование проведено в НТУУ «КПИ» [3], в результате которого установлено, что среднеповерхностный коэффициент теплоотдачи разрезного оребрения в коридорных пучках труб на 10-30 % превышает аналогичный показатель сплошного спирально-ленточного оребрения, а аэродинамическое сопротивление разрезного оребрения выше на 15-45 %.

Несогласованность отмеченных результатов исследований теплоаэродинамической эффективности спирально-ленточного оребрения из просечной ленты указывает на необходимость получения дополнительных экспериментальных данных и тем самым расширения базы данных для разработки или уточнения методик расчета теплообмена и сопротивления в рассматриваемых пучках труб.

С этой целью в НТУ «ХПИ» проведено экспериментальное исследование теплообмена и аэродинамики коридорных пучков труб с просечным спирально-ленточным оребрением. Здесь приводятся только результаты исследований теплообмена.

Методика исследования.

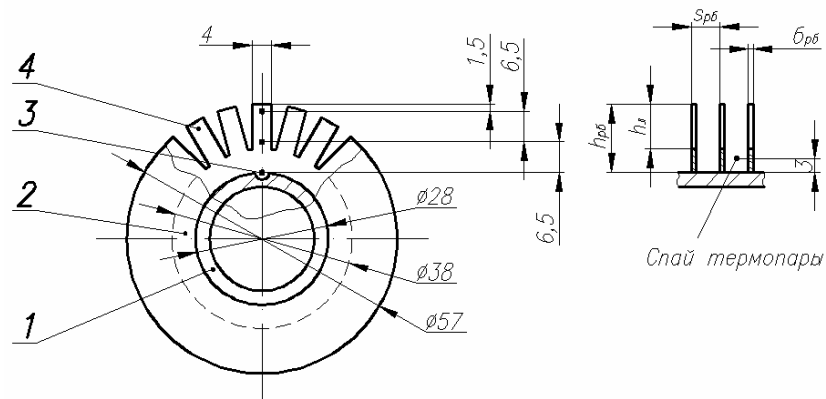
Исследование проведено методом полного теплового моделирования в стационарных условиях при вынужденной конвекции.

Опытные пучки труб устанавливались в измерительном участке открытой аэродинамической трубы внутренним поперечным сечением 240×294 мм длиной 1000 мм. Перед измерительным участком расположен прямой свободный участок длиной 1500 мм для стабилизации потока перед входом в исследуемый пучок труб. После измерительного участка установлен также прямой участок длиной 1000 мм. Воздух в аэродинамическую трубу нагнетается центробежным вентилятором. Между выхлопом вентилятора и стабилизационным участком установлено сужающее устройство в виде трубы Вентури длиной 700 мм и минимальным поперечным сечением 150×150 мм. В этом сечении установлен трехканальный пневмометрический зонд для измерения расхода воздуха; зонд закреплялся в координатнике, что позволило устанавливать его строго навстречу потоку воздуха. Между сужающим участком трубы и выхлопным патрубком вентилятора установлена демпфирующая решетка из проволочной сетки. Сечение канала, в котором установлен зонд предварительно было протарировано на шести расходах воздуха. Значения тарировочных коэффициентов составили $0,98 \div 1,025$.

Исследуемые пучки составлялись из труб, изготовленных Подольским машиностроительным заводом. Все трубы имели одинаковые геометрические характеристики, кроме шага ребер: диаметр несущей трубы – 28 мм; высота ребра – 14,5 мм; высота лепестка – 9,5 мм; толщина ребра – 1 мм; относительная высота рассечки – 0,655. Шаг ребер составлял 5, 6 и 8 мм, чему соответствуют значения коэффициента оребрения $\psi = 10,01; 8,509; 6,632$.

В каждую трубу вставлялся электронагреватель из нихромовой проволоки, после чего внутренняя полость трубы заполнялась плотным слоем мелкого кварцевого песка. Концы проводов нагревателя выводились через торцевые пробки из фторопласта. Питание нагревателей осуществлялось переменным током от автотрансформаторов. Питание труб-калориметров – через стабилизатор напряжения.

Калориметры изготовлены из тех же труб, но дополнительно снабжены термопарами для измерения температуры поверхности трубы, лепестка и воздуха в межреберном канале вблизи поверхности несущей трубы. Схема расположения термопар представлена на рис. 1. Термопары изготовлены из стандартных термоэлектродов диаметром 0,15 мм градуировки ХА.



1 – труба; 2 – сплошная часть ребра; 3 – канал для укладки термопар; 4 – лепесток
Рис. 1. Схема расположения термопар на поверхности ребра и в межреберном канале

Предварительно сплюсненные спаи термопар приваривались к поверхности трубы и лепестка электроимпульсным разрядом и затем покрывались тонким слоем термостойкого клея «Сујапоран» с активатором наполнителем «Сујано-fill». Термоэлектроды выводились через торцы труб-калориметров по трубкам из фторопласта, уложенным в пазы на поверхности трубы. Фторопластовые трубки закреплялись в пазах с помощью того же клея.

Конструкция аэродинамической трубы позволяла поворачивать трубы-калориметры вокруг своей оси на 180° с фиксацией углов поворота через каждые 30° . При каждом фиксированном угле поворота измерялись температуры стенки и воздуха во всех точках.

В опытах, в которых определялся среднеповерхностный конвективный коэффициент теплоотдачи, использовались шестирядные пучки с установкой калориметров в пятом ряду. В поперечном ряду устанавливались три трубы. Трубы располагались горизонтально. В каждом ряду одна труба оснащалась термопарами, приваренными указанным выше способом к поверхности несущей трубы в межреберном канале через 45° по окружности трубы от нуля до 180° по направлению набегающего потока.

Температура воздуха перед измерительным участком и после него измерялась ртутными термометрами с ценой деления $0,1^\circ\text{C}$. Измерения дублировались термопарами ХК и термисторами КМТ-14.

Мощность, рассеиваемая калориметрами, измерялась путем измерения напряжения вольтметром типа В7-38, силы тока амперметром типа Д50141 класса точности 0,2. Сила тока в цепи питания нагревателей остальных труб измерялась стрелочным амперметром типа АСТ с зеркальной шкалой класса точности 0,5 через трансформатор тока И54М класса точности 0,2. Термо-э.д.с. термопар измерялась вольтметром типа В7-34А. Сопротивление термисторов измерялось вольтметром В7-27. Перепад давлений на пневмометрической трубке измерялся микроманометром ММН-240 класса точности 0,6.

Размещение труб в пучках в основном варьировалось путем изменения продольного шага при постоянном поперечном шаге $S_1 = 98$ мм. Лишь в одном опыте поперечный шаг составил $S_1 = 70$ мм. Продольные шаги составляли 60, 74, 85, 98, 120 и 148 мм ($\sigma_2 = 2,143; 2,643; 3,036; 3,50; 4,288$ и $5,286$).

Конвективные коэффициенты теплоотдачи, отнесенные к полной поверхности труб-калориметров, рассчитывались по формуле

$$\bar{\alpha} = \frac{Q_k}{F_k(\bar{t}_{ct} - t_b)}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}), \quad (1)$$

где Q_k – количество теплоты, выделяемой калориметром, Вт;

F_k – полная площадь поверхности калориметра, м^2 ;

\bar{t}_{ct} – усредненная температура поверхности калориметра, °C ;

t_b – средняя температура воздуха в ряду установки калориметра, °C ;

Усредненная температура поверхности калориметра определялась по формуле

$$\bar{t}_{ct} = \frac{\sum t_i F_i}{\sum F_i}, \text{ °C}, \quad (2)$$

где t_i – температура поверхности калориметра в месте установки соответствующей термопары, °C ;

F_i – площадь участка поверхности, в котором установлена i -тая термопара, м^2 .

Средняя температура воздуха в ряду установки калориметра согласно [5] определялась из соотношения

$$\bar{t}_b = t'_b + \frac{\sum Q + 0,5Q_{p.k}}{G \cdot c}, \text{ °C}, \quad (3)$$

где t'_b – температура воздуха на входе в исследуемый пучок, °C ;

$Q_{p.k}$ – тепловыделение ряда, в котором установлен калориметр, Вт;

$\sum Q'_{p.k}$ – суммарное тепловыделение рядов, предшествующих ряду установки калориметра, Вт; G – расход воздуха, $\text{кг}/\text{с}$;

c – удельная массовая теплоемкость воздуха, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{°C})$.

Результаты исследования

Исследование проведено в диапазоне изменения числа Рейнольдса $7,4 \cdot 10^3 \dots 4 \cdot 10^4$. При определении числа Re в качестве определяющего геометрического размера принят диаметр трубы, несущей оребрение.

Первичное обобщение результатов эксперимента выполнено в виде общепринятого степенного уравнения, связывающего число Нуссельта, вычисленное по опытным значениям среднеповерхностного коэффициента теплоотдачи, и число Рейнольдса

$$Nu = C_q Re^m. \quad (4)$$

С этой целью результаты эксперимента частично представлены на рис. 2 в виде зависимостей $\lg Nu = f(\lg Re)$.

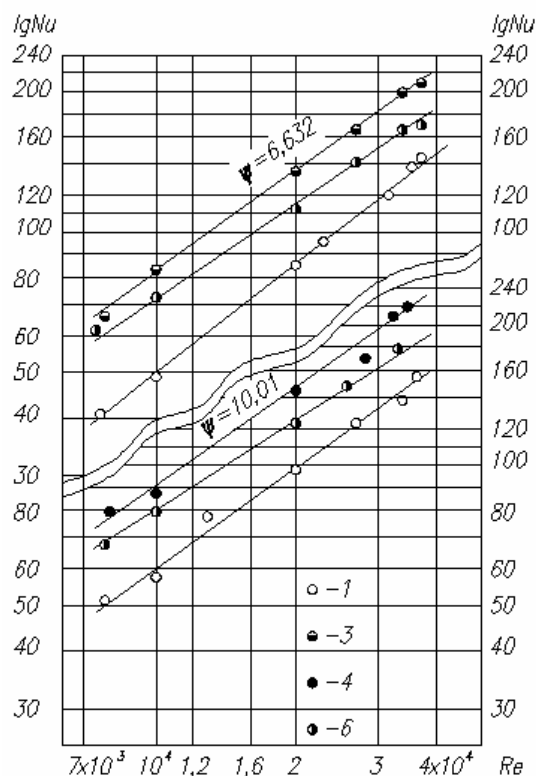


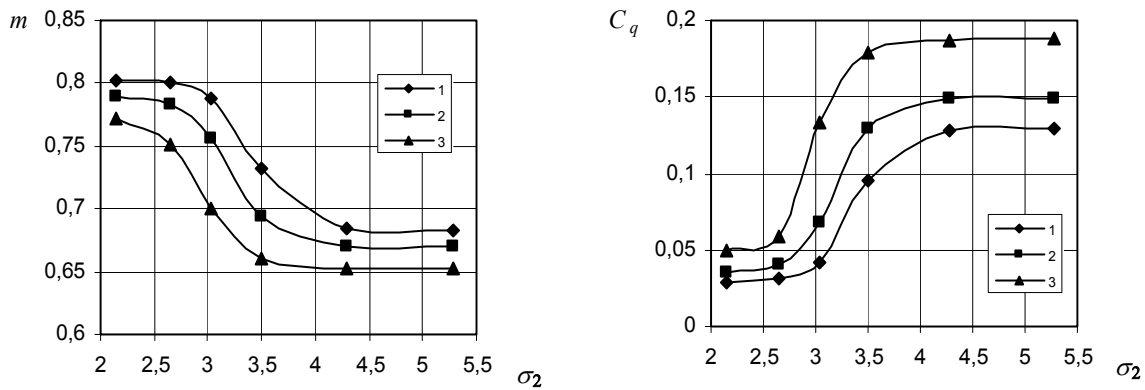
Рис. 2. Результаты исследования теплообмена в глубинных рядах коридорных пучков с разрезным оребрением $\psi = 6,632$, $\psi = 10,01$. 1-4 – номера размещений в соответствии с таблицей

Все опытные точки удовлетворительно укладываются на прямые линии. Углы наклона прямых несколько отличаются друг от друга, что указывает на изменение показателя степени m при числе Рейнольдса в уравнении (4). Значение показателя степени m и коэффициента C_q приведены в таблице и на рис. 3.

Таблица 1. Значения коэффициентов m и C_q в уравнении (4), полученные в опытах

Номер размещения	σ_2	σ_1	Коэффициент оребрения, ψ					
			6,632		8,509		10,01	
			m	C_q	m	C_q	m	C_q
1	2,143	3,5	0,772	0,054	0,790	0,035	0,803	0,029
2	2,643	3,5	0,752	0,057	0,784	0,040	0,801	0,031
3	3,036	3,5	0,700	0,133	0,755	0,068	0,788	0,039
4	3,500	3,5	0,660	0,179	0,693	0,13	0,733	0,096
5	4,286	3,5	0,653	0,186	0,671	0,15	0,685	0,128
6	5,286	3,5	0,653	0,189	0,670	0,15	0,683	0,130

Как отмечалось выше, строение коридорных пучков отличалось лишь изменением относительного продольного шага при постоянном поперечном шаге. При выборе геометрических характеристик пучков было учтено известное положение [2; 4; 3] о независимости интенсивности теплообмена в коридорных пучках от величины поперечного шага. Это подтвердилось и в одном из наших опытов, где σ_1 составлял 2,5 при $\sigma_2 = 2,143$.



а) $m = f(\psi, \sigma_2)$, $\psi = \text{const}$; б) $C_q = f(\psi, \sigma_2)$, $\psi = \text{const}$. 1 – $\psi = 10,01$; 2 – $\psi = 8,509$; 3 – $\psi = 6,632$
 Рис. 3. Зависимость коэффициентов m и C_q в уравнении (4) от геометрических характеристик пучков и оребрения труб

На этом основании, а также учитывая характер зависимостей, представленных на рис. 3, в качестве определяющей геометрической характеристики коридорных пучков принят относительный продольный шаг труб, и дальнейшее обобщение опытных данных проведено по методу, предложенному в [4].

Как следует из рис. 3, изменение коэффициента m в зависимости от определяющего геометрического параметра размещения труб в пучке при $\psi = \text{const}$ происходит по закону гиперболического тангенса и может быть описано функцией [4]:

$$m = b_1 \cdot \text{th}\{a_1[(\sigma_2)_{01} - \sigma_2]\} + m_0. \quad (5)$$

Обработка опытных данных, представленных в таблице и на рис. 3, показывает, что в диапазоне изменения определяющих параметров ψ и σ_2 значения коэффициентов b_1 и a_1 можно принять равным соответственно $b_1 \approx 0,06$, $a_1 \approx 2,5$. Зависимости координат точек перегиба тангенсоид m_0 и $(\sigma_2)_{01}$, представленных на рис. 3а, от степени оребрения представлены на рис. 4а,б.

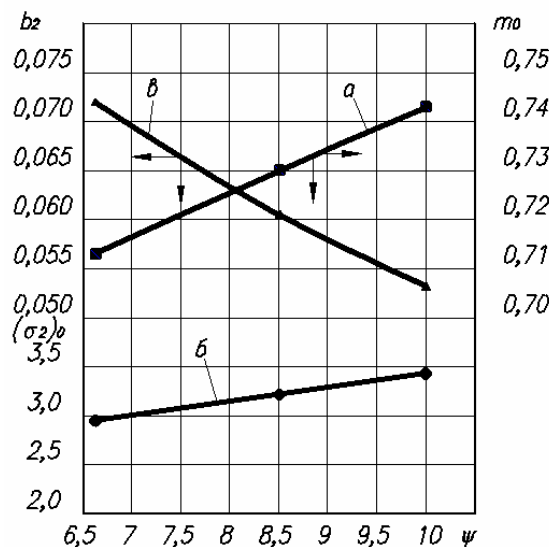


Рис. 4. Зависимости m_0 (а), $(\sigma_2)_0$ (б) и b_2 (в) в функциях (5) и (9)

Эти зависимости с достаточной точностью описываются формулами:

$$(\sigma_2)_{01} = \frac{\Psi}{7} + 2, \quad (6)$$

$$m_0 = 0,654 + 0,0089\Psi. \quad (7)$$

С учетом (6) и (7) уравнение (5) для расчета показателя степени m можно представить в виде

$$m = 0,654 + 0,06\text{th}\left[2,5\left(2 + \frac{\Psi}{7} - \sigma_2\right)\right] + 0,0089\Psi. \quad (8)$$

Изменение коэффициента C_q в уравнении (4) также происходит по закону гиперболического тангенса (рис. 4б). Полученные экспериментально конкретные зависимости можно аппроксимировать функцией

$$C_q = -b_2 \cdot \text{th}\{a_2[(y_2)_{02} - y_2]\} + C_0, \quad (9)$$

где $a_2 = a_1 = 2,5$; $(\sigma_2)_{02} = (\sigma_2)_{01}$, а коэффициенты b_2 C_0 не постоянны и зависят от коэффициента оребрения. Зависимость $b_2 = f(\Psi)$ представлена на рис. 4а. С достаточной точностью она может быть аппроксимирована выражением

$$b_2 = 0,321\Psi^{-0,78}. \quad (10)$$

Обработка опытных данных показала, что в исследованном интервале определяющих параметров Ψ и σ_2 отношение $C_0/b_2 \approx \text{const} = 1,62$.

С учетом этих особенностей окончательное выражение для расчета C_q может быть представлено в виде:

$$C_q = \left\{1,62 - \text{th}\left[2,5\left(2 + \frac{\Psi}{7} - \sigma_2\right)\right]\right\} \cdot 0,321\Psi^{-0,78}. \quad (11)$$

Приведенные соотношения относятся к глубинным рядам коридорных пучков. Были также проведены опыты с малорядными пучками – с одним, двумя, тремя и четырьмя. Установлено, что наименьшая теплоотдача имеет место во втором ряду (примерно 0,875 от глубинных рядов). В первом ряду коэффициент теплоотдачи равен или даже несколько превышает значение коэффициента теплоотдачи глубинный рядов. Стабилизация теплообмена наступает уже в четвертом ряду. С учетом этих замечаний определена зависимость коэффициента C_z , для малорядных пучков, представленная на рис. 5, из которого следует, что для пучков с просечным оребрением минимальное значение C_z выше, чем, значения, рекомендуемые [4] для сплошного спирального оребрения.

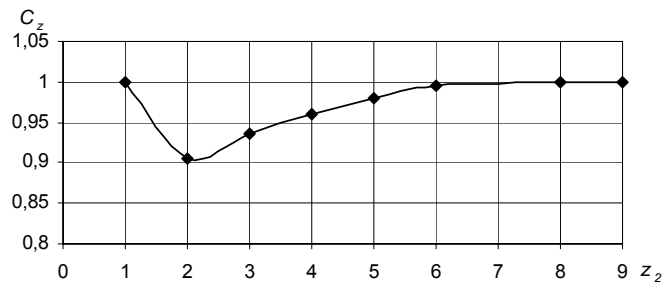


Рис. 5. Поправка на число рядов в пучке в направлении потока

С удовлетворительной точностью значения C_z можно определить по формуле

$$C_z = 3,5z_2^{0,03} - 2,72 \quad (12)$$

рекомендуемой [4] для шахматных пучков с $\sigma_1/\sigma_2 \geq 2$.

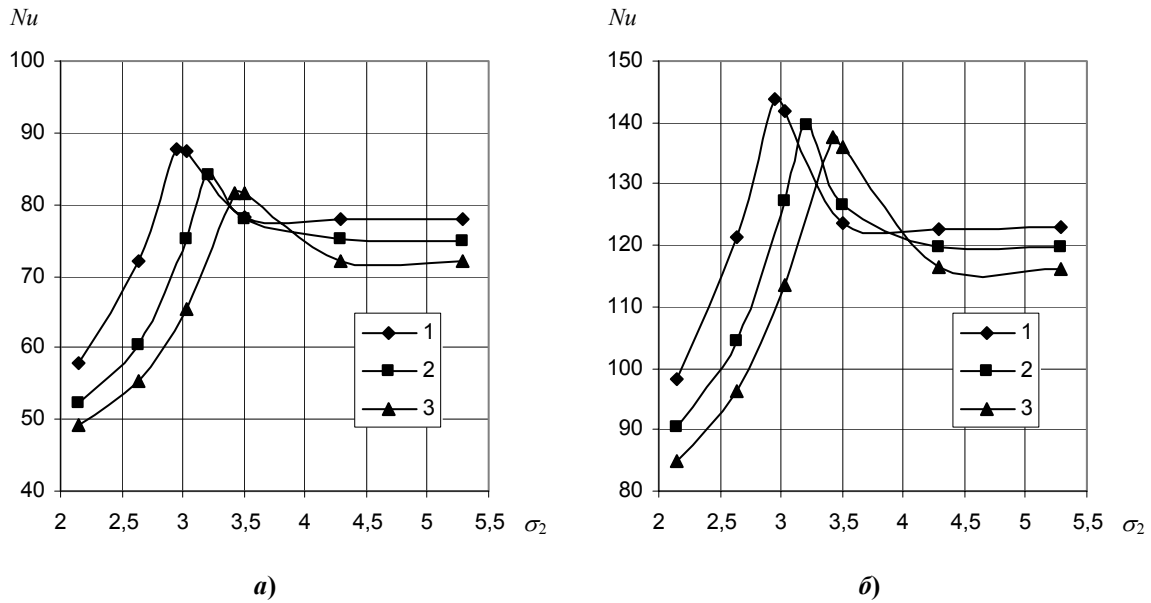
Исходя из изложенного, для расчета теплоотдачи коридорных пучков труб с просечным спирально-ленточным оребрением при поперечном омывании воздухом рекомендуется выражение

$$Nu = C_z C_q Re^m \quad (13)$$

При омывании пучков другими газами в (13) следует ввести число Прандтля в степени 0,33 и коэффициент 1,13, равный отношению $1/Pr_B^{0,33}$. При этом формула (13) преобразуется к виду

$$Nu = 1,13C_z C_q Re^m Pr^{0,33} \quad (14)$$

Суммарное влияние геометрии оребрения и пучка на теплоотдачу видно из рис. 6, построенного по данным эксперимента. Из рисунка следует, что на участках изменения σ_2 до $(\sigma_2)_0$ теплоотдача увеличивается, достигая максимума при $(\sigma_2)_0$, далее



а) $Re = 10^4$; б) $Re = 2 \cdot 10^4$. 1 – $\psi = 10,01$; 2 – $\psi = 8,509$; 3 – $\psi = 6,632$

Рис. 6. Зависимость чисел Нуссельта от относительного продольного шага труб в пучке и коэффициента оребрения

наблюдается небольшой спад и стабилизация значений Nu . На участках роста и стабилизации теплоотдачи уровень значений чисел Nu снижается с увеличением степени оребрения ψ . В области спада вблизи максимумов перед участками стабилизации значения чисел Nu при больших значениях ψ оказались более высокими (кривые пересекаются) при всех значениях чисел Рейнольдса. В исследованном интервале значений ψ величина максимумов чисел Nu различаются незначительно.

В заключение следует отметить, что максимальное отклонение значений чисел Nu , вычисленных по выражению (13) для глубинных рядов с учетом (8), (11) и (12), от опытных не превышает 15 %.

Было также проведено сравнение значений чисел Нуссельта, полученных в опытах, с рассчитанными по соотношениям [4] для сплошного оребрения и значений, рассчитанных по соотношениям [3] для разрезного оребрения, применительно к условиям эксперимента. В первом случае теплоотдача разрезного оребрения оказалась выше на 15-35 %, что подтверждает более высокую эффективность разрезного оребрения с точки зрения теплообмена. Во втором случае опытные и расчетные значения чисел Nu оказались достаточно близкими по величине, но имеется некоторая несогласованность в значениях коэффициентов m и C_q и в части влияния шага ребер на теплоотдачу.

Литература

1. *Weirman C.* Correlations Ease the Selection of Finned Tubes // Oil and Gas j. – 1976. – vol. 74. – № 36. – p. 94-100.
2. *Юдин В.Ф.* Теплообмен поперечно-оребрённых труб. – Л.: Машиностроение, 1982. – 189 с.
3. *Терех А. М., Шаповал О. Е., Письменный Е. Н.* Среднеповерхностный теплообмен в поперечно-омываемых коридорных пучках труб с разрезным спирально-ленточным оребрением // Промышленная теплотехника. – 2001. – Т. 23 – № 1-2 – с. 35-41.
4. *Письменный Е. Н., Терех А. М.* Обобщенный метод расчета конвективного теплообмена поперечно-омываемых пучков труб с внешним кольцевым и спирально-ленточным оребрением // Теплоэнергетика. – 1993. – № 5. – с. 52-56.
5. *Легкий В. М., Тутицын Ю. К.* Некоторые особенности теплообмена в поперечно-омываемых пучках труб с внешним спирально-ленточным оребрением // Изв. Вузов СССР. – Энергетика. – 1978. – № 2. – с. 86-90.

© Горбатенко В.Я., Галушак И.В., 2007