

УЗАГАЛЬНЕНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ КОРИДОРНИХ ПАКЕТІВ ПЛОСКО-ОВАЛЬНИХ ТРУБ З НЕПОВНИМ ОРЕБРЕННЯМ

Вступ

В різних галузях сучасної техніки широко використовуються різноманітні теплообмінні пристрої, найбільш поширеними елементами яких є криволінійні поперечно-обтічні тіла. До них відносяться круглі, прямокутні, овальні, плоско-овальні труби, а також тіла інших геометричних форм.

Ефективним заходом до збільшення компактності теплообмінника є використання розвинених поверхонь у вигляді ребер різним способом закріплених на несучій трубі.

При конструюванні теплообмінних пристроїв використовуються різні компоновання труб в пакеті. Найчастіше застосовується шахове і коридорне компоновання.

Використання профільованих труб з неповним поперечним оребрением [1] пов'язано із прагненням інтенсифікувати теплообмін за рахунок підвищення швидкості теплоносія внаслідок зменшення опору пучків зручнообтічної форми несучої труби порівняно з пучками із круглоребристих труб.

Однак під час проектування теплообмінних пристроїв з таких труб виникають труднощі при розрахунку їх теплоаеродинамічних характеристик.

В НТУУ «КПІ» проведені експериментальні дослідження конвективного теплообміну пакетів плоско-овальних поперечно-оребристих труб. Метою даної статті є: узагальнення отриманих дослідних даних, виявлення закономірностей теплообміну, розробка методу розрахунку

конвективного теплообміну коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

1 Методика досліджень

Дослідження тепловіддачі глибинних рядів коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним оребренням (рис.1) при поперечному їх обтіканні повітряним потоком здійснювалися на аеродинамічній трубі розімкнутого типу. Методика досліджень детально описана в роботі [2]. Досліди проведені для труб двох типів (табл.1). Всього експериментами охоплено 12 пучків, які відрізнялись між собою кроковими характеристиками S_1, S_2 і коефіцієнтами оребрення ψ (табл.2).

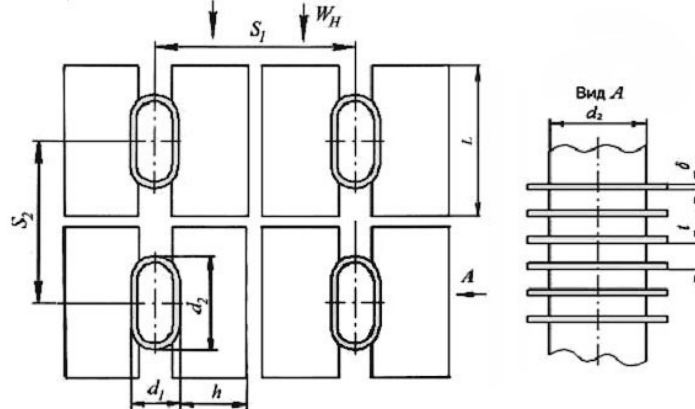


Рис.1. Коридорний пакет плоско-овальних труб з неповним оребренням

Пакет складався залежно від крокових характеристик з 3 – 4 труб ($Z_1 = 3 - 4$) в одному із семи поперечних рядів ($Z_2=7$). Визначення середньоповерхневих конвективних коефіцієнтів тепловіддачі здійснювалося за результатами вимірювань за допомогою 17 мідь-константанових термопар температурного поля ребра та стінки несучої труби біля кореня ребра труби-калориметра. Труба-калориметр знаходилася у 6-му за ходом потоку поперечному ряді пакету.

Таблиця 1

Геометричні характеристики оребрених труб

Найменування	Позначення	Труба тип 1	Труба тип 2
Поперечний розмір несучої труби	d_1 , мм	15.0	15.0
Подовжній розмір несучої труби	d_2 , мм	30.0	42.0
Висота ребер	h , мм	22.0	23.0
Крок ребер	t , мм	3,65	3.75
Товщина ребер	δ , мм	1,0	0.8
Довжина ребра	l , мм	48.5	55.5
Відносне видовження профілю	d_2/d_1	2.0	2.87
Коефіцієнт оребрення	ψ	17.68	15.16

За визначальний розмір в числах Нуссельта Nu та Рейнольдса Re приймався мінімальний поперечний розмір несучої труби d_1 . Теплофізичні константи, що входять у вирази для розрахунку чисел Nu і Re , відносились до середньобалансової температури повітря t_n у ряді, в якому знаходився калориметр.

За визначальну швидкість повітря в числах Re приймалася швидкість в найбільш вузькому перетині пакета.

2 Результати досліджень та їх аналіз

Дослідження теплообміну пакетів плоско-овальних труб виконано в зоні змінювання чисел Рейнольдса $Re_d = (3...20) \cdot 10^3$. Результати цих досліджень подані на рис.2, 3 і свідчать, що дослідні дані досить добре узагальнюються степеневою залежністю виду:

$$Nu_k = C_q \cdot Re_{d_1}^m \quad (1)$$

Аналіз експериментальних даних виявив помітне змінювання нахилу залежності $\lg Nu_k = f(\lg Re_d)$ (показника степеня m) як у межах пакетів кожного типу труб з постійною геометрією оребрення, так і для пакетів з однаковими відносними кроками різних типів труб.

Окрім цього можна відмітити, що на інтенсивність теплообміну більше впливає поздовжній крок між трубами, ніж поперечний, що добре ілюструють рис.2, 3.

Таблиця 2

Геометричні характеристики коридорних пакетів

Номер пакета	S_1 , мм	S_2 , мм	S_1/S_2	Ψ	m	C_q
Плоско-овальна труба типу 1						
1	66	60	1.100	17.68	0.675	0.103
2	66	75	0.88	17.68	0.665	0.115
3	66	90	0.733	17.68	0.660	0.124
4	66	120	0.550	17.68	0.660	0.128
5	86	60	1.433	17.68	0.720	0.062
6	105.6	60	1.760	17.68	0.720	0.050
Плоско-овальна труба типу 2						
7	66	60	1.100	15.16	0.626	0.180
8	66	75	0.88	15.16	0.615	0.196
9	66	90	0.733	15.16	0.610	0.206
10	66	120	0.550	15.16	0.610	0.215
11	86	60	1.433	15.16	0.670	0.110
12	105.6	60	1.760	15.16	0.670	0.085

Спроби зв'язати величину m з відомими характеристиками розміщень труб в коридорних пакетах S_1/S_2 , ϕ показали, що такі залежності простежуються, причому кращу кореляцію показників степеня забезпечує параметр S_1/S_2 .

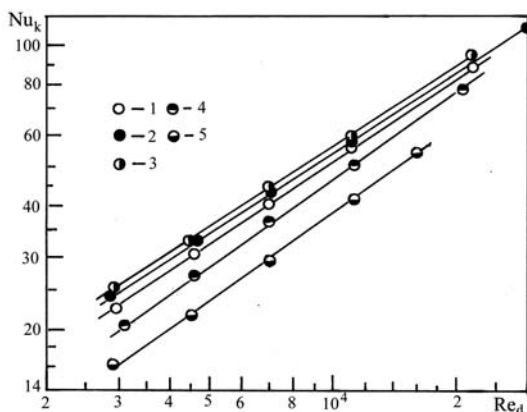


Рис.2. Результати дослідження тепловіддачі пучків труб типу 1

1 – пучок №1; 2 - №3; 3 - №4; 4 - №5; 5 - №6

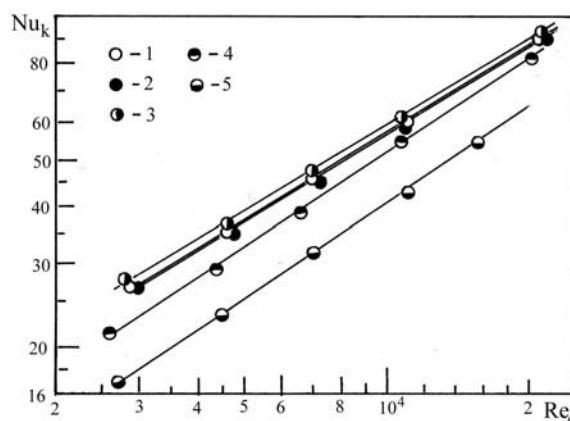


Рис.3. Результати дослідження тепловіддачі пучків труб типу 2

1 – пучок №7; 2 - №9; 3 - №10; 4 - №11; 5 - №12

На рис.4 нанесені дослідні значення m залежно від S_1/S_2 . Дані для пакетів з постійною геометрією ребристих труб різних типів, яку можна досить повно охарактеризувати величиною коефіцієнта оребрення ψ , об'єднуються близькими по конфігурації кривими. Вони мають дві пологих ділянки, в межах яких значення m практично постійні, та одну більш похилу, де значення m значно зростають із збільшенням параметра розміщення S_1/S_2 . Криві $m = f\left(\psi, \frac{S_1}{S_2}\right)$, $\psi = const$ зміщуються вгору в міру зростання коефіцієнта оребрення. Перепад значень m на кінцях

дослідженого інтервалу S_1/S_2 для кривих практично однакових і близький до 0.06.

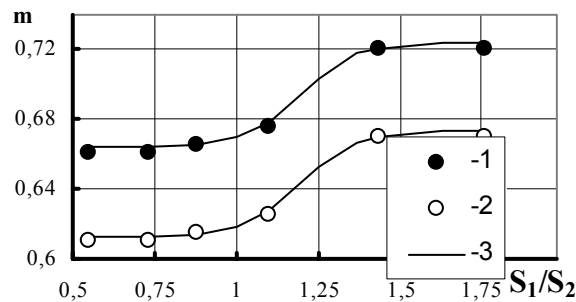


Рис.4. Залежність показника степеня m в формулі (1) від параметру розміщення S_1/S_2 :

1 - $\psi = 17.68$; 2 - $\psi = 15.16$; 3 – розрахунок по (4)

Загальний перепад m в дослідженому інтервалі геометричних характеристик дорівнює 0.11. Геометрія оребрених плоско-овальних труб і параметри розміщення труб в пакеті рівною мірою впливають на величину показника степеня, що свідчить про необхідність включення в узагальнюючу залежність для m обох впливаючих факторів.

З огляду на сказане вище криві $m = f(S_1/S_2, \psi)$ при $\psi = const$ можна описати як і для шахових пакетів [4] функцією виду :

$$m = a_1 th \left\{ k_1 \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right) - b_1 \right] \right\} + m_0 . \quad (2)$$

Коефіцієнт a_1 при гіперболічному тангенсі для коридорних пакетів дорівнює 0.03. Значення b_1 являє собою постійну величину, яка дорівнює 1.2, і практично не залежить від коефіцієнта оребрення. З огляду на те, що перепад значень m в розглянутому інтервалі змінення коефіцієнтів оребрення складає малу величину, залежність $m_0 = f(\psi)$ можна апроксимувати лінійною функцією:

$$m_0 = 0.02 \cdot \psi + 0.34 . \quad (3)$$

Коефіцієнт k_1 є величиною постійною і рівною 6 ($k_1 = 6$). Підставивши всі вище згадані коефіцієнти, отримуємо вираз (4) для розрахунку величини m :

$$m = 0.03 th \left\{ 6 \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right) - 1.2 \right] \right\} + (0.02 \cdot \psi + 0.34) . \quad (4)$$

Наведені дані свідчать про те, що зв'язок між m та S_1/S_2 визначається законом, який припускає наявність ділянок слабкої і сильної залежності між цими величинами. Якщо вибраний для дослідження діапазон параметра розміщення S_1/S_2 відносно невеликий - $S_1/S_2 < 1.0$, то він може включати в себе більшою мірою ліву полого частину кривої $m = f(S_1/S_2, \psi)$, $\psi = const$. В цьому випадку можна дійти висновку про незалежність показника степеня m від параметра розміщення труб в пакеті. Як показали дослідження течії в пакетах труб [3], рівень збурення потоку, що омиває труби глибинних рядів, значною мірою залежить від розміщення труб. Якщо припустити, що між рівнем збурення потоку і величиною m має місце пряма відповідність, то міркування щодо залежності рівня збурення від S_1/S_2 можна віднести до залежності m від S_1/S_2 . Для зони з найбільшим рівнем збурення характерні підвищені значення величини m . Таким чином, коли S_1/S_2 велике і поверхня глибинних рядів практично повністю омивається сильно збуреним потоком, значення показника степеня підвищене і відповідає рівню правої пологої ділянки кривих рис.4. Зниження рівня збурення потоку при зменшенні S_1/S_2 призводить до зниження значення m до рівня лівої пологої ділянки кривих $m = f(S_1/S_2, \psi)$, $\psi = const$.

Дослідні значення коефіцієнта C_q залежно від параметра S_1/S_2 показані на рис.5. Характер розташування точок, а також той факт, що коефіцієнт кореляції між m та C_q дорівнює (-1), дозволяє припустити, що в основі залежності $C_q = f(S_1/S_2, \psi)$ лежить функція типу (2), але з протилежним знаком:

$$C_q = -a_2 th \left\{ k_2 \left[\left(\frac{S_1}{S_2} \right) - b_2 \right] \right\} + C_0 . \tag{5}$$

В даному випадку для коридорних пучків коефіцієнт a_2 вже не являється константою, а як і C_0 залежить від параметрів оребрення. Аналіз даних показав, що $\frac{C_0}{a_2} \approx 2$. В межах зміння коефіцієнта оребрення від 15 до 18 коефіцієнт a_2 з достатньою точністю можна описати лінійною функцією

$$a_2 = 0.26 - 0.0123 \cdot \psi . \tag{6}$$

Коефіцієнт $b_2 \approx b_1 = 1.2$, $k_2 = 3$.

Остаточно співвідношення (5) для розрахунку C_q зводиться до виду :

$$C_q = \left\{ 2 - th \left[3 \left(\frac{S_1}{S_2} - 1.2 \right) \right] \right\} \cdot (0.26 - 0.0123 \psi) . \tag{7}$$

Таким чином, розрахунок конвективного теплообміну глибинних рядів коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним оребренням для коефіцієнта оребрення $\psi = 15.3 \dots 18$ і параметра розміщення, що змінюється в діапазоні $S_1/S_2 = 0.55 \dots 1.76$ в області чисел Рейнольдса $Re_d = 3 \cdot 10^3 \dots 2 \cdot 10^4$ пропонується виконувати за залежністю (1), де показник степеня m і коефіцієнт C_q визначаються за співвідношеннями (4) та (7) відповідно.

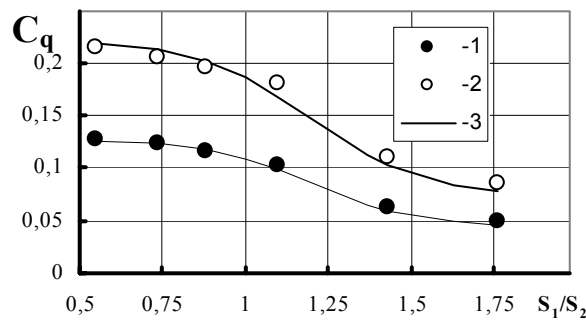


Рис.5. Залежність коефіцієнта C_q в формулі (1) від параметра розміщення S_1/S_2
 1 - $\psi = 17.68$; 2 - $\psi = 15.16$; 3 – розрахунок за (7)

Підсумкова похибка розрахункових співвідношень (1), (4), (7) оцінювалася зіставленням дослідних і розрахункових чисел Нуссельта Nu_o , Nu_p відповідно при значеннях числа Рейнольдса $Re_d = 3000$ і $Re_d = 20000$. Максимальна розбіжність між вказаними величинами склала $\pm 10\%$ (рис.6).

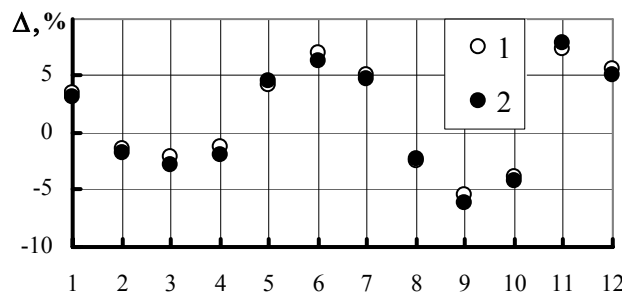


Рис.6. Оцінка точності узагальнюючих формул по теплообміну коридорних пакетів:
 1 – $Re_d = 3000$; 2 – $Re_d = 20000$
 1-12 – номери пакетів згідно з табл.2

Для розширення області застосування розрахункових співвідношень на інші види газових теплоносіїв необхідно за аналогією роботи [5, 6] ввести у формулу подібності (1) число Прандтля у степені 0.4, після чого вона прийме вигляд :

$$Nu = 1.15 \cdot C_q \cdot Re_d^m \cdot Pr^{0.4} \quad (8)$$

Отримані експериментальні дані дозволяють прослідкувати залежність інтенсивності тепловіддачі коридорних пакетів труб з постійними параметрами оребрення ($\psi = \text{const}$) від характеристики розміщення труб у пакеті S_1/S_2 . На рис. 7 показані дослідні дані $Nu = f(S_1/S_2)$ для пакетів труб типів 1 і 2, взятих при $Re_d = 7000$ і відповідні розрахункові криві, які отримані за формулою (1) з урахуванням залежностей (4) та (7). В межах дослідженої області значень параметра розміщення S_1/S_2 тепловіддача змінюється на 40 ... 50%. Криві мають не екстремальний спадний характер. В міру зростання S_1/S_2 інтенсивність теплообміну знижується.

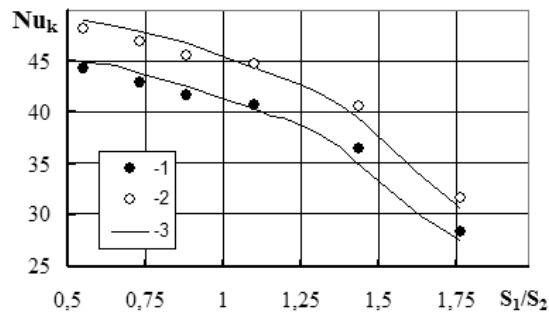


Рис. 7. Залежність $Nu = f(S_1/S_2)$ при $Re = 7000$

1 - труби типу 3, $\psi = 17.68$; 2 - труби типу 4, $\psi = 15.16$; суцільні лінії – розрахункові криві

Інтенсивність теплообміну, як і очікувалося, знижується при зростанні коефіцієнта оребрення ψ від 15 до 18 на 10...12%. До причин зниження інтенсивності тепловіддачі пакетів оребрених труб при зростанні ступеня їх оребрення слід віднести: зниження частки більш ефективної поперечно-омиваної поверхні ребристої труби і відповідне збільшення повздовжньо-омиваної поверхні; зростання примежового шару на ребрі при зростанні його довжини.

Висновки

1. Інтенсивність тепловіддачі коридорних пакетів плоско-овальних труб залежить від геометрії ребристих труб і при варіюванні ступеня оребрення в межах $\psi = 15.3...18$ змінюється на 10...12%.
2. В межах одного типу труб при варіюванні кроків труб ($\psi = \text{const}$ $S_1/S_2 = \text{var}$) інтенсивність теплообміну змінюється на 40...50 %.
3. Отримано нові узагальнювальні залежності для розрахунку теплообміну коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним оребренням, які враховують вплив на інтенсивність теплообміну як параметрів оребрення труб, так і крокових характеристик пакетів.
4. Отримані експериментальні дані, а також запропонована методика теплового розрахунку можуть бути застосованими при проектуванні і промислового впровадженні нових високоєфективних теплообмінних пристроїв із плоско-овальних труб з неповним оребренням.

Література

1. Письменный С.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д. Теплообменная труба. //Патент на корисну модель. Україна. № 25025. Опубл. 25.07.2007. Бюл. №11.
2. Терех А.М. Теплообмен и аэродинамика поперечно-омываемых пучков труб с винтовым, подогнутым и сегментным оребрениями. Дис. ... канд.техн.наук.- Киев, 1997.- 160 с.
3. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб.- Киев: Альтерпрес.- 2004.- 244 с.
4. С.М.Письменный, П.І.Багрій, В.А.Рогачов, О.М.Терех Узагальнений метод розрахунку конвективного теплообміну поперечно-омиваних шахових пучків труб плоско-овального профілю з неповним оребренням//Восточно-Европейский журнал передовых технологий.- 2008. - № 2/3 (32).- С. 44-47.
5. Стасюлявичюс Ю.К., Скринска А.Ю. Теплоотдача поперечно- обтекаемых пучков ребристых труб. - Вильнюс:Минтис. - 1974. - 243 с.
6. Юдин В.Ф. Теплообмен поперечно-оребрённых труб.- Л.: Машиностроение.- 1982.- 192 с.