

ТЕПЛОБМЕН И АЭРОДИНАМИКА ПУЧКОВ ТРУБ С ГОФРИРОВАННЫМ СПИРАЛЬНО-ЛЕНТОЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

Введение

Поперечное оребрение трубных элементов теплообменников широко распространено в промышленности и имеет много конструктивных решений и способов изготовления. Например, оребрение, выполненное набором ребристых элементов на трубе и дальнейшее их соединение сваркой, пайкой либо насадкой под натягом; поперечно-винтовое, выполненное прокаткой или навивкой ленты с различными методами ее закрепления на трубе [1-3].

Перспективной и высокопроизводительной является технология приварки ребра из стальной ленты, навиваемой на трубу по спирали с определенным шагом t . Приварка ленточного оребрения к несущей трубе в зависимости от марки стали осуществляется либо токами высокой частоты, либо автоматической электродуговой сваркой. При этом предъявляются высокие требования к прочности приварки ребра, обеспечивающего надежный тепловой контакт его с трубой, к точности и качеству изготовления оребренной трубы в соответствии с заданными геометрическими параметрами, обеспечивающими, как правило, достаточно большой коэффициент оребрения ψ .

Установлено, что существенное влияние на форму поверхности ребра, его профиль оказывает величина отношения ширины ленты, трансформирующейся в высоту ребра h к наружному диаметру несущей трубы d . Так, при $h/d \leq 0,35$ всегда образуется спирально-ленточное ребро с гладкой поверхностью, однако при геометрическом условии $h/d > 0,35$ за счет увеличения высоты ребра или уменьшения диаметра трубы при фиксации одного из параметров, или за счет близости величин $h \approx d$ на поверхности образуемого спирально-ленточного ребра появляются правильной геометрической формы гофры, представляющие собой чередование закругленных впадин и

выступов, расположенных у корня ребра по его периметру. Гофры, с постепенно уменьшающейся глубиной, вытянуты в радиальном направлении и занимают, примерно, половину высоты ребра и плавно переходят в оставшуюся гладкую его часть. Таким образом, получение радиальных гофр на ребре при данных геометрических соотношениях h/d является не целенаправленной технологической операцией для интенсификации теплообмена, а следствием возникающих деформаций в прикорневой части поверхности привариваемой ленты из-за принятых значений ширины ленты и диаметра трубы, удовлетворяющих условию $h/d > 0,35$. Вместе с тем, следует ожидать, что полученная таким способом гофрировка ребер может быть не только эффективным средством интенсификации теплообмена, но и в то же время может приводить к возрастанию аэродинамического сопротивления, способствующего увеличению затрат мощности на движение теплоносителя.

Анализ литературных данных показал небольшое количество работ, например, [4], посвященных исследованию теплообмена и сопротивления пучков труб со спирально-ленточным гофрированным оребрением, отсутствие для таких типов пучков труб достаточного экспериментального материала, отсутствие описания количественных закономерностей интенсивности теплообмена и аэродинамического сопротивления, влияющего на расход мощности для прокачки теплоносителя, вызывает большие трудности получения обобщенных решений и создания надежных расчетных методик оребренных поверхностей нагрева. Поэтому изучение конвективного теплообмена для таких типов ребер является сложной и актуальной задачей теории процесса переноса в движущейся среде.

С целью определения влияния гофрировки спирально-ленточного ребра на теплоаэродинамические характеристики, выявления соотношения интенсивности теплообмена и аэродинамического сопротивления, темпов их роста, разработки методики теплоаэродинамического расчета в НТУУ «КПИ» проведены экспериментальные исследования теплообмена и аэродинамики шахматных пучков труб со спирально-ленточным гофрированным оребрением.

1 Методика исследований

Исследования выполнены в аэродинамической трубе прямоугольного сечения и по методикам, подробное описание которых приведено в работе [5].

Эксперименты по теплообмену проведены в условиях полного теплового моделирования, достигнутого путем электрообогрева каждой трубы пучка, состоящего в зависимости от шаговых характеристик из $Z_1=3-4$ продольных и $Z_2=7-8$ поперечных рядов. Определение среднесurfaceстных значений конвективных коэффициентов теплоотдачи осуществлялось с помощью трубы – калориметра, установленной в 5-м или 6-м поперечном ряду пучка при омывании его воздушным потоком, по результатам измерения температурного поля ребра и стенки несущей трубы калориметра.

Эксперименты по определению аэродинамического сопротивления выполнены по результатам измерения перепада статических давлений через пучок оребренных труб с учетом потерь на трение в проточной части стэнда в условиях изотермического течения при изменении температур набегающего воздушного потока $t_a=17-27$ °С.

В исследованиях использовались натурные образцы стальных труб со спирально-ленточным оребрением с радиальными гофрированными участками в прикорневой части ребра, изготовленные по серийной технологии на АО «Подольский машиностроительный завод» им.С.Орджоникидзе (ЗиО). Общий вид трубы с гофрированным оребрением приведен на рис.1.

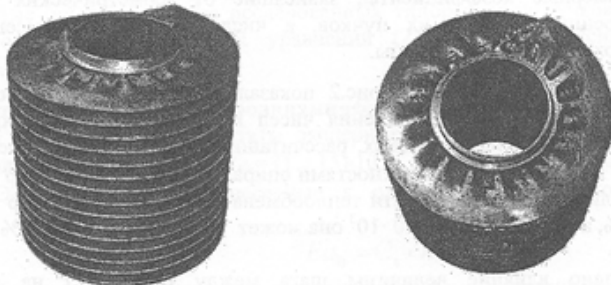


Рис.1. Труба с гофрированным спирально-ленточным оребрением

Общее число гофр на одном ребре составило 16 шт. Гофры увеличили площадь полной поверхности оребренной трубы в среднем на 2% по сравнению с гладким ребром. Основные конструктивные характеристики исследованных труб с гофрированным оребрением приведены в табл.1. Геометрические характеристики исследованных шахматных пучков труб с гофрированным оребрением представлены в табл.2.

С целью удобства анализа и представления 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).

Таблица 1

Геометрические характеристики оребренных труб

Номер серии (тип трубы)	d , мм	h , мм	t , мм	δ , мм	S_1 , мм	h_r , мм	r_r , мм	ψ
1	38	16,5	4,5	1,0	7,5	3,5	8	11,71
2	38	17,0	5,0	1,0	7,5	3,5	8	10,75

Таблица 2

Геометрические характеристики шахматных пучков труб

Номер размещения	S_1 , мм	S_2 , мм	S_1/S_2	H/F	d_n , мм
Серия 1 ($t=4,5$ мм)					
1	86	85	1,012	34,4	9,8
2	96	85	1,129	27,6	12,2
3	91	79	1,152	30,6	11,0
Серия 2 ($t=5,0$ мм)					
1	86	85	1,012	31,1	10,8
2	96	85	1,129	25,0	13,4
3	91	79	1,152	27,7	12,1

В опытах по теплообмену за определяющий размер в числах Нуссельта Nu и числа Рейнольдса Re_d принимался диаметр несущей трубы d . Теплофизические константы теплопроводность и вязкость, входящие в выражения для расчета чисел Nu и Re_d , относились к среднебалансовой температуре потока воздуха t_n в ряду пучка, где размещался измерительный калориметр.

В опытах по аэродинамике числа Рейнольдса Re_s рассчитывались по эквивалентному диаметру минимального проходного сечения пучка d_s . Плотность, содержащаяся в числах Эйлера Eu , вычислялась по температуре воздушного потока t_s , омывающего трубный пучок.

За определяющую в числах Эйлера Eu и Рейнольдса Re_d, Re_s принималась скорость потока w в наиболее узком сечении пучка труб.

2 Результаты исследований теплообмена

Исследования конвективного теплообмена шахматных пучков оребренных труб выполнено в интервалах изменения чисел Рейнольдса $Re_d=(5...20) \cdot 10^3$. Опытные данные, приведенные в логарифмических координатах чисел подобия $Nu - Re_d$ на рис.2, аппроксимировались в виде степенной функции:

$$Nu_x^{2n} = (C_q \cdot \psi) \cdot Re_d^m, \quad (1)$$

где C_q и m - безразмерные коэффициенты, зависящие от геометрических характеристик оребренных труб и их пучков, а числа Нуссельта отнесены к гладкой поверхности несущей трубы.

Анализ экспериментальных данных на рис.2 показал, что гофрировка ребер приводит к интенсификации теплоотдачи. Опытные значения чисел Нуссельта для гофрированных ребер располагаются в среднем на 12% выше кривых, рассчитанных для таких же размещений пучков труб и шага оребрения, но с гладкими поверхностями спирально-ленточных ребер [6]. Причем, в области $Re_d \approx 5 \cdot 10^3$ увеличение интенсивности теплообмена от гофрировки ребер минимально и составляет примерно 3%, а в области $Re_d \approx 20 \cdot 10^3$ она может увеличиваться до 18% (см. кривые 3, 4 на рис.2).

Опытами установлено влияние величины шага между ребрами t на интенсивность

теплообмена при фиксированных значениях чисел Рейнольдса за счет экстраполяции экспериментальных данных в область расширенного по сравнению с исследованным диапазоном изменения шага $t = (5,5 \dots 4,0)$ мм. Влияние величины шага на теплообмен косвенно происходит через коэффициент оребрения трубы ψ , являющийся определяющим параметром в теплообменных расчетах развитых поверхностей, поэтому дополнительно вводить шаговый поправочный коэффициент в расчетные обобщающие формулы не имеет смысла. Выявлено, что при уменьшении шага ребер с 5,5 мм до 4,0 мм, соответствующем возрастанию коэффициента оребрения ψ , интенсивность теплообмена увеличивается на 20...25%, а при уменьшении шага с 5,0 мм до 4,5 мм – на 5...8%.

Для определения средних значений коэффициентов конвективной теплоотдачи $\alpha_k^{та}$ шахматных пучков труб с гофрированным оребрением по результатам исследований предлагается система уравнений, базирующаяся на рекомендациях руководящих технических материалов [6] для расчета пучков труб со спирально-ленточным гладким оребрением с использованием поправочного коэффициента $C_r = 1,12$, учитывающего интенсивность теплообмена вследствие применения гофрировки ребер:

$$Nu_k^{та} = C_r (C_q \cdot \psi) \cdot Re_d^m, \quad (2)$$

$$m = 0,7 + 0,08th \left(\frac{S_1}{S_2} - \frac{1,26}{\psi} - 2 \right) + 0,005\psi, \quad (3)$$

$$C_q = \left[1,36 - th \left(\frac{S_1}{S_2} - \frac{1,26}{\psi} - 2 \right) \right] \cdot \left(\frac{1,1}{\psi + 8} - 0,014 \right). \quad (4)$$

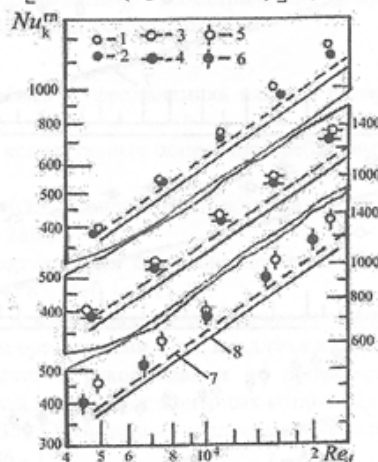


Рис.2. Теплообмен шахматных пучков труб с гофрированным оребрением
1-пучок №11; 2- №21; 3-№12; 4-№22; 5-№13; 6- №23; 7,8- расчет по [1,6]

Коэффициент C_q и показатель степени m рассчитываются по соотношениям (3), (4), взятых для гладкого спирально-ленточного ребра из [6].

Полученные опытные данные исследованных типоразмеров пучков труб с гофрированным оребрением описываются системой уравнений (2) – (4) с максимальной относительной погрешностью $\pm 7\%$.

3 Результаты исследований аэродинамического сопротивления

На рис.3 представлены результаты экспериментального исследования аэродинамического сопротивления пучков в диапазоне $Re_s = (1 \dots 15) \cdot 10^3$ в форме функциональной связи чисел подобия $Eu_0 = f(Re_s)$. Опытные данные, отнесенные к одному ряду труб, описываются степенным уравнением:

$$Eu_0 = C_s \cdot Re_s^{-n}, \quad (5)$$

где C_s и n – безразмерные параметры, зависящие от геометрических характеристик оребренных труб и их пучков.

Как видно из графиков рис.3 в области $Re_s < 3 \cdot 10^3$ опытные кривые имеют небольшой излом, указывающий на некоторое увеличение темпа роста аэродинамического сопротивления по сравнению с областью $Re_s > 3 \cdot 10^3$, проявляющегося в разных величинах показателя n , а также различия значений безразмерного коэффициента C_s в указанных областях чисел Рейнольдса. Однако анализ величин показателя степени n и параметра C_s дает основание предполагать, что с достаточной степенью точности экспериментальные данные можно обобщить единой кривой, используя осредненные значения C_s и n для всего интервала изменения чисел Re_s настоящего исследования.

Гофрировка ребер для рассматриваемых пучков труб приводит к росту аэродинамического сопротивления в 1,37...1,57 раза по сравнению с пучками труб с гладкими ребрами без гофрировки (см. кривые 3, 4 на рис.3).

Влияние изменения шага ребер t на аэродинамическое сопротивление, проявляющееся через приведенную длину H/F пучка и учитывающееся ее расчетной формулой, изучено по результатам исследований рис.3. Установлено, что с увеличением шага от $t=4,5$ мм до $t=5,0$ мм аэродинамическое сопротивление возрастает, что согласуется с выводами работ [1, 2]. Значения параметра размещения S_1/S_2 для исследованных пучков попадают в интервал $0,7 < S_1/S_2 < 2,75$ в котором уменьшение H/F от 34,8 до 24,8 или, что то же, увеличение шага ребер от 4,0 мм до 5,5 мм приводит к возрастанию аэродинамического сопротивления. Так, например, при числе Рейнольдса $Re_s \approx 3 \cdot 10^3$ его рост в диапазоне указанных шагов составляет 3...6%.

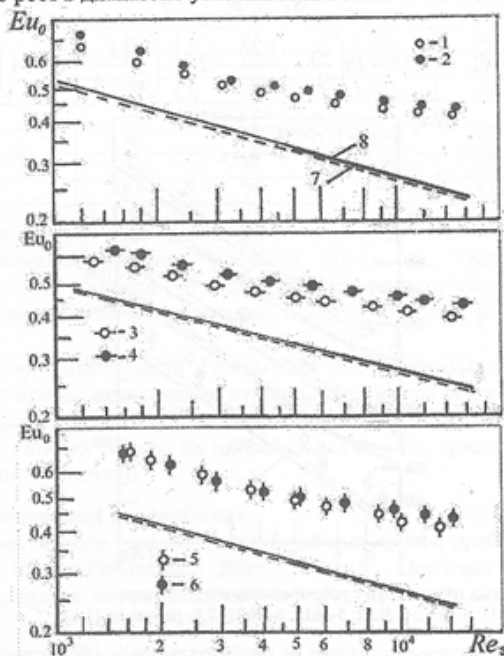


Рис.3. Аэродинамическое сопротивление шахматных пучков труб с гофрированным оребрением
1-пучок №11; 2- №21; 3-№12; 4-№22; 5-№13; 6- №23; 7,8- расчет по [1,6]

Для расчета аэродинамического сопротивления шахматных пучков труб с гофрированным оребрением предложена система зависимостей, основанных на соотношениях [6] для гладкого спирально-ленточного ребра. В базовое уравнение подобия (5) введен поправочный коэффициент $C_{гс}$, учитывающий возрастание сопротивления за счет гофрировки ребер и зависящий от числа Рейнольдса Re_s .

$$Eu_0 = C_{гс} \cdot C_s \cdot Re_s^{-n}, \quad (6)$$

$$n = 0,17 \left(\frac{H}{F} \right)^{0,25} \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0,57} \cdot \exp \left(-0,36 \frac{S_1}{S_2} \right), \quad (7)$$

$$C_s = 1,4 \left(\frac{H}{F} \right)^{0,53} \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{1,3} \cdot \exp \left(-0,9 \frac{S_1}{S_2} \right), \quad (8)$$

$$C_{rc} = 0,84 \cdot Re_s^{0,07}. \quad (9)$$

Расчетные зависимости (6) – (9) с погрешностью $\pm 10\%$ аппроксимируют опытные данные для исследованных серий пучков труб.

Выводы

Экспериментальные исследования позволяют отметить, что радиальная гофрировка прикорневых участков спирально-ленточных ребер по сравнению с гладкими приводит к увеличению интенсивности теплоотдачи в теплообменной поверхности на 10...18% при росте ее аэродинамического сопротивления на 37...57%.

Разработанная методика позволяет рассчитывать теплоаэродинамические характеристики шахматных пучков труб со спирально-ленточным гофрированным оребрением с помощью системы уравнений (1) – (9).

Показано влияние изменения шага гофрированных ребер на теплообмен и аэродинамическое сопротивление пучков труб. Установлено, что уменьшение шага ребер при неизменной высоте гофрированного ребра приводит к снижению металлоемкости теплообменного оборудования на 8...9%, а при замене гладкого спирально-ленточного оребрения на гофрированное – соответственно на 14...15%.

Перспективным может быть продолжение исследований по влиянию размеров гофрировки на эффективность ребра, по интенсивности теплообмена и соотношения его с сопротивлением, направленных на поиск оптимальных геометрических характеристик, обеспечивающих эффективный теплообмен оребренных поверхностей.

Литература

1. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб.- Киев: Альтерпрес, 2004. – 244 с.
2. Письменный Е.Н. Расчет конвективных поперечно-оребрённых поверхностей нагрева.- Киев: Альтерпрес, 2003. – 184 с.
3. Берлинер Ю.И., Балашов Ю.А.Технология химического и нефтяного аппаратостроения.- М., Машиностроение, 1976. – 256 с.
4. Urmalis Allbetrts Leistungsvermögen der Fächerrippenrohre und der Rohre mit glatten runden Rippen/Wärme, 1979, Band 85, Heft 1, S.11-13.
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. РТМ 108.030.140-87. Расчет и рекомендации по проектированию поперечно-оребрённых конвективных поверхностей нагрева стационарных котлов.-Л.: Минэнергомаш, 1988. –30 с.
7. Калафати Д.Д., Попалов В.В. Оптимизация теплообменников по эффективности теплообмена.- М.: Энергоатомиздат, 1986.- 152с.
8. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева. М.-Л.: Энергия, 1966.- 184с.