КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ

На правах рукопису

РОГАЧОВ ВАЛЕРІЙ АНДРІЙОВИЧ

УДК 536.242:532.542

ТЕПЛООБМІН НА ВХІДНІЙ ДІЛЯНЦІ ТРУБИ ПРИ ТЕЧІЇ З ВІДРИВОМ

Спеціальність 05.14.05 – Теоретичні основи теплотехніки

А в т о р е ф е р а т

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 1993

№ 27.463

Робота виконана на кафедрі атомних електростанцій та інженерної теплофізики Київського політехнічного інституту

ЛНБ України ім.В.Стефаника
00814329 (R)

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент Легкий В.М.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Дикий М.О.

кандидат технічних наук, ст.наук.співроб.Макаров А.С.

Провідна установа: Інститут технічної теплофізики АН України

Захист відбудеться "28" червня 1993 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 068.14.07 у Київському політехнічному інституті за адресою:
252056, м.Київ-56, пр-т Перемоги,37, КПІ-ІІІ.

Автореферат розісланий "20" травня 1993 р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради В.П.Рожалін

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

АНОТАЦІЯ

У дисертаційній роботі проведені експериментальні дослідження теплообміну і течії в умовах відриву потоку повітря на початковій ділянці труби з гострим вхідним краєм ($R/d=0$) та краєм, профільованим відносним радіусом кола $R/d=0,4$, в межах чисел Рейнольдса $Re_d=(10-110)\cdot10^3$ і приведених довжин $x/d=0,1-13$.

Метою роботи є створення фізично обґрунтованих моделей відривних течій на початкових ділянках гладких труб з гострим і профільованим вхідними краями, розкриття специфічної для внутрішньої задачі закономірності переходу від ламінарної до турбулентної течії в сумішному шарі при відривних і передвідривних режимах теплообміну, розробка на основі експериментальних даних розрахункових залежностей для визначення інтенсивності локальної тепловіддачі в умовах відривної течії.

Для досягнення поставленої мети:

- спроектовані і створені вхідні ділянки для дослідження течії та локального теплообміну в області відриву;
- досліджений механізм відривної течії на початковій ділянці круглої труби;
- розроблені фізичні моделі відривних течій;
- досліджені закономірності теплообміну у відривній області і встановлений їх зв'язок з моделями течії;
- розроблена інженерна методика розрахунку локального теплообміну на початковій ділянці в умовах відривної течії.

Автор захищає такі основні положення: фізичні моделі відривних течій на вхідних ділянках труб з гострим краєм $R/d=0$ та краєм, профільованим радіусом кола $R/d=0,4$; результати досліджень просторових полів статичного тиску на вхідних ділянках труб в умовах відриву потоку; результати дослідження локального теплообміну на початкових ділянках труб при відривній течії та одержаних на його основі узагальнюючих співвідношень для розрахунку локальних коефіцієнтів тепловіддачі у межах $Re_d=(10-110)\cdot10^3$ і $x/d=0,1-13$.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Відрив потоку від поверхні, яка омивається рідиною або газом, широко розповсюджене, хоча і

недостатньо вивчене явище в технічних пристроях. До них належать гідравлічні та турбомашини, транспортні трубопроводи, апарати авіаційної та ракетної техніки, промислові та енергетичні теплообмінники. Вивчення відривних явищ через їх різноманітність і складність в основному йде шляхом експериментальних досліджень і в цілому знаходиться у стадії інтенсивного накопичення первинної інформації про природу та закономірності відриву у різних його проявах. Практично усі автори, надрукованих в останні роки з цієї проблеми робіт, відзначають необхідність суттєвого розширення досліджень теплообмінних процесів при відривній течії. Відрив приводить до інтенсифікації теплообміну потоку з поверхнею, що омивається і ця обставина може бути корисною, зокрема, у високоефективних теплообмінних апаратах. В умовах внутрішньої задачі такі дослідження особливо актуальні, але їм і сьогодні ще не приділяється достатньої уваги. Доцільність вивчення процесів теплообміну при відривних режимах течії для внутрішньої задачі підтверджується результатами ряду робіт, виконаних з 1970 року на кафедрі атомних електростанцій та інженерної теплофізики Київського політехнічного інституту і присвячених аналізу процесів течії, локального теплообміну у трубах і каналах малої приведеної довжини, які мають різні конфігурації вхідних країв.

Методи досліджень. Вивчення течії в області відриву проводилось методом поверхневої візуалізації. В ролі візуалізуючої сполуки використовувалась суміш сажі з гасом. Структура просторового поля статичних тисків досліджена за допомогою дренажування поверхні вхідної ділянки отворами і зондом тиску. Для вимірювання інтенсивності локального теплообміну в межах x/d =0,4--13 використовувався калориметр з вбудованими датчиками Геращенка О.О. Для вхідної ділянки з краєм R/d =0 в інтервалі приведених довжин x/d =0,1-0,9 інтенсивність локального теплообміну визначалась методом товстої стінки. Розв'язання зворотної задачі теплопровідності здійснювалось методом проб.

Наукова новизна. Розроблені фізичні моделі відривних течій і обґрунтовані причини інтенсифікації теплообміну в області відриву. Одержані нові дані про розподіл інтенсивності тепловіддачі на вхідній ділянці труби з краєм R/d = 0 при x/d =0,1-13. На ділянці з вхідним краєм R/d =0,4 встановлено, що трансформування режиму течії із безвідривної у відривну настає

при числі $Re_d \approx 43 \cdot 10^3$. Відмічена нестійкість перехідного процесу для $Re_d \approx 49 \cdot 10^3$, яка впливає на характер розподілу коефіцієнтів теплообміну після ламінарної області та розміщення критичних координат. Одержані залежності для розрахунку локальної інтенсивності тепловіддачі на початкових ділянках в областях з ламінарним та турбулентним пограничним шаром, у тому числі і в перерізах, де вона набуває екстремальних значень.

Практична цінність результатів роботи. Одержані залежності для розрахунку локального теплообміну на початковій ділянці труби при відривній течії знайдуть застосування у проектуванні і створенні високоефективних компактних теплообмінників. Експериментальні дані по теплообміну і течії є також основою для розрахунку інших теплообмінних пристроїв, в яких мають місце відривні явища.

Реалізація роботи. Результати досліджень використані у звіті по НДР "Розробка, дослідження та впровадження експериментальних матеріалів з конвективного теплообміну і аеродинамічного опору у поперечно-реберних поверхнях нагрівання котлів-утилізаторів ПГУ", що виконаний на основі договору з НВО по дослідженню і проектуванню енергетичного устаткування ім.І.І.Ползунова (ЦКТІ, м.Ленінград).

Апробація роботи. Головні положення і результати дисертаційної роботи доповідались: на наукових семінарах кафедри атомних електростанцій та інженерної теплофізики КПІ; наукових конференціях професорсько-викладацького складу Київського політехнічного інституту (1988, 1990рр.); Всесоюзній конференції молодих дослідників у інституті технічної теплофізики АНУ (м.Київ, 1982р.); Всесоюзному семінарі "Відривні та струмові течії" (м.Новосибірськ, 1988р.); 8-й Всесоюзній конференції "Двухфазний потік в енергетичних машинах та апаратах" (м.Ленінград, 1990р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано три друковані праці.

Структура і об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури із 78 назв і додатків. Робота викладена на

162 сторінках машинописного тексту і має 6 таблиць, 63 малюнка та 20 фотографій.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульована мета дослідження, приведена стисла анотація результатів роботи.

У першому розділі виконаний огляд літературних даних по результатам дослідження течії і теплообміну в зоні відриву на вхідних ділянках каналів та труб з докладним аналізом окремих робіт і методів досліджень.

У другому розділі міститься опис експериментального стенду і конструкції рабочих ділянок. Розглядаються методи досліджень течії і локального теплообміну. Зроблена оцінка похибок вимірювань.

У третьому розділі подано результати експериментальних досліджень течії на вхідних ділянках з краями $R/d = 0$ та $R/d = 0{,}4$. Наведені дані про просторові поля статичного тиску. На базі аналізу і узагальнення дослідних даних розроблені фізичні моделі відривної течії. Запропоновані емпіричні залежності для розрахунку основних геометричних параметрів відривної області.

У четвертому розділі містяться результати експериментальних досліджень по локальному теплообміну вхідних ділянок. Одержані співвідношення для розрахунку локальних коефіцієнтів теплообміну у зонах з ламінарним і турбулентним пограничним шаром. Наведені аналітичні і графічні залежності для визначення координат екстремумів тепловіддачі.

У додатках показані: таблиці експериментальних і розрахункових даних, а також лістинги програми для визначення інтенсивності тепловіддачі методом товстої стінки, таблиці значень похибок вимірювань, фотографії, які одержані за результатами досліджень методом поверхневої візуалізації.

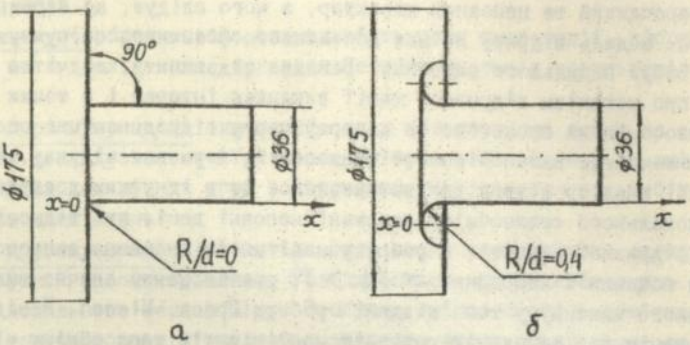
ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Аналіз літературних джерел показав, що на цей час загальноприйнята модель відриву, що відбувається на вхідній ділянці труби, яка має гострий передній край, передбачає приєднання пограничного шару і наявність замкнутої циркуляційної області або "мертвої" зони, яка відокремлюється від основного потоку пограничним шаром, що відірвався. До небагаточисельних досліджень, які підтверджують деякі структурні елементи зазначеної моделі, можна віднести роботи Ідельчика І.Є., де наведені профілі тиску та швидкості, і робо-

ти Спероу, де вдалося одержати візуалізаційні картини течії у відривній області. Одначе, існуючий експериментальний матеріал носить суперечливий та неповний характер, з чого слідує, що загальноприйнята модель відриву не має достатнього фізичного обґрунтування і потребує подальшого вивчення. Важливо відзначити, що чітке уявлення про механізм відривної течії викликає інтерес і в точки зору теплообмінних процесів, бо в першу чергу гідродинамічні особливості визначають закономірності теплообміну в умовах відриву. На підставі аналізу літератури встановлено, що в існуючих дослідженнях з локального теплообміну одержані неповні дані, які відносяться до відривної області, а розрахункові співвідношення запропоновані для подовжніх координат $x/d > I$, розташованих значно нижче відривного максимуму тепловіддачі (роботи Граса, Мілза). Невідома інформація про подовжній розподіл коефіцієнтів теплообміну від максимуму до гострого краю. Відсутня необхідна кореляція теплообмінних даних з існуючою моделлю течії, не розкритий механізм процесу теплообміну при відриві. Слід відмітити, що розглянуте відривне явище можна віднести не тільки до випадку, коли вхідний край початкової ділянки має гострий профіль, а може існувати і при деформації форми краю у бік плавних обрисів. Це підтверджується ранніми роботами кафедри атомних електростанцій та інженерної теплофізики Київського політехнічного інституту, в яких досліджувався локальний теплообмін на початкових ділянках каналів, труб з вхідними краями, профільованих радіусом кола у межах R/d = 0,I - I,5 (дослідження Макарова А.С., Бурдея В.Д.). У зазначеному ряду вхідних конфігурацій вхід з краєм R/d =0,4 займає особливе місце, оскільки тут в залежності від чисел Re_d спостерігаються ознаки режимів теплообміну, що характерні як для відривної, так і безвідривної течії.

Таким чином, огляд літератури дозволив встановити відсутність фізично обґрунтованих моделей течії та розрахункових співвідношень для визначення локальної інтенсивності тепловіддачі в області відриву на вхідних ділянках з краями R/d =0 і R/d = =0,4.

Основні геометричні розміри досліджених вхідних конфігурацій приведені на мал.I. У процесі експериментів вхідні ділянки приєднувалися до проточної частини стенду, який являє собою дозвукову аеродинамічну трубу, що працює по відкритій схемі. У ролі робочого середовища використовувалось повітря, яке надходило з лабораторного приміщення, при цьому початкова ступінь турбулентно-



Мал.I. Схеми досліджених ділянок: а - вхід з гострим краєм та кутом 90°; б - вхід з краєм, профільованим радіусом кола $R/d=0,4$

ст складала не вище 0,3%. Труба з внутрішнім діаметром 36мм і довжиною 2000мм компонувалась з дослідних ділянок, що незалежно обігрівались киплячою водою. Це забезпечувало постійну температуру стінки. Труба через витратомірний блок за допомогою м'якого перехідника приєднувалась до вентилятора.

Для визначення локальних коефіцієнтів теплообміну на початкових ділянках з вхідними краями $R/d=0$ та $R/d=0,4$ у межах $x/d=0,4-13$ використовувався калориметр з вбудованими на його внутрішній поверхні сьомома датчиками теплового потоку. Їх осьові координати варіювались за рахунок обігрівальних вставок або дослідних ділянок, що розміщувались між вхідним пристроєм та калориметром. Через оболонку калориметра і кільцеву камеру вхідного пристрою мікронасосом перекачується вода, що кипить в порожнині кожуха дослідної ділянки.

Інтенсивність тепловіддачі на вхідній ділянці з краєм $R/d=0$ в інтервалі приведених довжин $x/d=0,1-0,9$ вимірювалась за допомогою калориметра, де використовувався метод товстої стінки. Він був виконаний з електротехнічного компаунду УП-592-II, його внутрішній та зовнішній діаметри відповідно дорівнювали 36мм і 50 мм. Температури на поверхнях калориметру у продольному та радіальному напрямках вимірювались двадцятьма шістьома мідь-константановими термопарами з проводами Ø 0,1 мм. Теплопідвід забезпечувався за

рахунок нікромового електронагрівача, який був намотаний на зовнішню поверхню калориметра і складався з трьох автономних секцій, що живились від джерел постійного струму.

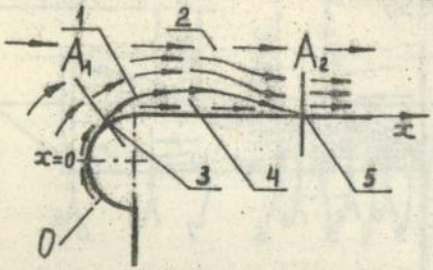
Побудована за підсумками візуалізації модель відривної течії на початковій ділянці труби з гострим вхідним краєм та кутом 90^0 подана на мал.2 /І,2/.

Мал.2. Модель відривної течії на початковій ділянці труби за гострим вхідним краєм з кутом 90^0: І - зрушений шар, 2 - ядро потоку, 3 - застійна зона, 4 - вихор-вовчок, 5 - приєднний шар зворотної течії, 6 - область з хаотичним рухом, 7 - вторинна течія.

Первинний пограничний шар формується на поверхні торцевої стінки, починаючи з точки О. Огинаючи гострий край він відривається і з підвищеною, відносно ядра потоку 2, швидкістю переміщується по траєкторії, яка поступово відхиляється до осі труби. За рахунок в'язкісної взаємодії з вільним зрушеним шаром І біля гострої кромки виникає обертовий вихор-вовчок.4. Його край лежить у перерізі A_2. Вовчок грає роль подібну насосу, дія якого викликає на відрізку між перерізами A_I і A_4 переміщення маси тонкої поверхневої плівки 5 у бік вовчка. Далі скидання цієї маси відбувається у зрушений шар та область з неупорядкованим хаотичним рухом 6. Вторинна течія 7, яка спонукається зрушеним шаром, що відірвався, починається в перерізі A_3. В перерізі A_5 зрушений шар розмивається і відбувається злиття вторинної течії з ядром потоку. Із запропонованої моделі випливає, що профілі швидкості з перегином у межах початкової ділянки існують біля стінки на відрізку між перерізами A_3 і A_4, а максимуми швидкостей розташовані уздовж траєкторії зрушеного шару. За геометричними та режимними ознаками модель мал.2 повинна бути віднесена до випадку, коли вхідний край початкової ділянки гладкого каналу має гострий профіль або надто мале закруглення, а числа Рейнольдса наближаються до 10^5. Отже, відривні те-

чтї з приєднанням можливі тільки при деформації форми краю у бік достатньо плавних обрисів або при суттєво менших значеннях числа Рейнольдса.

Фізична модель відривної течії на вхідній ділянці з краєм $R/d = 0,4$ подана на мал.3.



Мал.3. Модель відривної течії на початковій ділянці труби з вхідним краєм $R/d = 0,4$: I - зрушений шар, 2 - ядро потоку, 3 - переріз відєднання, 4 - відривна бульбашка, 5 - переріз приєднання.

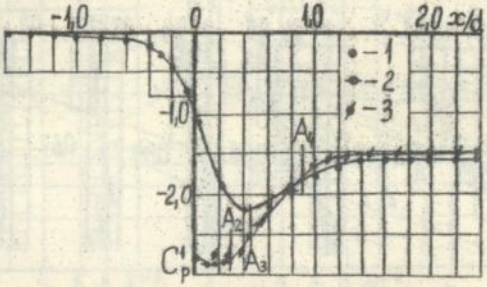
Координата початку розвитку пограничного шару розташована у точці 0, яка в залежності від числа Рейнольдса може знаходитись вище або нижче по течії від точки $x = 0$. При $Re_d \geq 43 \cdot 10^3$ виникає відєднання зрушеного шару I в перерізі A_1, який має координату $x/d = 0,56$ і розташований перед перерізом спряжіння закругленої та прямолінійної частини вхідної ділянки. Зрушений шар огинає відривну бульбашку 4 і приєднується в перерізі A_2. Всередині бульбашки відбувається уповільнення швидкості течії, яка співпадає з напрямом основного потоку 2. Навколо відривної бульбашки має місце значне викривлення ліній току, викликане наявністю поперечних градієнтів тиску. Розглянутий випадок відриву характеризується приєднанням потоку до стінки без виникнення зворотної течії.

Обстеження поля статичних тисків здійснено в ізотермічних умовах трьома серіями експериментів для кожної вхідної ділянки. У першій серії проведені вимірювання зондом уздовж центральної осі початкової ділянки, при цьому досліджена і область, яка знаходилась попереду вхідного перерізу. В другій - знайдені розподіли статичних тисків на зовнішніх границях поля через дренажні отвори та зондом, вісь якого розташована на відстані 0,5 мм від стінки. У третій - дослідження зондом радіальні розподіли тисків у десяти дискретних поперечних перерізах початкової ділянки аж до $x/d = 2,5$. У кожному з цих перерізів осі бокових отворів зонду суміща-

лись з подовжньою координатою якого-небудь із дренажних отворів на стінці. Безрозмірні коефіцієнти тисків обчислювались у першій і другій серіях дослідів за різницями між локальними на стінці або осі та барометричними тисками, а у третій серії - за різницями тисків у потоці та на стінці:

$$C_p^1 = \frac{2(p_w - B)}{\rho \cdot u_{cp}^2} \; ; \; C_p^2 = \frac{2(p_r - p_w)}{\rho \cdot u_{cp}^2} \qquad (I)$$

У ролі типового прикладу на мал.4 нанесені криві $C_p^1 = f(x/d; Re_d)$ осьових і настінних вимірювань при $Re_d = 108 \cdot 10^3$ для входу з краєм $R/d = 0$.

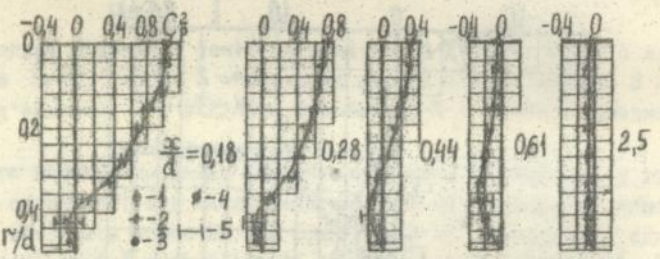


Мал.4. Результати вимірювань поля статичних тисків у відривній області вхідної ділянки з краєм $R/d = 0$ при $Re_d = 108 \cdot 10^3$: I - осьові вимірювання, 2 - вимірювання зондом біля стінки, 3 - вимірювання через дренажні отвори.

Осьові розподіли I при $x/d > 0$ мають достатньо гострий мінімум у зоні $x/d = 0,4-0,42$, викликаний стисненням потоку. Відновлення тиску по осі відбувається аж до $x/d = 1,8-2,0$. У лівій частині малюнка показані дослідні дані для області $x/d < 0$, які дозволяють оцінити координату початку течії уздовж осі труби, якщо її зв'язувати умовою $C_p^1 = 0$. При числах Рейнольдса порядка 10^5 координата точки початку течії складає біля трьох калібрів труби і в досліджених межах підпорядковується залежності $(x/d)_0 = 0,045 Re_d^{0,55}$ /3/. Подовжні вимірювання, виконані дренажами 2 та зондом 3 у пристінній області, задовільно узгоджуються, але суттєво відрізняють-

ся від осьових розподілів. Вказані криві мають досить велику зону з мінімальним рівнем статичного тиску, яка розміщується у межах x/d =0,1-0,35, при цьому абсолютні значення коефіцієнтів тиску у зоні мінімуму на 25-30% нижче, ніж на осі. За матеріалами візуалізаційних експериментів і відповідно з моделлю мал.2 на графіках позначено розташування характерних перерізів, які зв'язані з розвитком відривної течії за гострою кромкою: A_2-правий край вовчка, A_3-початок вторинної течії, A_4-переріз з нульовою швидкістю на стінці.

Результати вимірювання статичних тисків в радіальному напрямку для п'яти поперечних перерізів початкової ділянки приведені на мал.5.



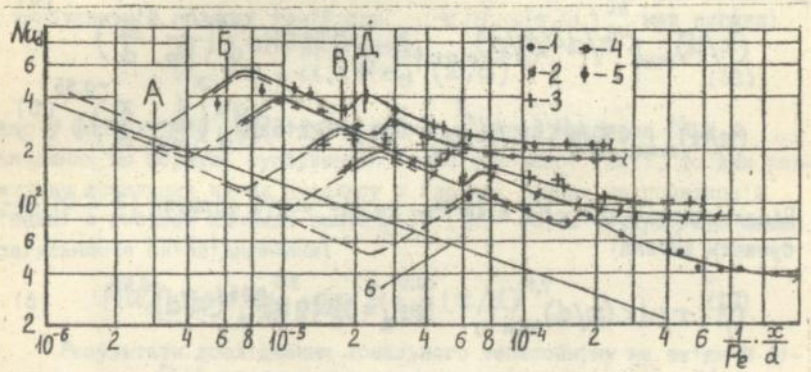
Мал.5. Результати вимірювань радіальних розподілів статичних тисків на вхідній ділянці з краєм R/d =0: I - Re_d=13·10³, 2 - 28·10³, 3 - 43·10³, 4 - 108·10³, 5 - координати зруйнованого шару, які знайдені за результатами візуалізації.

У дослідженому інтервалі чисел Рейнольдса графіки $C_p^2=f(r/d; x/d; Re_d)$ для різних Re_d співпадають. На відрізку $x/d < 0,85$ радіальні розподіли біля стінки мають мінімум, який поступово з ростом x/d переміщується у бік ядра потоку. Ознаки існування мінімуму тиску зникають, коли приведена довжина досягає x/d =2,5. Мітки на графіках відображають траєкторію руху пограничного шару, що відірвався за гострою кромкою. Добра їх кореляція з координатами мінімуму тиску дозволяє вважати останній природним наслідком місцевого і різкого підвищення швидкості, що призводить до формування на початковій ділянці М-образних профілей швидкості.

На відміну від результатів гідравлічних вимірювань на вході з краєм R/d =0, осьові розподіли тисків на вході з краєм

R/d =0,4 характеризуються монотонним їх зниженням, що вказує на поступове зростання швидкості у ядрі потоку. Абсолютні значення коефіцієнтів C_p^1 приблизно у два рази нижчі, ніж на гострому вході, а відновлення тиску на стінці та його вирівнювання в радіальному напрямку настає неподалік перетину $x/d \approx 1{,}0$.

Дослідження осьових розподілів локальних коефіцієнтів теплообміну у круглій трубі з гострим переднім краєм проводились по черзі кожним з двох калориметрів. Безрозмірна обробка експериментального матеріалу здійснена у системі параметрів подібності (Nu_d ; $\frac{1}{Pe}\cdot\frac{x}{d}$) на мал.6.



Мал.6. Безрозмірна обробка експериментальних даних $Nu_d = f\left[\left(\frac{1}{Pe}\cdot\frac{x}{d}\right), Re_d\right]$ для входу з краєм R/d =0,1: 1- Re_d=13·10³, 2 - 28·10³, 3 - 42·10³, 4 - 77·10³, 5 - 110·10³, 6 - по формулі (2).

На малюнку штрихом індексована область, де коефіцієнти теплообміну визначались методом товстої стінки. На верхньому графіку відмічено: мінімум інтенсивності теплообміну А, глабальний максимум Б, кінці перехідної зони В та Д. Крива 6 відповідає формулі (2) для випадку безвідривної ламінарної течії у пограничному шарі початкової ділянки і $Re_d > 10^4$ (формула В.М.Легкого):

$$Nu_d = 0{,}381\left(\frac{1}{Pe}\cdot\frac{x}{d}\right)^{-0{,}5} + 2{,}3 \qquad (2)$$

Приведені графіки задовільно лінеаризуються усередині складаючих їх фрагментів аж до перерізу В. Попереду мінімуму А і на відрізку ВВ ухил осередняючих ліній складає - 0,55, що корелюється із значеннями, які властиві закономірностям теплообміну у ламінарних течіях. Глобальний максимум Б відповідає початку вторинної течії (переріз A_3, мал.2). Зниження коефіцієнтів тепловіддачі на відрізку АВ викликане підвищенням товщини шару заторної течії.

Аналіз теплообмінних даних привів до таких залежностей:

$$0{,}1<x/d<(x/d)_{min}\ ,\ Nu_d=0{,}06Re_d^{0{,}11}\left(\frac{1}{Pe}\cdot\frac{x}{d}\right)^{-0{,}55} \qquad (3)$$

$$(x/d)_{min}<x/d<(x/d)_{max},\ Nu_d=0{,}355Re_d^{1{,}66}\left(\frac{1}{Pe}\cdot\frac{x}{d}\right) \qquad (4)$$

$$(x/d)_{max}<x/d<(x/d)^{I}_{кр},\ Nu_d=0{,}215Re_d^{0{,}11}\left(\frac{1}{Pe}\cdot\frac{x}{d}\right)^{-0{,}55} \qquad (5)$$

Після підстановки $Pe=Re\cdot Pr$ та $Pr=0{,}71$ формули (3 - 5) набувають вигляду:

$$0{,}1<x/d<(x/d)_{min}\ ,\quad Nu_d=0{,}049Re_d^{0{,}66}(x/d)^{-0{,}55} \qquad (6)$$

$$(x/d)_{min}<x/d<(x/d)_{max},\ Nu_d=0{,}5Re_d^{0{,}66}(x/d) \qquad (7)$$

$$(x/d)_{max}<x/d<(x/d)^{I}_{кр},\ Nu_d=0{,}178Re_d^{0{,}66}(x/d)^{-0{,}55} \qquad (8)$$

Формули (3 - 8) узгоджуються з експериментальними даними з похибкою ± I0%.

Координати глобальних максимумів тепловіддачі, які взяті за мал.6 та даними робіт Спероу, А.С.Макарова при дослідженні відриву на вході у канал в інтервалі $Re_{d_э}=(3\text{-}II0)\cdot I0^3$, запропоновано визначати за формулою:

$$(x/d_э)_{max}=0{,}46+10^3/Re_{d_э} \qquad (9)$$

Координати мінімумів не залежать від числа Re_d і дорівнюють приблизно $0,22d$. Дані локального теплообміну в перерізах мінімуму та глобального максимуму узагальнені співвідношеннями:

$$Nu_d^{min} = 0,108\ Re_d^{0,66} \qquad (10)$$

$$Nu_d^{max} = 0,252\ Re_d^{0,66} \qquad (11)$$

У розглянутому діапазоні чисел Re_d критичні координати переходу з константами і складають $(x/d)^{I}_{кр}=1,33$ та $(x/d)^{II}_{кр}=1,62$.

Формула для визначення поправочного коефіцієнту $\varepsilon_x=Nu_d/Nu_{d,\infty}$ у турбулентній області течії при $x/d > (x/d)^{II}_{кр}$ має вигляд:

$$\varepsilon_x = 1 + 11,3\ Re_d^{-0,14}\ (x/d)^{-1,7} \qquad (12)$$

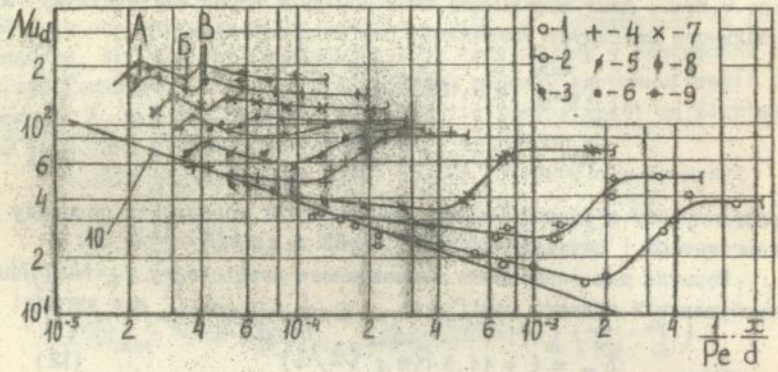
Якщо у формулу 12 підставити значення чисел Нусельта $Nu_{d,\infty}$ знайдених по формулі турбулентної стабілізованої течії, то для розрахунку локальних чисел Нусельту у гладких трубах на початковій ділянці з гострою кромкою при $Re_d>10^4$, $Pr=0,71$ та $x/d>1,6$ маємо узагальнююче співвідношення:

$$Nu_d = 0,019\ Re_d^{0,8} + 0,21\ Re_d^{0,66}\ (x/d)^{-1,7} \qquad (13)$$

Результати дослідження локального теплообміну на вхідній ділянці з краєм $R/d=0,4$ у вигляді безрозмірних графіків $Nu_d = f\left[\left(\frac{1}{Pe}\cdot\frac{x}{d}\right); Re_d\right]$ подані на мал.7.

При $Re_d \geq 43\cdot10^3$ графіки мають вигляд, типовий для відривної течії. На них прослідкується два максимуми А та В. Перший зв'язаний з приєднанням зруйнованого шару і збігається з перерізом A_2 (мал.3), а другий – викликаний завершенням перехідного процесу. У області $Re_d < 43\cdot10^3$ спостерігається безвідривний режим течії, де локальні числа Нусельта монотонно знижуються уздовж осі абсцис і об'єднуються для різних Re_d кривою 10.

При $Re_d < 30\cdot10^3$ у залежностях критичних координат $(x/d)^{I,II}_{кр}$ від чисел Re_d зберігаються закономірності $Re_{x_{кр}}=const$, типові для режиму теплообміну зі змішаною течією. При $Re_d>30\cdot10^3$ вони порушуються, з ростом Re_d критичні координати різко зменшуються і прямують до постійних значень. Зрештою виконується умова $(x/d)^{I,II}_{кр}=const$, яка характерна для відривного входу з краєм $R/d=0$. Критичні координати для входу з краєм $R/d=0,4$ при $Re_d>60\cdot10^3$ складають $(x/d)^{I}_{кр}=1,8$ та $(x/d)^{II}_{кр}=2,0$.



Мал.7. Безрозмірна обробка даних теплообміну для входу з краєм $R/d = 0{,}4$: I- $Re_d = I3 \cdot I0^3$, 2- $I8 \cdot I0^3$, 3 - $29 \cdot I0^3$, 4 - $40 \cdot I0^3$, 5 - $43 \cdot I0^3$, 6 - $49 \cdot I0^3$, 7 - $58 \cdot I0^3$, 8 - $69 \cdot I0^3$, 9- $77 \cdot I0^3$, I0 - по формулі (2).

Залежність координати глобального максимуму локального теплообміну від числа Re_d з похибкою ± 5% описується формулою:

$$(x/d)_{max} = 1{,}08 + 10^4 / Re_d \qquad (I4)$$

Дані по інтенсивності теплообміну у глобальному максимумі в залежності від числа Re_d апроксимовані співвідношенням:

$$Nu_d^{max} = 10^{-5}\, Re_d^{1,5} \qquad (I5)$$

Для визначення поправки на початкову ділянку при турбулентній течії ($Re_d \geqslant 49 \cdot I0^3$) запропоновано формулу:

$$\varepsilon_x = 1 + 1{,}66\,(x/d)^{-2,8} \qquad (I6)$$

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

d - внутрішній діаметр вхідної ділянки, м; R - радіус закруглення вхідного краю, м; x - подовжня координата, м; r - радіальна координата, м; $u_{ср}$ - середньовитратна швидкість, м/с; α - конвективний коефіцієнт тепловіддачі, Вт/м^{2}К; Re_d - число Рейнольдса; Nu_d - локальне число Нусельта; Pe - число Пекле; ε_x - поправка на початкову ділянку при турбулентній течії.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблені на основі візуалізаційних досліджень фізичні моделі відривних течій на вхідних ділянках труб з гострим переднім краєм ($R/d=0$) і краєм, профільованим радіусом кола $R/d=0{,}4$, свідчать про те, що при $R/d=0$ не відбувається приєднання зруйнованого пограничного шару, а на стінці розвивається вторинний пограничний шар, у межах якого на поверхні початкової ділянки лежить переріз з нульовою швидкістю, при $R/d=0{,}4$ та $Re_d \geqslant 43\cdot10^3$ має місце відрив пограничного шару з наступним його приєднанням, при цьому у відривній області на поверхні не виникає зворотної течії.

2. Просторові поля статичних тисків на початкових ділянках труб у межах $Re_d=(13\text{–}15)\cdot10^3$ відзначаються суттєвою нерівномірністю, як у подовжньому, так і в радіальному напрямках. Ця нерівномірність стає незначною лише при $x/d \geqslant 2{,}5$ у труб з гострим переднім краєм і відповідно при $x/d \geqslant 1{,}0$ у труб з переднім краєм, профільованим радіусом кола $R/d=0{,}4$. Конфігурації радіальних розподілів статичних тисків свідчать про існування на початкових ділянках труб у зовнішній частині пограничного шару, так званих, М-образних профілей швидкості.

3. В умовах відриву потоку на початкових ділянках труб з гострим переднім краєм $R/d=0$ та краєм, профільованим радіусом кола $R/d=0{,}4$, спостерігається звичайна для змішаних безвідривних течій послідовність зміни режимів теплообміну, що є природним наслідком існування зон з ламінарним, перехідним і турбулентним пограничним шаром. Але на відміну від безвідривних течій, в умовах відриву критичні координати перехідної зони стають константами, тобто $(x/d)^{I}_{кр}=const$ і $(x/d)^{II}_{кр}=const$, в той час, як для безвідривних течій виконуються закономірності $Re^{I}_{x_{кр}}=const$ і $Re^{II}_{x_{кр}}=const$.

4. Подовжні розподіли локальної інтенсивності тепловіддачі $\alpha = f(x/d ; Re_d)$ на початкових ділянках в умовах відриву мають глибокий мінімум поблизу вхідного краю і два максимуми. У труб з гострим переднім краєм ($R/d = 0$) координата мінімуму практично не залежить від числа Рейнольдса і складає $x/d \approx 0{,}22$, що відповідає перерізу дальнього краю вихора-вовчка, де шар зворотної течії досягає найбільшої товщини. Перший глобальний максимум у цьому випадку відповідає початку вторинної ламінарної течії, а другий - зв'язаний з перерізом, де завершується процес переходу у пограничному шарі. На початковій ділянці з профільованим вхідним краєм $R/d = 0{,}4$ перший глобальний максимум локальної інтенсивності тепловіддачі співпадає з перерізом приєднання, а другий, як і раніше, відповідає перерізу завершення переходу.

5. На основі аналізу експериментальних розподілів локальної інтенсивності теплообміну на початкових ділянках труб з гострим $R/d = 0$ та профільованим радіусом кола $R/d = 0{,}4$ передніми краями у межах $Re_d = (10\text{-}11)\cdot 10^3$ запропоновані:

- розрахункові методики, які дозволяють в умовах відривної течії визначити координати екстремумів тепловіддачі, координати зон переходу, локальні числа Нусельта у перерізах екстремумів;

- система узагальнюючих співвідношень $Nu_d = f(x/d ; Re_d)$ на відрізках з ламінарним та турбулентним пограничним шаром в умовах відриву при $0{,}1 \leqslant x/d \leqslant 13$;

- розрахункові залежності для поправок на початкову ділянку при $x/d > (x/d)^{II}_{кр}$ до формули, що використовується в області розвиненої турбулентної течії. Як свідчать експерименти, ці поправки суттєво залежать від конфігурації переднього краю труби.

ПУБЛІКАЦІЇ НА ТЕМУ ДИСЕРТАЦІЇ

I. Легкий В.М., Рогачов В.А. Течія на початковій ділянці труби з гострим вхідним краєм. I. Фізична модель течії //Інж.-фіз.журн.- - 1989. - Т.56, №2. - С.215-220.

2. Легкий В.М., Рогачов В.А. Течія на початковій ділянці труби з гострим вхідним краєм. 2.Порівняльний аналіз//Інж.-фіз.журн.- 1989. -Т.56, №4.-С.547-550.

3. Легкий В.М., Рогачов В.А. Структура поля статичних тисків на початковій ділянці труби з гострим вхідним краєм //Інж.-фіз. журн. - 1991. - Т.61,№5. - С.709-713.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Підп. до друку 12.05.93 . Формат 60×84 1/16.
Папір друк. № 2 . Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 0,93 .
Умовн. фарбо-відб. 2,04 . Обл.-вид. арк. 2,0 .
Тираж 100 . Зам. № 4-81 . Безплатно.

Фірма «ВІПОЛ»
252151, Київ, вул. Волинська, 60.

Ав 27.469