УДК 536.24:533.6.011

ТЕПЛООБМЕН И АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ШАХМАТНЫХ ПАКЕТОВ ПЛОСКО-ОВАЛЬНЫХ ТРУБ

Кондратюк В.А.[1], Письменный Е.Н.[1], Терех А.М.[1], Руденко А.И.[1], Жукова Ю.В.[2]

[1]*Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина*
[2] *Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты экспериментального исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пакетов плоско-овальных труб в интервале чисел Рейнольдса Re = 3000…30000 при варьировании продольного и поперечного шагов труб. Выполнено сравнение полученных результатов с известными расчетными зависимостями для пакетов труб различной обтекаемой формы. Анализ полученных данных показал, что интенсивность теплообмена исследованных пакетов находится на уровне интенсивности пакетов круглых труб. При этом аэродинамическое сопротивление исследованных пакетов значительно ниже сопротивления пакетов круглых труб, а полученные результаты коррелируют с расчетными зависимостями для пакетов труб обтекаемой формы.

ВВЕДЕНИЕ

Важной экономической задачей на сегодняшний день является рациональное и эффективное использование энергетических ресурсов в различных отраслях промышленности.

Тепловая энергия должна наиболее эффективно трансформироваться в теплообменных устройствах, поэтому проблема усовершенствования теплообменных аппаратов с одновременным уменьшением их размеров и массы является важной и актуальной. И в настоящее время, и в перспективе, одним из главных, технически и экономически наиболее доступным и обоснованным путем уменьшения массы и повышения экономичности энергоустановок является применение в теплообменных аппаратах эффективных поверхностей теплообмена, которые обладают высокой теплоаэродинамической эффективностью, невысокой стоимостью и простотой изготовления. Выбор рациональной поверхности нагрева теплообменного аппарата возможен только на основе совместного решения вопроса теплообмена и аэродинамического сопротивления. Важным шагом в этом направлении является внедрение поверхностей теплообмена из пакетов профильных труб, которые в отличие от пакетов труб круглого поперечного сечения имеют в 1.5-2 раза меньшее аэродинамическое сопротивление при примерно одинаковой интенсивности теплообмена. Необходимо отметить, что исследованию теплообмена и аэродинамического сопротивления пакетов профильных труб посвящено небольшое количество работ [1-3]. Кроме того, до настоящего времени нет надежных обобщенных зависимостей для расчета теплообмена и аэродинамического сопротивления в широком диапазоне изменения геометрических характеристик, а также данных для выбора оптимальных параметров пакетов удобообтекаемых труб, что затрудняет их практическое внедрение. Известные исследования в основном выполнены на одиночных трубах и направлены на выяснение вопросов, как профиль трубы влияет на ее теплогидравлическую эффективность [4-6].

Учитывая перечисленные факты, в НТУУ «КПИ» были проведены экспериментальные исследования влияния геометрических параметров плоско-овальных труб и шаговых характеристик труб на теплообмен и аэродинамическое сопротивление шахматных пакетов при поперечном их омывании потоком воздуха в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса.

© Кондратюк В.А., Письменный Е.Н., Терех А.М., Руденко А.И., Жукова Ю.В.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пакетов плоско-овальных труб (рис.1) при поперечном их обтекании потоком воздуха осуществлялись на экспериментальной установке, которая представляет собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа прямоугольного сечения, по методикам, которые подробно описаны в [7].

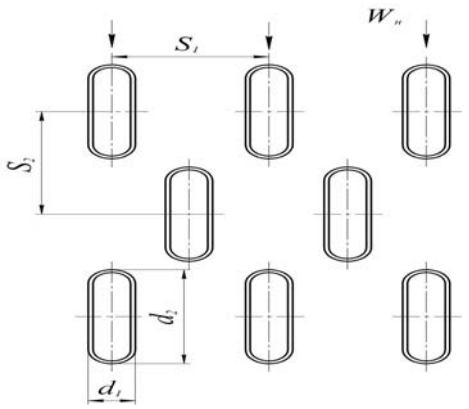

Рис.1 Шахматный пакет плоско-овальных труб

Геометрические характеристики шахматных пакетов задавались размерами полей отверстий в верхней и нижней трубных досках, изготовленных из древесно-волокнистых плит толщиной 3 мм. Фиксация трубных досок осуществлялась прижимной рамой с паронитовыми уплотняющими прокладками, которые обеспечивают герметичность канала. Для имитации бесконечности исследуемых пакетов в поперечном направлении на боковых стенках рабочего участка устанавливались полутрубки. Экспериментальные трубки имели поперечные и продольные размеры, соответственно, 15мм и 51 мм. Исследования проводились для семи пакетов плоско-овальных труб, геометрические характеристики которых представлены в таблице 1.

№ пучка	S_1,мм	S_2,мм
1	42	80.0
2	42	70.0
3	42	62.5
4	42	55.5
5	30	70.0
6	35	70.0
7	52.5	70.0

Табл.1 Геометрические характеристики пакетов плоско-овальных труб

Теплообмен

Исследования теплообмена проводились методом локального теплового моделирования. Нагревание трубы-калориметра осуществлялось с помощью трех электронагревателей. Температуры стенки по периметру калориметра плоскоовальной трубы определялись при помощи 10 медь-константановых термопар. Термопары зачеканивались в выфрезерованные канавки, провода которых подсоединялись к штекерному разъему. Калориметр устанавливался в 5-ом поперечном ряду семирядного пакета и был изготовлен из алюминиевого сплава Д16. Высокий коэффициент теплопроводности дюралюминия позволял эффективно осреднять температуры стенки по периметру трубы. В процессе проведения экспериментов на аэродинамической трубе определялись средние коэффициенты теплоотдачи по формуле (1) непосредственно по результатам измерения температурного поля стенки трубы.

$$\alpha_k = \frac{Q}{H_k\left(\overline{T}_{TC} - \overline{T}_n\right)}, \qquad (1)$$

где *Нк* – внешняя площадь поверхности калориметра, которая рассчитывалась по формуле

$$Hk = [\pi \cdot d_1 + 2\cdot(d_2 - d_1)]\cdot lk. \qquad (2)$$

$\overline{T}_{TC}$ - средняя температура трубы-калориметра определялась из соотношения

$$\overline{T}_{TC} = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{n}, \qquad (3)$$

Тп - среднебалансовая температура воздуха, определяемая балансовым методом по выражению

$$\overline{T}_n = T_{bx} + \frac{Q}{2G_{C\,p}}, \qquad (4)$$

где T_{bx} - температура воздуха на входе в аэродинамическую трубу; Q - тепловыделение трубы-калориметра; G - расход воздуха; C_p - удельная теплоемкость воздуха.

Теплофизические свойства воздуха определялись по среднебалансовой температуре воздуха *Тп*. В качестве определяющей скорости принималась скорость потока в самом узком сечении пакета.

Аэродинамическое сопротивление

Аэродинамическое сопротивление определялось по результатам измерения перепада статических давлений при изотермическом обтекании пакета труб в диапазоне изменения температур набегающего потока $t_{вх}$ = 17 – 20°С. Потери давления определялись по разности статических давлений до и после пакета с учетом потерь на трение и местных сопротивлений в проточной части стенда:

$$\Delta P = \Delta P_{cm} - \left(\lambda_m \frac{L_P}{d_{\text{eqv}}} \frac{\rho w_i^2}{2} \right), \qquad (5)$$

где ΔP_{cm} - перепад давлений, который измерялся с помощью микроманометра; L_P - длина участка между точками измерения давления без учета длины пакета; d_{eqv} – эквивалентный гидравлический диаметр прямого канала проточной части трубы; w_H - скорость воздуха в незагроможденных участках канала; λ_m – коэффициент сопротивления трения.

По величинам ΔP определялись числа Эйлера, отнесенные к одному поперечному ряду:

$$Eu_0 = \frac{\Delta P}{\rho w^2 z_2}, \qquad (6)$$

В качестве определяющей скорости в числах *Re* и *Eu* принималась скорость в наиболее узком поперечном сечении пакета.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООБМЕНА

Исследования теплообмена глубинных рядов шахматных пакетов плоско-овальных труб выполнялись в интервале чисел Рейнольдса Re=(3–30)10^3. Результаты экспериментов в виде зависимостей Nu=f(Re), хорошо аппроксимируются степенной зависимостью вида

$$Nu = C_q Re^m, \qquad (7)$$

Из анализа полученных результатов можно сделать вывод о том, что с уменьшением продольного шага интенсивность теплообмена монотонно возрастает. Приращение числа Нуссельта *Nu* во всем исследованном интервале чисел Рейнольдса Re составило 12 - 13%. Влияние же поперечного шага на теплообмен оказалось незначительным и составило 4 - 5%, что сопоставимо с погрешностью определения числа *Nu*. Можно предположить, что трубы с большим продольным удлинением профиля d_2/d_1= 3.4, обтекаемые вдоль большой оси, сформированные в пакет, образуют практически прямые каналы, через которые осуществляется переток среды без значительного увеличения скорости, и, таким образом, интенсивность теплообмена с изменением поперечных шагов в пакете практически не изменяется. Максимальная интенсивность соответствует пакету №4, минимальная – пакету №5 (табл.1). Разница между максимальным и минимальным значением суммарной теплоотдачи составляет 16-18% для всех исследованных пакетов труб. Такой результат говорит о слабом влиянии на теплообмен шаговых характеристик пакета для плоско-овальных труб с d_2/d_1= 3.4.

При обобщении полученных экспериментальных результатов с помощью зависимости (7), показатель степени *m* при числе Рейнольдса для всех исследованных пакетов оставался величиной практически постоянной и равной 0.65 (изменения Δm не превышали ±0.01).

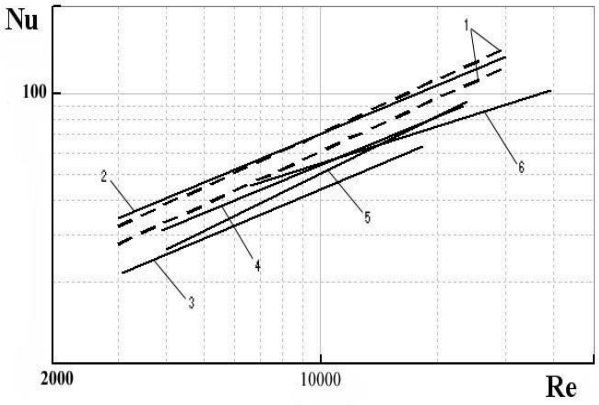

Рис.2 Сравнение интенсивности теплообмена шахматных пакетов профильных труб: 1 – область изменения интенсивности теплообмена пакетов труб из таблицы 1; 2 – пакет круглых труб (d =15 мм, б1=2.8 б2=3.7) [8]; 3 – пакет двухугольных труб (d =20 мм, б1=2.0 б2=3.3) [1]; 4 – пакет плоско-овальных труб (d=31 мм, б1=2.48 б2=3.71) [1]; 5 – пакет каплеобразных труб (d=31 мм, б1=2.15 б2=2.91) [1]; 6 – пакет овальных труб (d =25 мм, б1=1.5 б2=2.5) [1]

На рис.2 представлены результаты экспериментального исследоания и сравнения теплоотдачи исследованных пакетов плоско-овальных труб (область между штриховыми линиями, ограничивающими максимальные и минимальные значения чисел Нуссельта) с зависимостями для расчета теплообмена шахматных пакетов профильных труб, представленных в [1,2], а также с данными для пакета круглых труб из [8]. Типы труб, выбранные для сравнения, представлены на рис.3.

Анализ результатов, представленный на рис.2, показал, что зависимости $\mathrm{Nu} = f(\mathrm{Re})$ для исследованных пакетов плоско-овальных труб лежат выше кривых из [1]. Кроме этого, показатель степени для расчетных зависимостей [1] изменяется в зависимости от типа профиля в широких пределах m = 0.45–0.7. Расчетная линия нормативной зависимости [8] для пакета круглых труб практически совпадает с кривой, соответствующей максимальным значениям чисел Нуссельта для исследованных пакетов плоско-овальных труб.

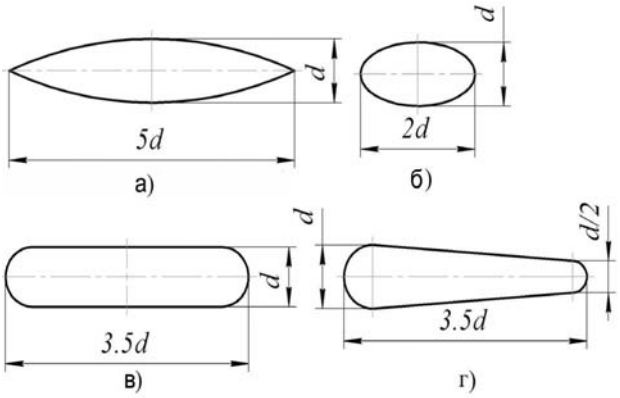

Рис.3 Трубы различного профиля [1, 2]: а) двухугольный; б) овальный; в) плоско-овальный; г) каплеобразный

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Исследования аэродинамического сопротивления шахматных пакетов плоско-овальных труб были выполнены в интервале чисел Рейнольдса Re=(3–30)10^3. Результаты экспериментов, в виде $Eu_0=f(Re)$, хорошо аппроксимируются степенной зависимостью вида

$$Eu_0=C_s Re^{-n} \qquad (8)$$

Полученные результаты показывают, что с уменьшением продольного и поперечного шагов аэродинамическое сопротивление пакета труб монотонно возрастает. Разница между максимальным и минимальным значением числа Эйлера Eu_0 во всем исследованном интервале чисел Рейнольдса Re составило (25-30)% для пакетов с постоянным поперечным шагом S_1 и (120-130)% с постоянным продольным шагом S_2, что свидетельствует о значительном влиянии именно поперечного шага на сопротивление пакета.

При обобщении полученных экспериментальных результатов с помощью зависимости (8), показатель степени n при числе Рейнольдса для всех исследованных пакетов оставался величиной практически постоянной и равной –0.04. Изменение величины показателя степени Δn не превышало ±0.01.

На рис.4 представлены результаты экспериментального исследования и сравнения аэродинамического сопротивления пакетов плоско-овальных труб (область между штриховыми линиями, ограничивающими максимальные и минимальные значения чисел Эйлера) с результатами, полученными на основе зависимостей для сопротивления шахматных пакетов труб различной обтекаемой формы (рис.3 в, г), представленных в [2], и пакетов труб круглого профиля [8].

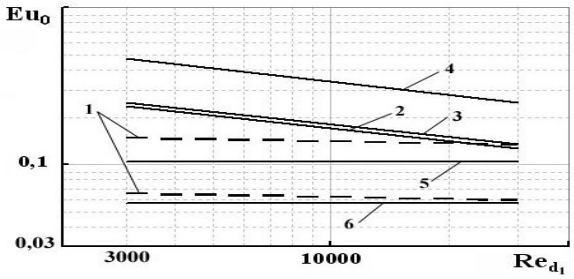

Рис.4 Аэродинамическое сопротивление шахматных пакетов труб: 1 – область изменения сопротивления пакетов труб из таблицы 1; 2, 3, 4 – пакеты круглых труб (d =15 мм, σ1=2.8 σ2=4.7; d=15мм, σ1=2.0 σ2=4.7; d=38мм, σ1=1.1 σ2=1.8) [8]; 5 – пакет плоско-овальных труб (d=31мм, σ1=2.48 σ2=3.7) [2]; 6 – пакет каплеобразных труб (d =31 мм, σ1=2.15 σ2=2.9) [2]

Наибольшее аэродинамическое сопротивление наблюдалось у пакетов круглых труб, причем с увеличением диаметра круглой тру-

бы увеличивается и аэродинамическое сопротивление. В исследованном диапазоне чисел Рейнольдса аэродинамическое сопротивление пакетов круглых труб падает с увеличением числа Рейнольдса, в то время как для исследованных пакетов плоско-овальных труб и пакетов профильных труб [2] – практически не зависит от числа Рейнольдса.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования теплообмена и аэродинамического сопротивления шахматных пакетов плоскоовальных труб позволили отметить следующее:

- шаговые характеристики труб в исследованном интервале чисел Рейнольдса оказывают слабое влияние на теплообмен пакетов труб;
- экспериментально полученные значения теплоотдачи исследованных пакетов труб лежат выше расчетных кривых, определенных по зависимостям для пакетов профильных труб, приведенных в [2, 3].
- шаговые характеристики труб в исследованном интервале чисел Рейнольдса существенно влияют на аэродинамическое сопротивление пакетов, причем наибольший вклад вносит поперечный шаг труб.
- аэродинамическое сопротивление пакетов плоскоовальных труб существенно ниже соответствующих пакетов из круглых труб.

Для обобщения полученных материалов необходимо провести экспериментальные исследования влияния на теплообмен и аэродинамическое сопротивление отношения диаметров d_2/d_1 (относительное удлинение профиля), т.к. именно этот геометрический параметр может оказаться определяющим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С.С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие/ С.С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 368 с.
2. Антуфьев В.М. Эффективность различных форм конвективных поверхностей нагрева/ В.М. Антуфьев – М. Л.: Энергия, 1966. – 184 с.
3. Бурков В.К. Исследование теплообмена и аэродинамики пучков из овальных труб/ В.К. Бурков, В.П. Медведский, И.Ю. Кочегарова, Ю.И. Лафа // Теплоэнергетика. – 2010. – №3. – С.42-45.
4. Ala Ali Hasan Thermal-hydraulic perfomance of oval tubes in a cross-flow of air/ Heat and Mass Transfer, accepted for publication. THP 2004 by author and THP 2004 Springer-Verlag. By permission. – P. 1-32.
5. Жукова Ю.В. Аэродинамика и теплообмен плоскоовального цилиндра при вынужденной конвекции/ Ю.В. Жукова, А.М. Терех, А.В. Семеняко// Труды V Российской Национальной конференции по теплообмену. – 25-29 октября. – г. Москва. – 2010. – Т.2. – С. 126-128.
6. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках/ А.А. Жукаускас. - М.: Наука, 1982. - 472 с.
7. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребренных труб/ Е.Н. Письменный. – Киев: Альтерпрес. – 2004. – 244 с.
8. Аэродинамический расчет котельных установок: Нормативный метод/ под ред. С.П. Мочана. Изд. 3-е. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с.