

РОЗРАХУНОК АЕРОДИНАМІЧНОГО ОПОРУ КОРИДОРНИХ ПАКЕТІВ ПЛОСКО-ОВАЛЬНИХ ТРУБ З НЕПОВНИМ ОРЕБРЕННЯМ

Вступ

Споживання енергетичних ресурсів росте швидкими темпами. Тому раціональне і ефективне їх використання в господарстві є важливою економічною задачею. Основна частина теплової енергії трансформується в різних теплообмінних пристроях, тому зростає актуальність інтенсифікації процесів теплообміну і підвищення енергетичної ефективності трубчастих теплообмінників. Для інтенсифікації теплообміну підвищуються швидкості потоків теплоносіїв і застосовуються окрім гладких шорсткі, оребрені і інші види поверхонь.

Вибір раціональної поверхні нагріву теплообмінного пристрою можливий тільки на основі сумісного рішення питання тепловіддачі і аеродинамічного опору.

На даний час несучими оребрення в основному використовуються труби круглого поперечного перетину. Використання профільованих плоско-овальних оребрених труб, у яких поперечні ребра розташовані на бічних плоских частинах плоско-овальної основи [1], зв'язано з прагненням зменшення аеродинамічного опору трубних пакетів. За рахунок підвищення швидкості теплоносія для пакетів зручнообтічної форми труби зростає інтенсивність теплообміну, що призводить у цілому до підвищення енергетичної ефективності теплообмінного устаткування. Крім того, використання більш технологічного та малоенергоємного контактного приварювання простих за геометрією ребер лише на бічних плоских сторонах плоско-овальної труби призводить до економії металу при виготовленні поверхонь та до практично безмежного збільшення поверхні теплообміну без зменшення теплового потоку, що передається.

У зв'язку з цим в НТУУ «КПІ» проведені експериментальні дослідження аеродинамічного опору пакетів плоско-овальних поперечно-оребраних труб. Метою даної статті є узагальнення отриманих дослідних даних, розробка методу розрахунку аеродинамічного опору коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним поперечним оребренням.

1 Методика досліджень

Дослідження аеродинамічного опору коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним оребренням (рис. 1) при поперечному їх обтіканні повітряним потоком здійснювалися на експериментальній установці, що являє собою аеродинамічну трубу розімкненого типу прямокутного перетину, за методиками, що докладно описані в роботах [2, 3].

Основні геометричні характеристики плоско-овальних труб з неповним оребренням наведені в таблиці 1. Вибір геометрії плоско-овальних труб орієнтований на промисловість, яка випускає труби за нормативними документами – ДСТУ. Ребра вибирались таким чином, щоб прослідкувати залежність аеродинамічного опору від кроку між ребрами, товщини та довжини ребер, які є параметрами коефіцієнта оребрення.

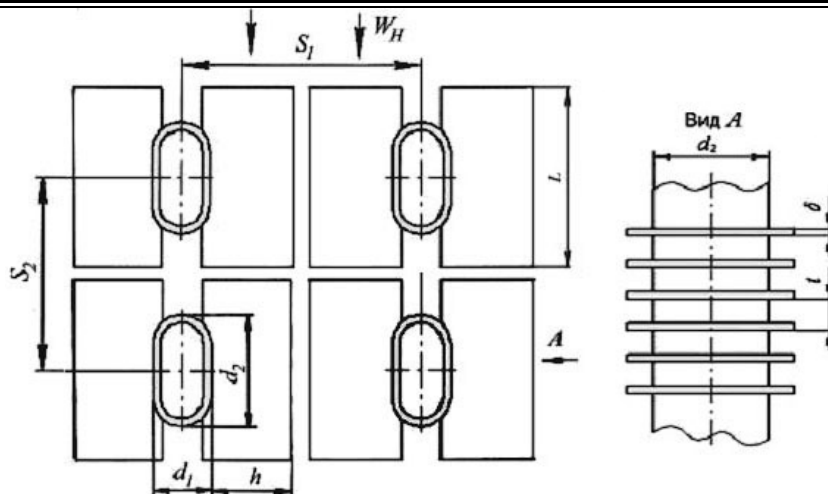


Рис. 1. Коридорний пакет плоско-овальних труб з неповним оребренням

Вивчалися компоновання з числом поперечних рядів $z_2=7$. В кожному поперечному ряді z_1 знаходилось 3-4 труби. Геометричні характеристики коридорних пакетів труб з неповним оребренням наведені у таблиці 2.

За визначальний розмір в числах Рейнольдса брався мінімальний поперечний розмір несучої труби d_1 . За розрахункову швидкість повітря в числах Re і Eu бралася швидкість в найбільш вузькому поперечному перетині пучка.

Втрати тиску визначалися по різниці статичних тисків до і після пучка з урахуванням втрат на тертя та місцевих опорів у проточній частині стенда:

$$\Delta P = \Delta P_{cm} - \left(\lambda_m \frac{L_p}{d_e} \frac{\rho w_m^2}{2} + \xi_m \frac{\rho w_y^2}{2} \right), \quad (1)$$

де ΔP_{cm} - перепад тисків, що вимірюється за допомогою мікроманометра;

L_p - довжина ділянки між точками виміру тиску без врахування довжини пучка;

d_e - еквівалентний гідравлічний діаметр прямого каналу проточної частини труби;

w_m - швидкість повітря в незахарашчених ділянках каналу;

w_y - швидкість повітря у звуженому вставками каналі;

λ_m - коефіцієнт опору тертя; ξ_m - коефіцієнт місцевих опорів.

Таблиця 1

Геометричні характеристики оребрених труб

Найменування	Позначення	Труба типу 1	Труба типу 2
Поперечний розмір несучої труби	d_1 , мм	15,0	15,0
Поздовжній розмір несучої труби	d_2 , мм	30,0	42,0
Висота ребер	h , мм	22,0	23,0
Крок між ребрами	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 величинами ΔP визначалися числа Ейлера для всього пакета в цілому

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot W^2}, \quad (2)$$

і числа Ейлера, віднесені до одного поперечного ряду

$$Eu_0 = \frac{Eu}{z_2}. \quad (3)$$

Таблиця 2

Геометричні характеристики коридорних пакетів оребрених труб

Номер пакета	S_1 , мм	S_2 , мм	S_1/S_2	ψ	n	C_s
Плоско-овальні труби типу 1						
1	66	60	1,100	17,68	0,280	4,950
2	66	75	0,88	17,68	0,300	7,210
3	66	90	0,733	17,68	0,310	7,994
4	66	120	0,550	17,68	0,320	9,710
5	86	60	1,433	17,68	0,270	2,438
6	105,6	60	1,760	17,68	0,255	1,381
Плоско-овальні труби типу 2						
7	66	60	1,100	15,16	0,325	6,150
8	66	75	0,88	15,16	0,342	8,310
9	66	90	0,733	15,16	0,355	9,710
10	66	120	0,550	15,16	0,375	11,70
11	86	60	1,433	15,16	0,305	3,234
12	105,6	60	1,760	15,16	0,295	2,157

2 Аналіз експериментальних даних та їх узагальнення

Попередній аналіз отриманих експериментальних даних і відомого з літератури [2-8] досвіду узагальнення результатів дослідження аеродинамічного опору різноманітних теплообмінних трубчастих поверхонь показав, що при обробці дослідних даних з опору ребристих пучків з плоско-овальних труб за основний параметр, який враховує вплив геометрії оребрених труб, доцільно брати коефіцієнт оребрення ψ , при цьому числа Рейнольдса необхідно визначати по поперечному розміру несучої плоско-овальної труби d_1 . Параметром, який враховує залежність опору від геометрії розміщення труб у пакеті, використовується параметр S_1/S_2 . Параметр S_1/S_2 , як ідентифікатор розміщення труб, має очевидну перевагу порівняно з відносними кроками S_1/d_1 , S_2/d_2 , тому що скорочує число змінних в узагальнюючих формулах.

Аеродинамічний опір коридорних пакетів труб плоско-овального профілю з неповним оребренням досліджувався в діапазоні чисел Рейнольдса $Re_{d_1} = (3...20) \cdot 10^3$. Отримані дослідні дані показані на рис. 2-3 і свідчать про доцільність узагальнення отриманих результатів степеневими залежностями виду

$$Eu_0 = C_s \cdot Re_{d_1}^{-n} \tag{4}$$

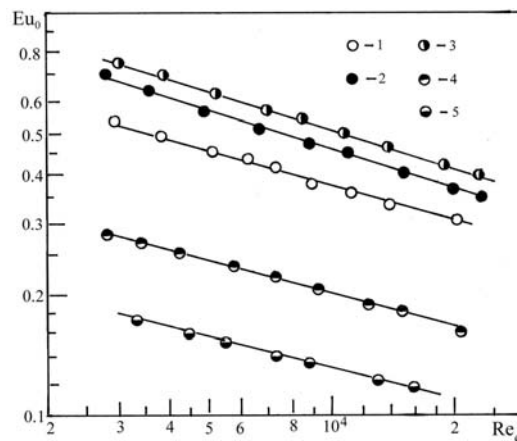


Рис.2. Експериментальні дані по аеродинамічному опору пакетів плоско-овальних труб типу 1: 1 – пучок № 1; 2 – № 3; 3 – № 4; 4 – №5; 5 – № 6

Аналіз отриманих результатів і залежностей $Eu_0 = f(Re)$ показав, що при збільшенні поперечного кроку S_1 та зменшенні подовжнього S_2 аеродинамічний опір пакетів зменшується у 2...2,5 та 1,3...1,5 разів відповідно. Опір пучків також залежить від геометричних характеристик ребристих труб, ідентифікатором яких, як і при дослідженні шахових пакетів [9], виступає коефіцієнт оребрення ψ . При

збільшенні ψ спостерігається зростання аеродинамічного опору, але воно помітне лише до величини відношення кроків $S_1/S_2 < 1,4$. При $S_1/S_2 > 1,4$ зростання або зменшення опору не виявилось (рис.3).

Рис. 4 та рис.5 ілюструють залежність показника степені n і коефіцієнта C_s в формулі (4) від параметра розміщення труб S_1/S_2 . Зміна показника степеня n і C_s відбувається як у межах однакових значень коефіцієнта оребрення ψ при $S_1/S_2 = \text{var}$, так і для пакетів з однаковими параметрами розміщення S_1/S_2 при $\psi = \text{var}$.

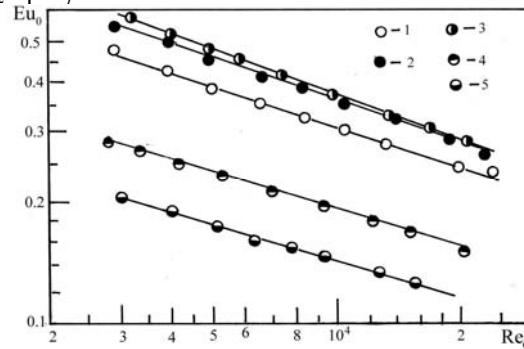


Рис.3. Експериментальні дані по аеродинамічному опору пакетів плоско-овальних труб типу 2:
1 – пучок № 7; 2 – № 9; 3 – № 10; 4 – № 11; 5 – № 12

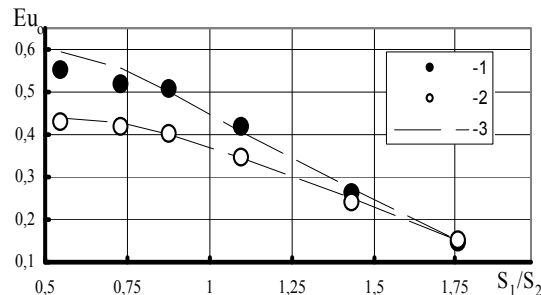


Рис. 4. Залежність чисел Ейлера від параметра розміщення:
1 – $\psi = 17,68$; 2 – $\psi = 15,16$; 3 – розрахункові криві

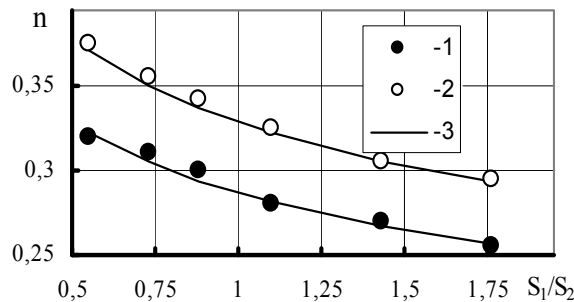


Рис. 5. Залежність показника степеня n в формулі (4) від S_1/S_2 :
1 – $\psi = 17,68$; 2 – $\psi = 15,16$; 3 – розрахункові криві

При збільшенні параметра S_1/S_2 значення n та C_s поступово зменшуються в межах всього інтервалу зміни S_1/S_2 . Загальний перепад n в дослідженому інтервалі геометричних характеристик дорівнює 0,08...0,09. Таким чином, можна констатувати, що факторами, які враховують вплив на втрати тиску геометрії розміщення труб в пакеті і геометрії оребрення, доцільно використовувати параметр розміщення S_1/S_2 та коефіцієнт оребрення ψ .

Залежність n від параметрів ψ та S_1/S_2 може бути представлена загальним виразом у вигляді множника

$$n = a \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^b, \tag{5}$$

де a – коефіцієнт, що залежить від коефіцієнта оребрення ψ ,
 $b = -0,2 = const$ – показник степеня при відношенні S_1/S_2 .

Вплив ψ на n в межах $\psi=15,16\dots17,68$ з достатньою точністю можна розраховувати за степеневою залежністю. Математична обробка графічних залежностей (рис. 4) дає наступне співвідношення для визначення n :

$$n = 3,8\psi^{-0,9} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{-0,2} \quad (6)$$

Розшарувальним параметром наведених на рис. 5 кривих є коефіцієнт оребрення ψ .

Залежність $C_s = f(S_1/S_2, \psi)$ описується виразом (7), в якому k_1, k_2 – емпіричні коефіцієнти (рис. 6):

$$C_s = k_1 \cdot \psi^{-0,25} \cdot e^{-\frac{S_1}{S_2}} - k_2 \cdot \psi^{2,43} \quad (7)$$

Підсумкова точність розрахункової схеми визначалася шляхом прямого зіставлення дослідних і обчислених за формулами (4), (6), (7) чисел Ейлера при граничних значеннях чисел Рейнольдса $Re_{d_1} = 3000$ і $Re_{d_1} = 20000$. Отримані розрахункові співвідношення для визначення аеродинамічного опору для 12 коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним оребренням описують 100% дослідних даних з точністю не гірше $\pm 15\%$.

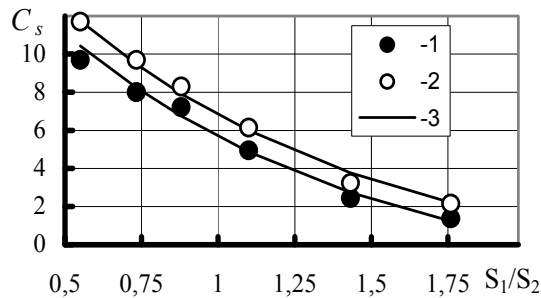


Рис. 6. Залежність коефіцієнта C_s в формулі (4) від S_1/S_2 :

1 – $\psi=17,68$; 2 – $\psi=15,16$; 3 – розрахункові криві

Висновки

1. Аеродинамічний опір коридорних пакетів залежить від геометричних параметрів оребрення, які враховує коефіцієнт оребрення ψ , та крокових характеристик пучків S_1/S_2 .
2. Показник степеня при числі Рейнольдса і коефіцієнт C_s у формулі подібності (4) залежать від геометричних характеристик ребристих труб та пакетів.
3. Результати дослідження опору узагальнені розрахунковими залежностям (4), (6), (7), які являються функціями числа Рейнольдса, коефіцієнта оребрення ψ і параметра розміщення S_1/S_2 .
4. Отримані експериментальні дані, а також розроблена методика розрахунку аеродинамічного опору досліджених коридорних пакетів плоско-овальних труб з неповним оребренням, дозволять оцінити їх теплоаеродинамічну ефективність і можуть бути застосовані при проектуванні і промислового впровадженні нових вискоелективних теплообмінних апаратів.

Література

1. Письменный С.М., Терех О.М., Рогачов В.А., Бурлей В.Д. Теплообменная труба. //Патент на корисну модель. Україна. № 25025 25.07.2007. Бюл. №11.
2. Письменный Е.Н. Теплообмен и аэродинамика пакетов поперечно-оребрённых труб.- Киев: Альтерпрес, 2004.- 244 с.
3. Терех А.М. Теплообмен и аэродинамика поперечно-омываемых пучков труб с винтовым, подогнутым и сегментным оребрением. Дис. ... канд.техн.наук.- Киев, 1997.- 160 с.
4. Письменный Е.Н. Расчет конвективных поперечно-оребрённых поверхностей нагрева.- Киев: Альтерпрес.- 2003.- 184 с.
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.

7. Локшин В.А., Фомина В.Н. Обобщение материалов по экспериментальному исследованию сопротивлений ребристых пучков труб// Теплоэнергетика.- 1978.- №6.- С. 36-39.
 8. Юдин В.Ф., Тохтарова Л.С. Теплоотдача и сопротивление шахматных пучков труб с поперечными ребрами при поперечном омывании потоком// Теплоэнергетика.- 1973.- №2.- С.49-52.
 9. Письменный Є.М., Багрій П.І., Терех О.М., Бурлей В.Д. Узагальнений метод розрахунку аеродинамічного опору поперечно-омиваних шахових пакетів труб плоско-овального профілю з неповним оребренням //Восточно-Европейский журнал передовых технологий.- 2008.- №3/5 (33). - С. 57-61.
-