

Академія наук України
ІНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОБУДУВАННЯ

На правах рукопису

СМОРОДСЬКА ІННА ВАСИЛІВНА
ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ КАНАЛІВ
МАТРИЦЬ ТЕПЛОЕМІННИХ АПАРАТІВ

Об.І4.04 - промислова теплоенергетика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

И.С.С.

Харків - 1994

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі загальної теплотехніки
Харківського політехнічного університету

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент
Шевельов Олександр Олександрович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Яковлев Олександр Іванович;
кандидат технічних наук, старший
науковий співробітник
Рибкобиленко Ігор Вікторович

Провідна організація - НВО "Турбоатом" /м.Харків/.

Захист відбудеться 27.04 1994 р. о 14 год в аудиторії
ХІ-го поверху на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д 016.22.01 при Інституті проблем машинобудування АН України
за адресою: ЗІ0046, Харків, вул.Дм.Пожарського, 2/10.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту
проблем машинобудування АН України, ЗІ0046, м.Харків, вул.
Дм.Пожарського, 2/10.

Автореферат розісланий 11.02.94

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради,
доктор технічних наук, професор

Малыренко В.А.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00778976 (1)

ЛННБ ім. В. Стефаніка
АН України

ДВ - 29.357

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Перенесення теплоти від одного теплоносія до іншого є широко розповсюдженим технологічним процесом, що здійснюється в різноманітних теплообмінних пристроях.

Пристрої, що передають тепло, застосовуються у багатьох галузях народного господарства: в теплоенергетиці, хімічній, харчовій промисловості, металургії, авіаційній, ракетно-космічній техніці та інш. Їх створення являє собою складну задачу із-за суперечності вимог, що ставляться до зазначених пристроїв. З одного боку, раціональна конструкція пристрою, що передає тепло, повинна забезпечити високу інтенсивність теплопереносу і, отже, малі габарити і вагу, що визначають вартість пристрою, з другого - мінімальний гідравлічний опір і, в кінцевому підсумку, мінімальні витрати потужності на перекачку теплоносія /теплоносіїв/, від яких залежать експлуатаційні витрати. Підставою для вибору оптимального розв'язку служать теплогідравлічні характеристики каналів, тобто закономірності розвитку теплообмінних і гідродинамічних процесів. Властивості каналів як елементів матриць теплообмінних апаратів є вихідними при розв'язанні самих різноманітних питань застосування їх в різних технологіях, що і визначає постановку наукової задачі, її актуальність.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі загальної теплотехніки Харківського політехнічного університету у відповідності до координаційного плану науково-дослідних робіт АН України на 1986 - 1990 рр. за комплексною проблемою "Теплофізика" /шифр І.97 /п.4 "Дослідити на фізичних і математичних моделях процеси гідродинаміки та теплообміну в каналах і елементах енерготехнічних і енерготехнологічних установок".

Мета роботи. Вивчення теплогідравлічних характеристик каналів матриць компактних теплообмінників з пластинчасто-ребристими поверхнями теплообміну та поверхнями теплообміну з турбулізаторами.

Наукова новизна:

- для раніше досліджених пластинчасто-ребристих поверхонь трьох типів введенням додаткових параметрів отримано узагаль-

нюючі критеріальні залежності для чисел Нуссельта та Ейлера, ґрунтуючись на окремих залежностях виду $Nu=f(Re, Pr)$, $E_u=f(Re)$; - сформульована математична модель і розроблена методика чисельного експерименту для матриць з шаховим розміщенням ребер; - запропонована нова поверхня теплообміну з шаховим несиметричним розміщенням ребер; - у результаті чисельного експерименту визначені теплогідрравлічні характеристики матриць з симетричним і несиметричним розміщенням каналів; більш ефективними виявились матриці з несиметричним розміщенням каналів; - із експериментального дослідження одержані теплогідрравлічні характеристики циліндричних каналів з внутрішніми поперечними ребрами-турбулізаторами; - ґрунтуючись на проведеному фізичному експерименті і дослідних даних інших авторів одержані узагальнюючі критеріальні залежності, що враховують вплив на число Нуссельта чотирьох параметрів, на число Ейлера - трьох параметрів.

Основні результати роботи достатньо повно опубліковані в шести наукових працях. Особистий внесок здобувача в ці праці: - участь в проведенні експерименту, опрацювання та узагальнення дослідних даних /1,3/; - розробка методики узагальнення дослідних даних, одержання узагальнених залежностей і написання статті /4,5/; - розробка математичної моделі, проведення чисельного експерименту та узагальнення результатів чисельного експерименту /6/.

Практична цінність роботи визначається: - одержанням для трьох типів пластинчасто-ребристих поверхонь теплообміну узагальнюючих критеріальних рівнянь, що визначають числа Нуссельта та Ейлера при ламінарній течії теплоносія; - отриманням за допомогою чисельного експерименту порівняльних даних з теплогідрравлічних характеристик пластинчасто-ребристих поверхонь з симетричним і несиметричним розміщенням каналів; - результатами узагальнення даних фізичних експериментів /власних та інших авторів/ щодо визначення теплогідрравлічних характеристик циліндричних каналів зі штучною шерсткістю у вигляді поперечних кільцевих ребер.

Вірогідність результатів і обґрунтованість висновків зумовлені адекватним щодо явищ, які розглядаються, вибором математичних моделей, задовільним погодженням результатів розрахункового експерименту з фізичними експериментами.

Апробація роботи. Основні розділи роботи доповідались - на 2-й Всесоюзній науковій конференції "Проблеми енергетики та технології" /1987 р., Москва/; - на республіканських науково-технічних конференціях "Математичне моделювання процесів і конструкцій енергетичних і транспортних турбінних установок в системах їх автоматизованого проектування/1988, 1991 р.р., Зміїв/; - на семінарі /шифр ЗЭО-22/ "Моделювання та удосконалення технологічних процесів в теплоенергетиці" /1990 р., Київ/.

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи викладено в шести статтях.

Обсяг і структура роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 5 розділів і висновку, списку літературних джерел із III найменувань.

Робота виконана на 172 сторінках машинописного тексту, містить 64 рисунки, 7 таблиць, усього 241 сторінки.

ЗМІСТ РОБОТИ

Перший розділ присвячено огляду літературних джерел за темою роботи, а також постановці задачі. Детально розглянуто теплогідравлічні характеристики каналів різного типу і розрахункові методи їх визначення. Грунтуючись на аналізі опублікованих праць робиться висновок про доцільність при визначенні теплогідравлічних характеристик поряд з дослідними методами використовувати чисельний експеримент.

У другому розділі приведено огляд чисельних методів визначення поля тиску під час течії в'язкої рідини в каналах. Для визначення поля тиску немає явного рівняння, тому спосіб його визначення не є очевидним.

У роботі розглянуто різні методи визначення поля тиску. Описано два методи визначення поля тиску при розв'язанні повних рівнянь Нав'є-Стокса: переходом від рівнянь у фізичних змінних до рівнянь для функції течії і завихреності та метод контрольного об'єму. Приведено методи визначення двовимірних полів тиску, грунтуючись на частково параболізованих рівняннях Нав'є-Стокса, запропоновані Касалом і Сагелі, Проталом і Сполдінгом, Чилікурі і Плетчером. Описано також ряд методів розв'язку частково параболізованих рівнянь при визначенні

одновимірного розподілу тиску, які ґрунтуються на припущенні, що позовжня швидкість в і-му перерізі каналу є пропорціональною до градієнта в цьому перерізі: $u_i = \alpha_i + \beta_i \left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)_i$. Відповідний алгоритм визначення одновимірного поля тиску використано в роботі при чисельному дослідженні теплогідравлічних характеристик пластинчасто-ребристих поверхонь. Припускаючи, що і поперечна швидкість є пропорціональною до поперечного градієнта тиску $v_i = \alpha_i + \beta_i \left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)_i$ розглянуто рішення параболізованої системи рівнянь маршовим методом. Порівняння чисельного розв'язку з дослідними даними Ванга та Лонгвела для каналу постійного перерізу дало задовільні результати. Із отриманого розв'язку випливає, що в "подовжених" областях поперечним градієнтом тиску можна знехтувати.

У третьому розділі приведено дані узагальнення відомих окремих дослідних залежностей для чисел Нуссельта та Ейлера. Розглянуто три типи пластинчасто-ребристих поверхонь теплообміну: з довгими ребрами, короткими уриваними ребрами та з шаховим розміщенням коротких ребер. Для цих трьох типів поверхонь проведено узагальнення 27 окремих критеріальних залежностей вигляду $Nu = A Re^m Pr^{1/3}$, $Eu = B Re^{-n}$, одержаних для матриць, що відрізняються кроками між ребрами, довжиною ребер, відстанню між пластинами. Спочатку досліди були опрацьовані у вигляді $Nu = f\left(Re \frac{d_{\text{эк}}}{l}\right)^{1/3}$, як це заведено у теоретичних дослідженнях для стабілізованої течії. Для $Re \frac{d_{\text{эк}}}{l} < 7$ отримано $Nu = 2,7 = \text{const}$, що збігається з відомими даними. Однак при $Re \frac{d_{\text{эк}}}{l} > 7$ спостерігався помітний розкид чисел Nu /при $Re \frac{d_{\text{эк}}}{l} > 60$ до 40%/. Тому було використано безрозмірний аргумент $Re \left(\frac{d_{\text{эк}}}{l}\right)^{1/3}$, який використовувався в роботах ЦКТИ /Мигай/ для неусталених течій. Введення цього аргументу дозволило апроксимувати дослідні дані для пластинчасто-ребристої матриці з відносно довгими каналами $\frac{l}{d_{\text{эк}}}$ від 10 до 70 з похибкою, що не перевищує 13%. При узагальненні її окремих рівнянь одержано $Pr = 1$

$$Nu = 0,25 \left[Re \left(\frac{d_{\text{эк}}}{l} \right)^{1/3} \right]^{0,5}, \quad 100 < Re \left(\frac{d_{\text{эк}}}{l} \right)^{1/3} < 650 \quad /1/$$

Для поверхонь теплообміну з короткими уриваними каналами $l/d_{\text{эк}} = 1,2 \dots 2,1$ і поверхонь з шаховим розміщенням ребер $l/d_{\text{эк}} = 1,34 \dots 2,1$ знайдено відповідно $Pr = 1$

$$Nu = 0,20 \left[Re \left(\frac{d_{\text{эк}}}{l} \right)^{1/3} \right]^{0,6}, \quad 200 < Re \left(\frac{d_{\text{эк}}}{l} \right)^{1/3} < 1400 \quad /2/$$

$$Nu = 0,22 \left[Re \left(\frac{d_{жк}}{l} \right)^{1/3} \right]^{0,6}, \quad 200 < Re \left(\frac{d_{жк}}{l} \right)^{1/3} < 1500 \quad /3/$$

Формула /2/ узагальнює 10 окремих залежностей з похибкою 12%, формула /3/ - 6 залежностей з похибкою 11%. Введення додаткового аргументу дозволило усереднити окремі залежності з прийнятною точністю та одержати узагальнюючі формули. Порівняння цих формул показує, що, наприклад, при $Re \left(\frac{d_{жк}}{l} \right)^{1/3} = 500$ числа Nu для поверхонь з уриваними каналами та поверхонь з шаховим розміщенням ребер вищі значень Nu за формулою /1/ /суцільні довгі ребра/ відповідно на 49% та 60%. Це підвищення ефективності теплообміну - наслідок стоншення пограничного шару на обновлюваній уриваній поверхні теплообміну та турбулізації потоку, що також викликано послідовним розміщенням каналів. У випадку шахового розміщення ребер посилюється також перемішування потоку.

При узагальненні дослідних даних з гідравлічного опору як додатковий аргумент використовувалось співвідношення площі поверхні тертя $F_{тр} = \zeta l$ до площі поперечного перерізу каналу F . Такий симплекс був з успіхом використаний у роботі Чирандживі при узагальненні дослідних даних каналів різної форми /трапецієподібних, прямокутних та ін./ Окремі критеріальні залежності узагальнені формулами:

$$\zeta (F_{тр}/F)^{0,63} = 92,3 Re^{-0,7}, \quad /4/$$

у випадку коротких уриваних каналів

$$\zeta (F_{тр}/F)^{0,63} = 60,2 Re^{-0,65}, \quad /5/$$

для довгих каналів

$$\zeta (F_{тр}/F)^{0,16} = 41,3 Re^{-0,18} \quad /6/$$

Формула /4/ узагальнює 7 окремих залежностей з похибкою 10%, формула /5/ - 10 залежностей з похибкою 11%, формула /6/ - 10 залежностей з похибкою 20%. При $Re = 800$ коефіцієнт гідравлічного опору каналів з шаховим розміщенням ребер на 7% вище коефіцієнта опору уриваних каналів, що привисує коефіцієнт опору каналів з гладкими ребрами приблизно у 1,5 рази. Порівняння трьох типів поверхонь за допомогою фактора аналогії Рейнольдса показує разом з тим, що найменш ефективною є поверхня з довгими ребрами.

Первісні дослідні дані Жукаускаса та Жюгжди з гідравлічного опору каналу між паралельними пластинами були опрацьовані за допомогою двох методів: з використанням аргумента $\frac{F_{тр}}{F}$ і, як рекомендують автори - $l/(d_{зк} Re)$. У першому випадку похибка апроксимації виявилась рівною $\pm 14,9\%$, у другому - $\pm 23\%$. Це порівняння дозволяє зробити попередній висновок щодо переваги обробки дослідних даних з гідравлічного опору теплообмінників із застосуванням параметра $F_{тр}/F$.

У четвертому розділі приведено результати чисельного експерименту по визначенню теплогідравлічних характеристик пластинчасто-ребристих поверхонь з шаховим симетричним і несиметричним розміщенням ребер. Для пластинчасто-ребристих матриць є характерні малі розміри переднього перерізу каналів, коло декількох міліметрів. Тому чисельні дослідження течії проведено для ламінарного режиму. Гідродинамічна і теплова задачі формулювались в параболізованій постановці. Вихідна система диференціальних рівнянь містила рівняння руху, суцільності та енергії. Диференціальні рівняння апроксумувались кінцевими різницями за неявною схемою. Система різницевих рівнянь розв'язувалась методом прогонки. Розподіл тиску в напрямі течії визначався за допомогою інтегрального рівняння зберігання маси.

Як тестову розглянуто задачу про течію в необмеженому плоскому каналі. Встановлено, що максимальні значення швидкості на осі каналу, що дорівнюють 1,5 від середньої швидкості, досягаються на відносній відстані $x/(H Re) = 0,05$, що збігається з відомими теоретичними даними відносно довжини ділянки стабілізації. Профіль швидкості стабілізованої течії збігається з теоретичним параболічним. Безрозмірний градієнт тиску стабілізованої течії також збігається з теоретичним $\frac{\partial p}{\partial x} = 12$. Розподіл чисел Nu порівнювався з дослідними даними Мигая. Розбіг для середнього значення Nu становить 4%. Таким чином, прийнята математична модель у вигляді параболізованих рівнянь та їх кінцево-різницево подання забезпечує необхідну точність розрахунку теплогідравлічних характеристик.

Чисельний експеримент при визначенні теплогідравлічних характеристик пластинчасто-ребристих поверхонь з шаховим роз-

міщенням ребер проведено у широкому діапазоні зміни геометричних і режимних параметрів: ширина каналів H змінювалась від 3 до 10 мм, довжина ребер S від 12 до 45 мм, числа Re - від 150 до 1000, число Pr приймалось рівним 1, 10 і 100. Усього проведено 80 чисельних експериментів. У розрахунках визначалися профілі поздовжньої та поперечної швидкостей, профілі температури, числа Нуссельта, градієнт тиску і коефіцієнт опору.

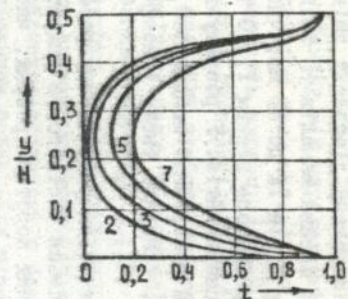
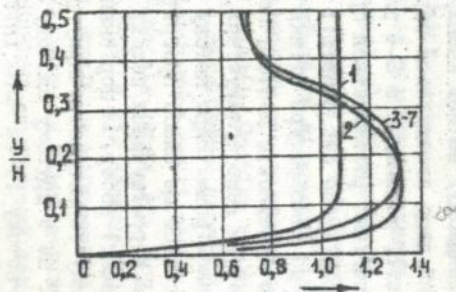
У звичайних матрицях з шаховим розміщенням ребер інтенсифікація теплообміну відбувається частково за рахунок оновлення примежового шару на уриваних коротких ребрах, частково за рахунок більшого перемішування потоку та вирівнювання його температури. Запропонована нами модернізована матриця зі зміщенням кожного ряду ребер по відношенню до попереднього на $1/4$ кроку між ребрами передбачає посилення перемішування потоку. Розрахунки показали на достатньо високу ефективність цього простого конструктивного розв'язку.

При шахову симетричному розміщенні ребер розподіл швидкості у поперечному перерізі каналів істотно відрізняється від профілю швидкості в щілині. Завдяки зміщенню ребер на половину ширини каналу в епюрі швидкості на осі каналу виникає провал /рисунок, поз.а/, який дещо зглажується перед вихідним перерізом. Профіль швидкості, починаючи з 3-4 ряду ребер, практично стабілізується. Аналогічно розвивається профіль температури. Поблизу вхідного перерізу по осі симетрії каналу температура потоку зростає майже до температури стінки за рахунок впливу попереднього ряду ребер /рисунок, поз.б/. Перед вихідним перерізом розподіл температури дещо зглажується, залишаючись в цілому достатньо нерівномірним. Ядро потоку поза його центральною частиною залишається все ще слабо прогрітим.

Більш сприятливі умови для перемішування потоку створюються при несиметричному розташуванні ребер. Із порівняння розподілу температур при симетричному та несиметричному розміщенні ребер видно /рисунок, поз.б/, що в другому випадку досягається більший прогрів усього ядра потоку із-за його інтенсивного перемішування /рисунок а, б/. Це зумовлює і більш високу інтенсивність теплообміну в каналах, що несиметрично розміщуються. При $H/S = 0,07 \dots 0,25$ число Nu при несиметрично

Розподіл поздовжньої швидкості u і температури t по ширині каналів на вході в i -ті ряди ребер /цифри на кривих - номера рядів ребер/

$H = 5$ мм, $S = 20$ мм, $Re_H = 500$



а

Рисунок

розміщених каналах приблизно на 50% вище, ніж при симетричному розміщенні. Аналіз показує, що ріст інтенсивності теплообміну для даного типу матриць зумовлюється значенням узагальнюючого параметра $\frac{S}{HRe}$.

Із зростанням цього параметра інтенсивність теплообміну зменшується. При однакових значеннях цього параметра число Нуссельта у матрицях з несиметричними каналами в 1,25 - 1,6 рази більше.

Гідрравлічний опір при несиметричному розміщенні ребер може бути і вищим /при $\frac{S}{HRe} < 0,01$ / і нижчим /при $\frac{S}{HRe} > 0,01$ / порівняно з симетричним розміщенням. Зростання кількості теплоти, яка відводиться, зумовленої значенням середньомасової температури на виході із матриці при несиметричному розміщенні ребер і величина параметра $\frac{S}{HRe} < 0,008$ супроводжується також зростанням гідрравлічного опору. Однак зростання теплозйому опередує збільшення опору.

У п'ятому розділі викладені результати експериментального дослідження теплообміну в каналі круглого перерізу зі штучною шорсткістю.

Для теплообмінників, у яких поверхня теплообміну обтікається з періодичними відривами, розрахункове визначення теплогідрравлічних характеристик ускладнено. Недостатня досконалість розрахункових методів примушує визначати теплогідрравлічні характеристики переважно дослідним шляхом.

У роботі експериментально досліджено канал зі штучною шорсткістю у вигляді виступів-турбулізаторів, які є ефективним засобом інтенсифікації теплообміну. Утворення вихрових зон за виступами сприяє генерації турбулентних пульсацій в потоці, що супроводжується підсиленням теплопереносу. Періодичний відрив, предання і подальший розвиток примежового шару інтенсифікує теплообмін в результаті впливу двох факторів. По-перше, внаслідок періодичного оновлення примежового шару відбувається його стоншення, по-друге, у зв'язку з тим, що в області приєднання потоку теплообмін відрізняється високою інтенсивністю із-за його/тобто приєднання/ нестационарності. Відомо, що переріз приєднання примежового шару безперервно переміщується в деякій області, що зумовлює для цієї області в середньому більш тонкий ламінарний

підшар і більш високу теплопровідність.

Мірна ділянка каналу виконана із тонкостінної / $\delta = 0,3 \text{ мм}$ / труби довжиною 500 мм з внутрішнім діаметром 60 мм. Труба нагрівалась електричним струмом. Температура стінки вимірювалась 50 термомпарами. Температура повітря на вході вимірювалась ртутним термометром з ціною поділу $0,02^\circ\text{C}$; на виході - 10 термомпарами встановленими по радіусу нерівномірно. Шорсткість труби здійснювалась за допомогою кілець із сталюого дроту діаметром 1,8 мм та 3,0 мм.

Відносна шорсткість $\frac{h}{d}$ 0,03 та 0,05 прийнята в області II оптимальних значень. Кроки установаження турбулізаторів t , прийняти рівними 62,5, 83 та 125 мм, відповідно відносні значення кроків $\frac{t}{h}$ при $\frac{h}{d} = 0,03$ становили 34,7, 46,1 та 69,4 при $\frac{h}{d} = 0,05$ - 20,8, 27,7 та 41,7. Таким чином, досліди проведено з шістьма варіантами мірної ділянки.

На відміну від відомих робіт, у яких досліджувались канали з аналогічною шорсткістю та схожими її геометричними параметрами при стабілізованому та або турбулентному режимі течії / $Re > 10^4$ /, або ламінарному режимі / $Re < 2 \cdot 10^3$ / у випадку, що розглядається, дослідні дані отримані, по-перше, для коротких каналів з $\frac{l}{d} = 8,33$, тобто на нестабілізованій ділянці течії, по-друге, при числах Re в діапазоні $3,5 \cdot 10^3 \dots 10^4$, що визначає перехідний режим течії. Ця область чисел Re за літературними даними є найбільш сприятливою з точки зору співвідношення між інтенсивністю теплообміну та величиною гідравлічного опору. Шість серій дослідів, у яких варіювались лише числа Re , узагальнені критеріальною залежністю:

$$Nu = \left(0,00795 + 0,155 \frac{h}{d} \right) Re^{1,03} \left(\frac{t}{h} \right)^{-0,22} \quad / 7 /$$

Прийнята в II/ лінійна залежність від $\frac{h}{d}$ підтверджується відомими дослідними даними. Грунтуючись на проведених дослідях при $\frac{l}{d} = 8,33$, а також дослідях Мигая при $\frac{l}{d} = 43$ та $\frac{l}{d} = 50$, встановлено залежність Nu від відносної довжини каналу. В результаті критеріальні рівняння одержано у вигляді

$$Nu = \left(0,0442 + 0,218 \frac{h}{d} \right) Re^{1,03} \left(\frac{t}{h} \right)^{-0,22} \left(\frac{l}{d} \right)^{-0,16} \quad / 8 /$$

При середніх значеннях параметрів у проведеному дослідженні інтенсивність теплообміну в каналі з турбулізацією пристінного шару на 40% вище, ніж у гладкому каналі.

Гідрравлічний опір каналу з кільцевою шорсткістю досліджувався на модельній ділянці при $l/d = 25$ і тих же значеннях h/d , t/h , що при вивченні теплообміну. Одержані в шести серіях дослідів дані разом з дослідними даними Мигая узагальнені критеріальним рівнянням

$$\zeta = 4,49 \cdot 10^{-5} \left(\frac{h}{d} \right)^{0,11} (h/d) + 2,032 \left(\frac{t}{h} \right)^{0,0059} (t/h) - 1,49 \left(\frac{l}{d} \right)^{-0,05} / 9 /$$

/від числа Re коефіцієнт опору шорсткої труби не залежить/.
Погодження розрахункових залежностей з окремими дослідними даними інших дослідників /Жоха, Калініна, Дрейцера, Ярхо, Мигая/ задовільне, що дозволяє рекомендувати отримані інтерполяційні критеріальні рівняння для прогнозування теплогідрравлічних характеристик компактних теплообмінників з турбулізацією течії в круглих каналах зі штучною кільцевою шорсткістю.

Висновки:

1. Проведено узагальнення окремих залежностей для теплогідрравлічних характеристик трьох типів пластинчасто-ребристих поверхонь з довгими ребрами, з короткими уриваними ребрами і з короткими ребрами при шаховому їх розміщенні. Узагальнення окремих залежностей по теплообміну здійснено за допомогою параметра $Re(d_{\text{ж}}/l)^{1/3}$; окремі залежності по гідрравлічному опору узагальнені на основі параметра $F_{\text{тр}}/F$; отримані шість критеріальних рівнянь узагальнюють коло 60 окремих виразів.

2. Грунтуючись на узагальнюючих критеріальних рівняннях для чисел Nu пластинчасто-ребристих поверхонь теплообміну отримано, що, наприклад, при середньому значенні $Re = 500$ числа Nu для поверхонь з уриваними каналами та поверхонь з шаховим розташуванням ребер вище значень Nu для поверхонь з довгими ребрами відповідно на 49% і 60%.

3. Для трьох розглянутих матриць пластинчасто-ребристих поверхонь фактори аналогії Рейнольдса нижчі, ніж для трубчастих поверхонь:

у випадку шахового розташування ребер $\alpha_n = 7,05$, у випадку коротких ребер $\alpha_n = 7,07$, для довгих ребер $\alpha_n = 8,58$; трубчаста поверхня теплообміну має $\alpha_n = 8,82$ /розрахунки виконані

при $Re = 800$, $\frac{l}{d_{\text{м}}} = 3/$. Із наведених даних випливає, що аналогія Рейнольдса порушується в сприятливу для пластинчато-ребристих поверхонь сторону підсилення інтенсивності теплообміну по відношенню до переносу кількості руху.

4. Для найбільш ефективної пластинчато-ребристої поверхні в шаховим розміщенням ребер проведено чисельний експеримент при симетричному та несиметричному розміщенні ребер. Встановлено, що за рахунок зміщення ребер від одного, ряду до іншого розсікання потоку відбувається щоразу у новому місці, що істотно поліпшує його переміщування та сприяє інтенсифікації теплообміну. При зміні параметра $\frac{s}{HRe}$ у межах від 0,004 до 0,03 числа Nu для модифікованої матриці з несиметричним розміщенням ребер зростає порівняно з варіантом симетричного розміщення від 25 до 62%.

5. Показано, що середньомасова температура на виході із матриці /розрахунки виконані для семи рядів ребер/ при несиметричному розміщенні ребер помітно вища, ніж при симетричному /при $\frac{s}{HRe} = 0,004$ в 1,68 рази/. Це означає, що і кількість переданої теплоти також буде відповідно більшою, при цьому, однак, гідравлічний опір зростає повільніше /при $\frac{s}{HRe} = 0,004$ в 1,21 рази/. При великих значеннях параметра $\frac{s}{HRe}$ /до 0,03/ середньомасова температура у випадку несиметричного варіанта зростає незначно /приблизно на 4 %/, однак гідравлічний опір стає менше гідравлічного опору симетричного варіанта на 20 %.

6. Встановлено, що при порівнянні матриць лише з несиметричним розміщенням ребер більш ефективними стають матриці з великим значенням параметра $\frac{s}{HRe}$, наприклад, при збільшенні $\frac{s}{HRe}$ від 0,004 до 0,03 число Нуссельта зменшується на 7 %, але при цьому гідравлічний опір падає в 2,5 рази, а середньомасова температура збільшується в 1,5 рази.

7. Проведено експериментальне дослідження теплогідравлічних характеристик круглих каналів зі штучною кільцевою шерсткістю в області перехідного режиму течії / $Re = 3,5 \cdot 10^3 \dots 10^4$ /. Отримано критеріальне рівняння, що встановлює залежність числа Nu від чотирьох незалежних змінних: числа Re , відносної шерсткості $\frac{h}{d}$, відносного кроку $\frac{l}{h}$ і відносної довжини каналу $\frac{l}{d}$. При середніх значеннях $Re = 7 \cdot 10^3$, $\frac{h}{d} = 0,04$; $\frac{l}{h} = 45$ і $\frac{l}{d} = 8,3$ число Nu для каналу з турбуліза-

торами на 40% вище числа Nu гладкої труби. Отримано також критеріальну залежність коефіцієнта опору від трьох безрозмірних аргументів $\frac{h}{d}$, $\frac{t}{h}$, $\frac{t}{d}$. Для визначення оптимальних геометричних параметрів каналів зі штучною шерсткістю /турбулізаторами/ проведено порівняльні розрахунки, в яких визначались $\frac{f}{f_0}$, $\frac{Nu}{Nu_0}$, $\frac{Nu}{Nu_0} / \frac{f}{f_0}$, $\frac{\Delta P}{\Delta P_0}$, $\frac{Q}{Q_0}$, $\frac{V}{V_0}$ / V - об'єм теплообмінника, нулем позначені параметри гладкої труби/ з використанням дослідних даних Коха, Калініна, Дрейцера та Ярхо, Мигая.

Основний зміст дисертації опубліковано у таких працях:

1. Савченко Н.М., Капинос І.В., Шевелєв А.А., Волков Б.И., Павловский В.Г., Ганжа Н.Г. Теплообмен в коротком канале круглого сечения с турбулизацией пограничного слоя //Энерг. машиностроение.-1988.Вып.45.-С.61-67.
2. Капинос І.В., Савченко Н.М., Шевелєв А.А., Кошман Г.В., Павловский В.Г. Гидродинамика и теплообмен развивающегося ламинарного течения в плоском канале//Энерг. машиностроение.-1989.-Вып.47.-С.61-65.
3. Савченко Н.М., Капинос І.В., Шевелєв А.А. Теплогидравлические характеристики каналов с турбулизацией пристенной области течения //Энерг. машиностроение.-1992.-Вып.52.-С.31-37.
4. Капинос І.В., Шевелєв А.А. Обобщающие зависимости для теплогидравлических характеристик пластинчато-ребристых поверхностей теплообменников//Энерг. машиностроение.-1992.-Вып.52.-С.49-56.
5. Капинос І.В. Теплообмен в канале с искусственной шероховатостью при переходном режиме течения //Энерг. машиностроение.-1992.-Вып.52.-С.89-91.
6. Аль Юсеф Исса, Капинос І.В., Шевелєв А.А. Математическое моделирование теплообмена в плоскопараллельных каналах с нанесенными пластинами // Математическое моделирование и вычислительный эксперимент для совершенствования энергетических и транспортных турбоустановок в процессе исследования, проектирования, диагностирования и безопасного функционирования: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф., Змиев, 18-20 сент. 1991г., Харьков: Ин-т проблем машиностроения АН Украины, 1991.-Ч.1.-С.14.

АВ 29.357

Відповідальний за випуск Олімпів Є.М.

Підписано до друку 20194 Папір друк. №1
Зам. № 1896 Формат 60 90 1/16 Тираж 100 прим.

Ум. друк. арк. 1.0. Обл.-вид. арк. 0.96

Виготовлено на ротаринті Інституту проблем
машинобудування АН України, 310046, Харків-46,
вул. Дм. Пожарського, 2/10.