

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

На правах рукопису

ТЕРЕХ ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ

УДК 536.24: 533.6.011

**ТЕПЛООБМІН ТА АЕРОДИНАМІКА ПОПЕРЕЧНО-ОМИВАНИХ
ПУЧКІВ ТРУБ З ГВИНТОВИМ, ПІДІГНУТИМ ТА СЕГМЕНТНИМ
ОРЕБРЕННЯМ**

Спеціальність 05.14.05. - Теоретична теплотехніка

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Київ - 1997



00751734 (R)

Дисертація є рукописом.

Робота виконана на кафедрі атомних електростанцій та інженерної теплофізики Національного Технічного Університету України "Київський політехнічний інститут".

Науковий керівник

доктор технічних наук,
Письменний Є.М.

Офіційні опоненти :

доктор технічних наук,
Мазур О.І.

кандидат технічних наук,
Фоміна В.М.

Провідна організація:

Харківський Державний
політехнічний Університет

Захист дисертації відбудеться " 31 " березня 1997 р. о 15 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.13 у Національного Технічного Університету України "Київський політехнічний інститут" за адресою 252056, м.Київ-56, пр.Перемоги, 37, корпус 5, ауд.406.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національному Технічному Університеті України "Київський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий 26 промого 1997 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

В.І.Коньшин

АНОТАЦІЯ

В дисертаційній роботі проведені експериментальні дослідження конвективного теплообміну та аеродинамічного опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням, шахматних пучків труб з паралельно-підгнутим та сегментним оребренням в інтервалі чисел Рейнольдса $Re_d = (5 + 70) \cdot 10^3$. На основі єдиного підходу отримані узагальнюючі залежності для розрахунку середьповерхового теплообміну та аеродинамічного опору вищезгаданих пучків.

Проведені дослідження локального теплообміну в пучках поперечно-оребрених труб при вар'юванні типу компоновки та крокових характеристик пучків труб.

Виконаний аналіз причин інтенсифікації теплообміну пучків труб з паралельною підгнкою ребер. Проведена оцінка теплоаеродинамічної ефективності шахматних пучків труб з паралельно-підгнутим та сегментним оребренням.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найбільш перспективним шляхом підвищення ефективності зниження металоємності габаритів теплообмінного обладнання є використання конвективних поверхонь у вигляді пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням. Розширення області застосування таких поверхонь вимагає досконалості методик їх теплового та аеродинамічного розрахунків, т.я. діючі методики незавжди відповідають вимогам, які пред'являються, як у зв'язку з обмеженістю області їх застосування, так і у зв'язку з недостатньою їх точністю.

Залишається мало вивченим механізм інтенсифікації теплообміну в досконалих видах поперечно-оребраних поверхонь нагріву, таких як пучки труб з підгнутим та сегментним оребренням, а також їх теплоаеродинамічні характеристики. Широке впровадження таких поверхонь, одним з вимог якого є розробка інженерних методів їх теплового та аеродинамічного розрахунків, в умовах подорожчання металу при великих об'ємах виробництва теплообмінного обладнання може дати значну економію засобів.

Усе це свідчить про актуальність комплексних досліджень теплообміну та аеродинаміки пучків поперечно-оребраних труб.

Мета роботи. Метою роботи є одержання більш точних та універсальних порівняючих з діючими узагальнених методик теплового та аеродинамічного

ЛНБ ім. В. Степанка
АН України

разрохунків поперечно-омиваних пучків труб з гвинтовим, шайбовим, паралельно-підігнутим та сегментним оребренням, а також поглиблення уявлень про особливості процесів переносу в них.

Досягнення поставленої мети викликало потребу вирішення наступних задач:

- виконати дослідження середньоповерхневого конвективного та аеродинамічного опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням у діапазонах значень коефіцієнта оребрення: $\psi = 1,6 + 27,4$, відносних поперечних і прозовніх відстаней між ними, відповідно: $\delta_1 = 2,4 + 5,5$; $\delta_2 = 1,3 + 9,5$, числа Рейнольдса: $Re_d = (5 + 70) \cdot 10^3$;
- проаналізувати вплив параметрів розміщення труб в пучках, геометрії труб з гвинтовим та шайбовим оребренням на інтенсивність середньоповерхневого теплообміну та аеродинамічного опору;
- узагальнити експериментальні дані у вигляді залежностей, які достатньо повно враховують особливості фізичних процесів у пучках ребристих труб;
- експериментально вивчити особливості локального теплообміну в пучках поперечно-оребраних труб, вплив на процес типу компоновки параметрів розміщення труб у пучку;
- виконати дослідження теплообміну та аеродинамічного опору шахматних пучків труб з паралельно-підігнутим та сегментним оребренням і оцінити їх ефективність;
- проаналізувати фізичний механізм інтенсифікації теплообміну в пучках труб з паралельно-підігнутими ребрами;
- отримати узагальнені залежності для розрохунку середньоповерхневого конвективного теплообміну та аеродинамічного опору шахматних пучків труб з паралельно-підігнутим та сегментним оребренням.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження теплообміну та аеродинаміки пучків поперечно-оребраних труб виконувалися на аеродинамічних трубах розімкнутого типу. При дослідженні середньоповерхневого теплообміну використовувався метод повного теплового моделювання на основі електрообігріву всіх труб пучка.

Інтенсивність середньоповерхньої тепловіддачі визначилась за результатами вимірювань температурних полів ребра та стінки несучої труби.

При вивченні локальної тепловіддачі використовувалися фольгові датчики теплового потоку (датчики Гардона).

Обробка та узагальнення отриманих результатів здійснювалась з допомогою ПЕОМ.

Наукова новизна. Методом повного теплового моделювання досліджений середньоповерхневий теплообмін коридорних пучків поперечно-оребраних

труб у інтервалах: $\psi = 1,6 + 27,4$; $\delta_1 = 2,4 + 5,5$; $\delta_2 = 1,3 + 9,5$, тобто в області геометричних характеристик вдвічі більш широкій, ніж область, досліджена до теперешнього часу.

Виявлена значна залежність показника степеня при числі Рейнольдса в рівнянні для розрахунку конвективної тепловіддачі (1) як від параметрів оребрення, так і від параметрів розміщення труб у пучку. В отриманому виразі враховується ця залежність.

Показано існування максимуму залежності числа Nu від b_2 при $\psi = \text{const}$ та отримано співвідношення для визначення значень b_2 , які відповідають цьому максимуму.

Виконані дослідження аеродинамічного опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням, шахматних пучків з підігнутим та сегментним оребренням в області: $\psi = 1,6 + 27,4$; $\delta_1 = 2,4 + 5,5$; $\delta_2 = 1,3 + 9,5$.

На основі використання параметрів геометричної подібності - зведеної довжини розвинутої поверхні H/F та урахування залежності показника степеня при числі Re від геометричних характеристик пучків розроблено узагальнене співвідношення, яке дозволяє у широкій області геометричних характеристик розрахувати аеродинамічний опір пучків, які вказані вище.

Проведені дослідження середньоповерхневого теплообміну та аеродинамічного опору пучків труб з паралельно-підігнутим та сегментним оребренням в умовах широкого вар'ювання їх геометричних характеристик. Вперше виконаний аналіз впливу ступеня підгину ребер на інтенсивність теплообміну та аеродинамічного опору труб з паралельно-підігнутими ребрами. Вивчений фізичний механізм інтенсифікації теплообміну у пучках труб з паралельно-підігнутими ребрами та показана залежність ефекту інтенсифікації від ступеня підгинки ребер та крокових характеристик пучка.

На підставі єдиного підходу отримані узагальнені залежності для розрахунку теплообміну шахматних пучків труб з паралельно-підігнутим та сегментним оребренням. Отримані експериментальні значення коефіцієнта ефективності сегментних ребер та узагальнена залежність для його розрахунку.

Вперше розроблені залежності для розрахунку аеродинамічного опору пучків труб з паралельно-підігнутим оребренням.

Практична цінність. Розроблені узагальнені залежності, які дозволяють виконати інженерні розрахунки теплоаеродинамічних характеристик коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням в області геометричних параметрів вдвічі більш широких, ніж область використання раніше запропонованих співвідношень.

Отримані експериментальні дані, які дозволяють достовірно оцінити теплоаеродинамічну ефективність пучків труб з паралельно-підігнутим та сег-

ментним оребрнням, а також методики їх теплового та аеродинамічного розрахунку, відсутність яких стримувало промислове впровадження цих інтенсифікованих видів поверхонь нагріву.

Реалізація результатів. Результати досліджень, які використані в останій редакції Нормативного методу теплового розрахунку котлів, галузевих нормативних матеріалах а також впроваджені в учбовий процес Київського політехнічного інституту.

Апробація роботи. Основні результати роботи докладалися на 2-й Все-союзній конференції "Теплообмін у парогенераторах" (м.Новосибірськ, 1990 р.); на 8-й науково-практичній конференції "Досвід експлуатації та шляхів удосконалення теплообмінного обладнання" (м.Севастополь, 1992 р.); на конференції молодих вчених інституту фізико-технічних проблем енергетики АН Литви (м.Каунас, 1987 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано шість друкованих праць.

Автор захищає:

- нові експериментальні дані по середньоповерхневому та локальному теплообміну пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребрнням;
- узагальнюючі залежності для розрахунку середньоповерхневого теплообміну коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребрнням;
- нові експериментальні дані по аеродинамічному опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребрнням;
- узагальнюючі залежності для розрахунку аеродинамічного опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребрнням;
- нові експериментальні дані по теплообміну та аеродинамічному опору шахматних пучків труб з паралельно-підігнутими ребрами;
- фізичні уявлення про причини інтенсифікації теплообміну в пучках труб з паралельно-підігнутим оребрнням;
- узагальнюючі залежності для розрахунку теплообміну та аеродинамічного опору шахматних пучків труб з паралельно-підігнутими ребрами;
- нові експериментальні дані по теплообміну та аеродинамічному опору шахматних пучків труб з сегментним оребрнням;
- підхід до узагальнення експериментальних даних по теплообміну та аеродинамічному опору шахматних пучків труб з паралельно-підігнутим та сегментним оребрнням.

Об'єм та структура роботи. Дисертація складається з вступу, шести розділів, висновків, списку літератури із 82 назв і додатків, робота викладена

на 160 сторінках машинописного тексту і має 26 таблиць, 54 рисунків та 2 фотографії.

У вступі сформульована мета, обґрунтована актуальність та задачі роботи.

У першому розділі виконаний огляд літературних даних досліджень середньоповерхневого теплообміну та аеродинамічного опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням, локального теплообміну в пучках.

Велика увага приділена оцінці методів теплового моделювання та питанню вибору розміру, який є визначним у числах подібності.

У другому розділі подано описання експериментальних стендів, конструкції труб-калориметрів, вимірювальної апаратури, методики проведення експериментів та обробки дослідних даних.

У третьому розділі приводяться результати дослідження середньоповерхневої тепловіддачі та аеродинамічного опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням. Виконаний аналіз впливу параметрів оребрення та крокових характеристик пучків на теплообмін та опір. Запропоновані узагальнюючі співвідношення для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та втрати тиску. Проведено порівняння з даними та розрахунками залежності інших авторів.

Четвертий розділ присвячений дослідженню закономірностей локального теплообміну в пучках поперечно-оребrenних труб в умовах вар'ювання крокових характеристик, типу компоновки.

У п'ятому розділі приводяться результати дослідження середньоповерхневого теплообміну та аеродинамічного опору шахматних пучків труб з паралельно-підігнутими ребрами. Запропоновані узагальнюючі співвідношення для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та втрати тиску. Виконаний аналіз причин інтенсифікації теплообміну в пучках труб з паралельною підгинкою ребер.

Шостий розділ присвячений аналізу результатів дослідження середньоповерхневого теплообміну та аеродинамічного опору шахматних пучків труб з сегментним оребренням. Приводяться узагальнюючі залежності для визначення конвективних коефіцієнтів тепловіддачі та розрахунку аеродинамічного опору.

У додатках показані експериментальні дані та розрахунок похибки вимірювань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ.

Здобути до теперішнього часу експериментальні дані з теплообміну та аеродинамічного опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням охоплюють область параметрів : $b_1 = 1,7 + 3,0$; $b_2 = 1,7 + 3,0$; $\psi = 1,9 + 18,0$. Однак, діапазон геометричних характеристик пучків, який викликає практичний інтерес, більш широкий як за параметрами оребрення так і за параметрами розміщення труб. Існуючі узагальнені залежності надійно описують експериментальні дані тільки в інтервалі змінення крокових характеристик $b_1 = 1,7 + 3,0$; $b_2 = 1,7 + 3,0$.

Залишаються мало вивченими аеродинамічні характеристики пучків труб з підігнутим та сегментним оребренням. Відсутні методики розрахунку теплообміну та аеродинамічного опору пучків труб з паралельно-підігнутими ребрами, а існуючі залежності для розрахунку теплообміну та опору пучків труб з сегментним оребренням відрізняються невисокою точністю. Численні результати досліджень локального теплообміну носять суперечливий характер. Досліджені теплообмін та аеродинамічний опір 53 коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням, 15 шахматних пучків труб з паралельною підгинкою ребер та 16 шахматних пучків з сегментним оребренням. Повне теплове моделювання реалізовувалось шляхом електричного обігріву всіх труб пучка. Величини середньоповерхневих коефіцієнтів тепловіддачі α визначались безпосередньо за результатами вимірів температурного поля ребра та стінки несучої труби. Визначальним розміром у числах Nu та Re прийнятий діаметр несучої труби d . Фізичні константи віднесені до середньобалансової температури потоку, визначна швидкість вираховувалась в мінімальному живому перетені пучка.

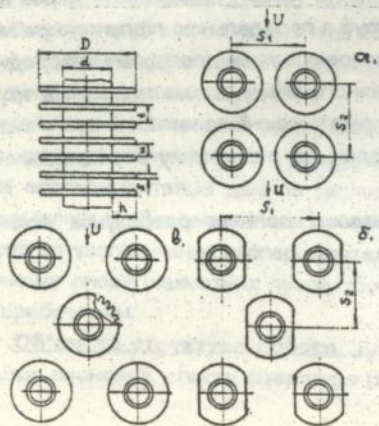


Рис. 1. Геометричні характеристики ребристих труб :

а - коридорні пучки з гвинтовим та шайбовим оребренням; б - шахматні пучки з паралельно-підігнутими ребрами; в - шахматні пучки з сегментним оребренням

Аеродинамічний опір пучків досліджувався в ізотермічних умовах. Результати експериментів подавалися у вигляді залежності чисел Ейлера (Eu_0) віднесених до одного поперечного ряду, від чисел Рейнольдса (Re_d), визначаючим розміром у яких прийнятий еквівалентний діаметр мінімального прохідного перетину пучка d_e . В цьому ж перетені рахувалося і визначаюча швидкість.

Застосовані методики експериментів та вимірювальна апаратура дозволяли визначати числа Nu з похибкою, яка не перевищує $\pm 3,8\%$, похибка визначення числа Eu ні перевищувала $\pm 17,4\%$.

Локальний теплообмін у пучках труб з шайбовим оребренням вивчався за допомогою фольгових датчиків теплового потоку Гордона, вмонтованих у ребро.

Експерименти по дослідженню середньоповерхневої тепловіддачі коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням проведені у інтервалі чисел $Re_d = (3 \div 60) \cdot 10^3$. Їх результати опроксиміювались залежностями вигляду:

$$Nu = C_n \cdot Re_d^m \quad (1)$$

та узагальнювались в області $Re_d \geq 5 \cdot 10^3$, тобто у ряді випадків графіки $\lg(Nu) = f(\lg Re_d)$ мали злом при $Re_d \approx (5 \dots 7) \cdot 10^3$.

Аналіз показав, що величина показника степеня m при числі Re_d у формулі (1) не є величиною постійною, а залежить як від геометрії оребрених труб, які достань повно характеризуються коефіцієнтом оребрення ψ , так і від параметрів розміщення, серед яких найкращу кореляцію забезпечує

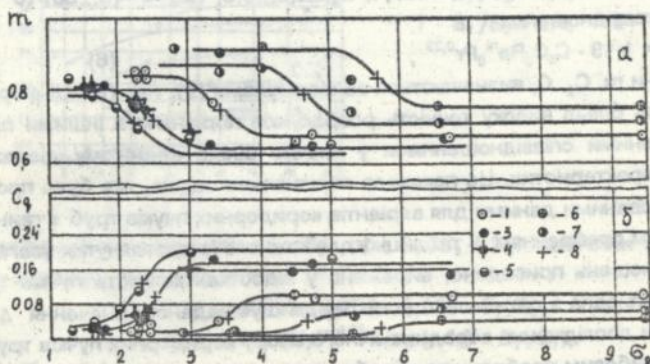


Рис.2. Залежності $m = f(\psi, \sigma_2)$, $\psi = \text{const}$ (а) та $C_n = f(vi, \sigma_2)$, $\psi = \text{const}$ (б) для коридорних пучків: 1 - $\psi = 10,79$; 3,4 - $\psi = 3,54$; 5 - $\psi = 1,64$; 6 - $\psi = 27,4$; 7 - $\psi = 18,23$; 8 - точки перетину дослідних даних

відносний поздовжній крок σ_2 . Експериментальні значення m об'єднуються близькими по конфігурації кривими (рис.2), які добре описуються функцією

$$m = 0,7 + 0,08 \operatorname{th}[4(2 + \psi/7 - \sigma_2)] + 0,005 \cdot \psi. \quad (2)$$

Аналіз значень коефіцієнта C_0 у формулі (1) (рис.2) показав, що в основі виду залежності $C_0 = f(\psi, \sigma_2)$ також є функція $\operatorname{th}[4(2 + \psi/7 - \sigma_2)]$:

$$C_0 = \{ 1,36 - \operatorname{th}[4(2 + \psi/7 - \sigma_2)] \} \cdot (1,1/(\psi + 8) - 0,014) \quad (3)$$

Використання відношень (5,6) разом з функцією (1) дозволило з точністю $\pm 15\%$ узагальнити 85% власних експериментальних даних та даних інших авторів, одержаних на основі методу повного теплового моделювання.

Аналіз впливу на середньоповерхневий теплообмін крокових характеристик коридорних пучків показав, що α практично не залежить від величини σ_1 . В межах досліджуваного інтервалу значень σ_2 тепловіддача змінюється на 30...50%. Залежності чисел Nu від σ_2 мають максимум (рис.3), координата якого $(\sigma_2)_{\max}$ визначається в основному величинами коефіцієнта оребрення ψ :

$$(\sigma_2)_{\max} \approx \psi/7 + 2. \quad (4)$$

Інтенсивність теплообміну помітно залежить від параметрів оребрення і при підвищенні ψ від 1,6 до 27,4 зменшується на 40...80%.

Досліди впливу на теплообмін числа поперечних рядів труб у пучку z_2 дозволили отримати наступну розрахункову залежність для поправки C_1 на малорядність пучка

$$C_1 = 3,5 \cdot z_2^{0,03} - 2,72 \quad \text{при } 8 > z_2 \geq 2; \quad C_1 = 1,0 \quad \text{при } z_2 \geq 8. \quad (5)$$

Таким чином, для розрахунку конвективного теплообміну при поперечному омиванні газовим потоком коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням в області $\psi = 1,6...27,4$; $\sigma_2 = 1,3...9,5$; $Re_D = (5...60) \cdot 10^3$ рекомендується співвідношення

$$Nu = 1,13 \cdot C_1 C_0 Re_D^m Pr^{0,33}, \quad (6)$$

в якому величини m , C_0 , C_1 визначаються за формулами (2), (3), (5). Ці формули забезпечують більш високу точність розрахунків порівняно з іншими відомими узагальненими співвідношеннями у значно більш широкому діапазоні геометричних характеристик. Це показала порівняльна оцінка, яка була проведена за опублікованими даними для варіантів коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням. У таблиці 1 для кожного із розглянутих узагальнюючих співвідношень приведено, виражена у відсотках кількість пучків тепловіддача яких описана з похибкою, що не перевищує заданого значення Δ .

Результати дослідження аеродинамічного опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням оброблялися у інтервалі чисел Рейнольдса $Re_D = (5...60) \cdot 10^3$ на підставі співвідношення

$$Eu_D = C_2 C_1 Re_D^{-n}. \quad (7)$$

Таблиця 1.

Результати порівняння методик розрахунку теплообміну коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням

Методика	$\Delta \leq \pm 15\%$	$\Delta \leq \pm 20\%$	$\Delta \leq \pm 30\%$	$\Delta \leq \pm 40\%$
Нормативна, 1973р.	36,7	50,0	83,3	95,0
ЦКТІ	20,0	40,0	53,3	71,6
КПІ	85,0	88,3	96,6	98,3

Узагальнення експериментальних даних виконувалося з припущенням, що показник степеня n та коефіцієнт C_r у формулі (7) рівноправні змінні, залежні від параметру розміщення S_1/S_2 та зведеної довжини оребреної поверхні H/F , яка визначається як відношення площі поверхні труб одного поперечного ряду до площі узького поперечного перетину пучка. У межах вказаної області чисел Re_p показник степеня для досліджених пучків приймає значення $n = 0,0 \dots 0,21$. Залежності $n = f(H/F; S_1/S_2)$ та $C_r = f(H/F; S_1/S_2)$ одержані окремо для двох

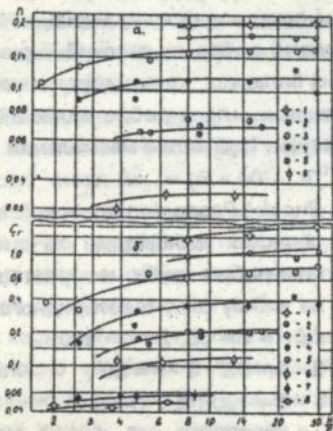


Рис.3. Залежність показника степеню n (а) та коефіцієнта C_r (б) у формулі (7) від приведенної довжини H/F та параметру розміщення S_1/S_2 для коридорних пучків:

- 1 - $S_1/S_2 = 0,26$; 2 - $S_1/S_2 = 0,52$;
- 3 - $S_1/S_2 \approx 0,7$; 4 - $S_1/S_2 \approx 1,1$;
- 5 - $S_1/S_2 \approx 1,4$; 6 - $S_1/S_2 \approx 1,78$;
- 7 - $S_1/S_2 \approx 2,4$; 8 - $S_1/S_2 = 2,94$.

інтервалів зміни параметрів S_1/S_2 : при $S_1/S_2 < 2,1$ величини n та C_r описуються виразом, який має вигляд

$$n = (H/F)^{0,08} \cdot (0,184 - 0,088 \cdot S_1/S_2), \quad (8)$$

$$C_r = 1,25 \cdot (H/F)^{0,25} \cdot \exp(-1,7 \cdot S_1/S_2), \quad (9)$$

при $S_1/S_2 \geq 2,1$

$$n = 0; C_r = (H/F)^{0,1} \cdot (0,184 - 0,088 \cdot S_1/S_2) \quad (10)$$

Поправка на малорядність C_r розраховується за співвідношенням:

$$C_2 = 1 + 0,65/z_2^3 \text{ при } z_2 < 6, \quad C_2 = 1 \text{ при } z_2 > 6. \quad (11)$$

Використання вирізів (8) - (12) разом з формулою (7) дозволило у області чисел $Re_0 = (5 \dots 60) \cdot 10^3$ з похибкою $\pm 20\%$ узагальнити 88% власних даних з даними інших авторів. Запропоновані розрахункові співвідношення для коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням, які мають $(H/F) = 1,5 \dots 70,0$; $S_1/S_2 = 0,3 \dots 2,5$ та відрізняються більш високою точністю, в порівнянні з іншими відомими залежностями (табл.2).

Таблиця 2.

Результати порівняння методик розрахунку аеродинамічного опору коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням.

Методика	$\Delta \leq \pm 20 \%$	$\Delta \leq \pm 30 \%$	$\Delta \leq \pm 40 \%$	$\Delta \leq \pm 50 \%$
Нормативна, 1978 р.	53,2	67,5	77,0	93,5
КПІ	88,0	92,2	98,7	100,0

При дослідженні залежностей локального теплообміну в пучках поперечно-ореброваних труб отримані та проаналізовані розподіли інтенсивності тепловіддачі ребристих труб в умовах вар'ювання параметрів розміщення, типу компоновки, а також числа Re . Отримані дані показали суттєву нерівномірність розподілу інтенсивності тепловіддачі на поверхні ребра та високий її рівень у прикореневицях частинах ребра (рис.4). У тих випадках, коли виміри виконувалися у глибинних рядах пучків, на формування α -поля ребра впливали тип компоновки пучка та його крокові характеристики. Цей вплив мінімальний при

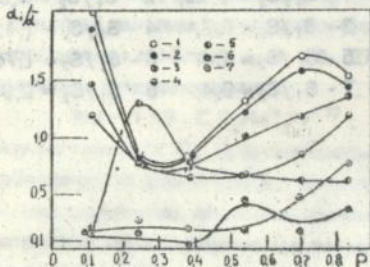


Рис.4. Розподіл відносної інтенсивності тепловіддачі за височиною ребра труби, яка розташована в 1-му ряду шестирядного пучка: 1 - $f = 0^\circ$; 2 - $f = 30^\circ$; 3 - $f = 60^\circ$; 4 - $f = 90^\circ$; 5 - $f = 120^\circ$; 6 - $f = 150^\circ$; 7 - $f = 180^\circ$.

великих відносних поздовжніх кроках ($\sigma_2 > 4$), коли розташовані нижче за течією труби знаходяться за межами ближнього вихрового сліду від підлеглих труб, а відмінності між коридорною та шахматною компоновками в значній мірі нівелюються. При зменшенні σ_2 α -розподіл починає залежати від типу компоновки. В області $\psi = \pm 30^\circ$ в передній частині ребер коридорного пучка відбувається різке зменшення значень коефіцієнтів тепловіддачі, пов'язане з накладенням ближнього вихрового сліду від труби, яка лежить у тому ж поздовжньому ряді вище за течією (рис.5а). При шахматній компоновці труб з

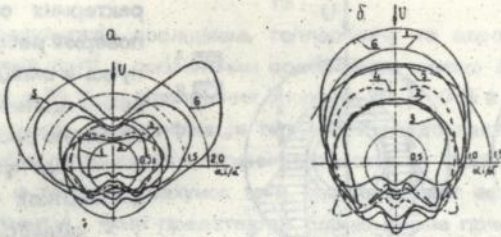


Рис.5. Розподіл відносної інтенсивності тепловіддачі по колу ребра труби, яка розташована в четвертому ряду шестигранного пучка: а - коридорна компоновка; б - шахматна компоновка; ($\sigma_1 = 3,47$; $\sigma_2 = 2,66$)

аналогічним σ_2 відносна віддаль між взаємодіючими трубами у 2 рази більша, внаслідок чого при $\sigma_2 \geq 2$ характер α -розподілів в передній області ребристих труб, які розташовані у глибині шахматного пучка, залишається приблизно таким, як для першого ряду (рис.5б).

Результати досліджень локальної тепловіддачі дозволили виявити причини її механізм інтенсифікації теплообміну в пучках труб з паралельно-підігнутими ребрами.

Дослідження середньоповерхневого теплообміну та аеродинамічного опору шахматних пучків труб з паралельно-підігнутими ребрами, які виконані в інтервалі чисел $Re_d = (5 + 50) \cdot 10^3$ показали, що ефект інтенсифікації теплообміну внаслідок підгину ребер у значній мірі залежить від крокових характеристик пучка та найбільш помітний у пучках з великими поперечними кроками. Відігнуті частини ребер направляють високоінтенсивні вторинні течії, які генеруються у лобовій частині ребра та обумовлюють піки тепловіддачі на бокових межах кормової зони, глибше в область за несучим циліндром, яка відрізняється відносно слабким рециркуляційним рухом теплоносія та низькою тепловіддачею. В результаті розміри кормової зони скорочуються, зростає доля поверхні ребра, яка взаємодіє з інтенсивними вихровими течіями та тепловіддача ребристої труби зростає (рис.6).

Вплив підгинки l на тепловіддачу в досліджених межах її значень виявилось досить слабким, хоча можливо констатувати деякий зріст інтенсивності тепловіддачі по мірі збільшення відносного підгину $(D - l)/2h$.

Аналіз експериментальних даних по середньоповерхневому теплообміну та аеродинамічному опору шахматних пучків труб з паралельно-підігнутими ребрами показав, що ухили залежностей $\lg Nu = f(Re)$ та $\lg Eu_n = f(Re_n)$ практично співпадають з ухилами відповідних залежностей для аналогічних за

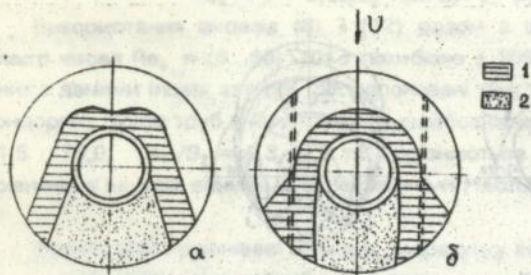


Рис.6. Зміна розмірів характерних областей на поверхні ребристої труби пучка у випадку застосування підгинки ребер: а - звичайне ребро; б - підігнуте ребро (разгортка); 1 - область вторинних циркуляційних течій; 2 - кормова зона.

геометрією пучків труб із звичайним невідігнутим оребренням. Ця обставина дозволила при узагальненні даних для пучків труб з підігнутими ребрами використовувати їх як базові залежності виду (6), (7), одержані раніш в КПІ для шахматних пучків труб із звичайним гвинтовим та шайбовим оребренням. Вплив підгинки враховується відповідними поправками C_n , C_n' , які введені в ці залежності.

Обробка власних дослідних даних по теплообміну, а також даних, одержаних у ЦКТІ та ВТІ дозволила одержати формулу для розрахунку поправки C_n

$$C_n = 0,3 \cdot \sin(S_1/S_2 - 0,43) + 0,85 \quad (13)$$

Таким чином для розрахунку середньоповерхневого теплообміну шахматних пучків труб з паралельно-підігнутим оребренням рекомендуються узагальнюючі співвідношення

$$Nu = 1,13 \cdot C_z C_n C_q Re_d^m \cdot Pr^{0,23} \quad (14)$$

$$m = 0,7 + 0,08 \operatorname{th}(S_1/S_2 - 1,26/\psi - 2) + 0,005 \cdot \psi \quad (15)$$

$$C_q = (1,36 - \operatorname{th}(S_1/S_2 - 1,26/\psi - 2)) \cdot (1,1/(\psi + 8) - 0,014) \quad (16)$$

в C_n - за формулою (13).

Вплив степеня підгину ребер $(D - l)/2h$ на аеродинамічний опір виявлявся більш суттєвим, що і знайшло відображення у відповідних узагальнюючих співвідношеннях:

$$Eu_0 = C_z C_n C_l Re_d^{-n} \quad (17)$$

$$n = 0,17 \cdot (H/F)^{0,25} \cdot (S_1/S_2)^{0,57} \cdot e^{-0,36 S_1/S_2} \quad (18)$$

$$C_l = 1,4 \cdot (H/F)^{0,53} \cdot (S_1/S_2)^{1,3} \cdot e^{-0,9 S_1/S_2} \quad (19)$$

$$C_z^n = 0,66 \cdot \exp(0,26 S_1/S_2) + 0,5 \cdot (D - l)/2h \quad (20)$$

Співвідношення (13) + (20) справедливі при $\psi = 4 + 9$; $\sigma_1 = 2,0 + 3,2$; $\sigma_2 = 1,3 + 2,0$ в інтервалі $Re_d = (5 + 50) \cdot 10^3$.

Аналіз результатів досліджень теплообміну та аеродинамічного опору шахматних пучків труб з сегментним оребренням виявив інтенсифікацію теплообміну на 10 + 35 % та підвищення опору на 20 + 60 % в порівнянні з звичайним оребренням. Інтенсифікація теплообміну відбувається внаслідок руйнування на ребрі потовщених пограничних шарів та формування розвинутої вихрової течії, а також за рахунок того, що коефіцієнт ефективності кожного елемента (сегменту), який представляє собою пряме прямокутне ребро, вище, ніж у шайбового ребра. При узагальненні експериментальних даних для пучків труб з сегментним оребренням використані тіж самі базові залежності, що і при узагальненні даних для труб з паралельно-підігнутим оребренням. В результаті для розрахунку середньповерхневого теплообміну шахматних пучків труб з сегментним оребренням рекомендується використовувати співвідношення (14), в якому поправка, що враховує вплив форми ребра C_n , з достатньою точністю може бути прийнята величиною постійною та рівною:

$$C_n = 1,30 \quad (21)$$

При розрахунках аеродинамічного опору, поправку C_n в узагальнюючому співвідношенні (17) визначають за формулою:

$$C_n = 0,55 \cdot (H/F)^{0,25} \cdot (S_1/S_2)^{0,4} \quad (22)$$

Використання рівнянь (14), (21) в інженерних розрахунках неможливе без коефіцієнта істинної ефективності сегментного ребра $E_{\text{с}}$, вираз для якого одержано на основі обробки дослідних значень приведених та конвективних коефіцієнтів тепловіддачі

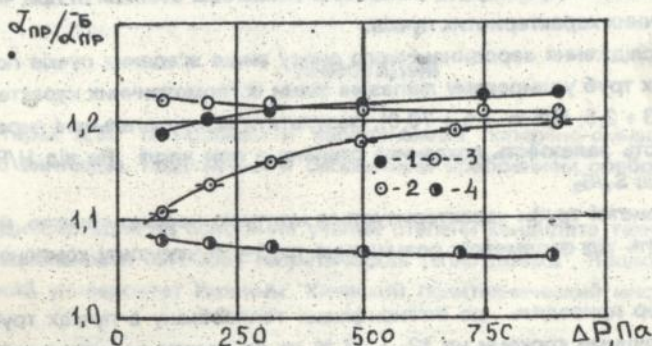


Рис.7. Залежність $\alpha_{\text{пр}}/\alpha_{\text{ср}}^{\text{с}} = f(\Delta P)$: 1 - шахматний пучок з сегментним оребренням $\sigma_1 = 2,19; \sigma_2 = 2,03$; 2 - $\sigma_1 = 2,88; \sigma_2 = 1,56$; 3 - $\sigma_1 = 3,21; \sigma_2 = 1,43$; 4 - шахматний пучок з паралельно- підігнутим оребренням $\sigma_1 = 3,21; \sigma_2 = 1,43$.

$$E_{\psi} = -0,37 \cdot th(\beta h - 1) + 0,75, \quad (23)$$

тут $\beta h = \sqrt{2\alpha/(\delta\lambda)} \cdot h$ - безрозмірна висота сегментного ребра.

Формули (14), (17), (21) + (23), які можуть застосовуватись при: $\psi = 5 + 10$; $\sigma_1 = 1,24 + 3,9$; $\sigma_2 = 1,43 + 2,66$; $Re_d = (5 + 50) \cdot 10^3$.

Оцінити ефект інтенсифікації зовнішнього теплообміну можливо, якщо порівняти зведені коефіцієнти тепловіддачі звичайного та інтенсифікованого пучків при рівних аеродинамічних опорах. Така оцінка проведена на прикладі конвективного випарного пучка котла-утилізатора П-86 у випадку використання замість труб зі звичайним гвинтовим оребренням труб з паралельно-підогнутим та сегментним оребренням (рис.7) при фіксованій тепловій потужності пристрою, витратах теплоносія, температурного напору. Порівняння показало, що чистий виграш по зовнішньому теплообміну може досягати 8+20 %.

Таким чином, використання труб з підгнутим та сегментним оребренням дозволяє знизити металоемність та габарити теплообмінних апаратів без підвищення експлуатаційних затрат.

ВИСНОВКИ

1. Методом повного теплового моделювання проведено комплексне дослідження середньоповерхневого теплообміну коридорних пучків труб з гвинтовим та шайбовим оребренням, шахматних пучків труб з паралельно-підгнутим та сегментним оребренням у широкому інтервалі значень параметрів оребрення та розміщення труб у пучку. Результати узагальнені універсальними виразами, які враховують залежність показника степеня m при числі Re від геометричних характеристик пучків.
2. Виконані дослідження аеродинамічного опору вище згаданих пучків поперечно-ореброваних труб у широкому діапазоні зміни їх геометричних характеристик ($S_1/S_2 = 0,3 + 2,5$; $H/F = 1,5 + 70,0$), результати яких узагальнені виразами, які враховують залежність показника степеня n при числі Re від H/F та відношення кроків S_1/S_2 .
3. α - поле ребристої труби характеризується істотною нерівномірністю, його характер залежить від параметрів розміщення труб у пучку, типу компоновки та числа Re .
4. Підгинка ребер приводить до інтенсифікації теплообміну в пучках труб з великими поперечними кроками на 12 + 17 % та до зросту аеродинамічного опору на 10 + 45%. Причиною інтенсифікації є зменшення розмірів кормової вихрової зони, яка характеризується відносно невисоким рівнем тепловіддачі.
5. Використання труб з сегментним оребренням приводить до інтенсифікації теплообміну на 25 + 35% при зрості аеродинамічного опору на 20 + 60%.

6. Використання інтенсифікованих поверхонь дає змогу не менш ніж на 8 + 20% знизити металосміність та габарити теплообмінного обладнання.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНІ У ПУБЛІКАЦІЯХ

1. Легкий В.М., Письменный Е.Н., Терех А.М. Обобщение экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению шахматных пучков поперечно-оребрённых труб // Известия вузов. Энергетика. - 1987. - № 4. - С.98-101.
2. Легкий В.М., Терех А.М., Сушко О.В. Обобщение экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению шахматных пучков поперечно-оребрённых и гладких труб // Теплоэнергетика. - 1991. - № 2. - С.49-52.
3. Письменный Е.Н., Терех А.М. Теплообмен малорядных пучков поперечно-оребрённых труб // Промышленная теплотехника. - 1991. - № 3. - С.55-60.
4. Письменный Е.Н., Терех А.М. Локальный теплообмен в пакетах поперечно-оребрённых труб // Промышленная теплотехника. - 1993. - Т.15. - № 3. - С.45-55.
5. 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.
6. Легкий В.М., Письменный Е.Н., Терех А.М. Аэродинамическое сопротивление поперечно-омываемых коридорных пучков оребренных труб // Теплоэнергетика. - 1994. - № 5. - С.58-60.

АННОТАЦИЯ

Терех А.М. Теплообмен и аэродинамика поперечно-омываемых пучков труб с винтовым, подогнутым и сегментным оребрением. Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 "Теоретическая теплотехника", Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 1997.

Защищается диссертация, в которой экспериментально исследованы конвективный теплообмен и аэродинамическое сопротивление коридорных пучков труб с винтовым и шайбовым оребрением, шахматных пучков с пара-

лельно-подогнутым и сегментным оребрением в интервале числа Рейнольдса $Re_d = (5 \div 70) \cdot 10^3$.

Проведенны исследования локального теплообмена в пучках поперечно-оребрённых труб. Проанализирован механизм интенсификации теплообмена в пучках труб с подогнутым оребрением. Выполнена оценка их теплоаэродинамической эффективности.

На основе единого подхода получены обобщенные зависимости для расчета среднеповерхностного теплообмена и аэродинамического сопротивления вышеуказанных пучков труб.

SUMMARY

Terekh A.M. Heat exchange and aerodynamics of cross-washed tube banks with spiral and disk fins, staggered tube banks with paraleal bended and segment fins. Manuscript.

Thesis for a scientific degree of the candidate of technical sciences according to speciality 05.14.05. "Theoretical heat technology", National technical university of Ukraine, "Kiev politechnical institute", Kiev, 1997.

Defended is the dissertation, in which convective heat exchange and aerodynamic drag of in-line tube banks with spiral and disk fins, staggered tube banks with psrallel bended and segment fins, are experimentally investigated in the Reynolds number interval $Re = (3 \dots 60) \cdot 10^3$.

Studied is local heat exchange in cross finned tube banks. The mechanism of heat exchange intensification in tube banks with bended fins is analised. Also the valuation thermal and aerodynamic efficinty of this tube banks is performed.

The integrated dependences for calculation of heat exchange and aerodynamic resistance of above mentioned tube banks are obtained on the basis of uniform aproach.

Ключові слова: теплообмін, опір, труба, ребро, підгибка, сегмент, інтенсифікація.

Підписано до друку 21.02.97р. Формат 60x84/16

Папір офсетний. Умовн.-друк.аркуш. 1,0.

Об.-вид.аркуш 1,0. Тираж 100. Замовл. 62

Поліграф. Дільн. Інституту електродинаміки АН України,
252680, Київ-57, проспект Перемоги, 56

434995

AB 37.095