

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

На правах рукопису

ДАЛІПАГІЧ Владислав Адемович

УДК 621.039.534

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ЛОКАЛЬНИХ ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК
У ПУЧКОВІ СТЕРЖНІВ, ЩО ПОЗДОВЖНЬО ОМИВАЮТЬСЯ

05.14.05 - Теоретична теплотехніка

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 1995

AB 33.560

Дисертація є рукопис.
Робота виконана на кафедрі атомної енергетики та теплофізики Національного Технічного Університету "Київський політехнічний інститут"

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00761613 (O)

Наукові керівники:

кандидат технічних наук,
Маєвський С. М.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,
Домашов С. Д.

кандидат технічних наук,
Приходько М. А.

Ведуча організація:

Державний науково-технічний
центр ядерної та радіаційної
безпеки Міністерства України

Захист дисертації відбудеться " 27 " грудня 1995 р. о 12
годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 01.02.13 у На-
ціональному Технічному Університеті України "Київський політех-
нічний інститут" за адресою 252056, м.Київ, 56, пр-т Перемоги,
37, корпус 5, аудиторія 406.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотечі Національного Тех-
нічного Університету України "Київський політехнічний інститут"

Автореферат розісланий " ____ " _____ 1995 р.

Вчений секретар спеці-
алізованої вченої ради

В. П. Рожалін

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Загальна характеристика роботи

Актуальність теми. Одним із пріоритетних напрямків у розвитку атомної енергетики України є підвищення надійності та безпеки атомних електричних станцій. Рішення цієї проблеми неможливо без розробки та освоєння сучасних розрахунково-аналітичних методів і програм на ЕОМ, які дозволяють моделювати теплогідрравлічні процеси у ядерних реакторах, в першу чергу в умовах перехідних та аварійних режимів. Найбільший прогрес на сьогодні досягнуто у розвитку програм, що засновані на методах коміркового аналізу.

Метод коміркового аналізу дозволяє використовувати розбиття перерізу тепловідляючих збірок (ТВЗ) на комірки, у загальному випадку, довільної форми. Але у більшості аналітичних, а також у всіх експериментальних дослідженнях, традиційно розглядають комірки, відчинені межі яких утворено відрізками умовних ліній максимальних дотичних напруг. Таке розбиття не дозволяє у достатній мірі обраховувати ступінь нерівномірності розподілу теплогідрравлічних характеристик по перерізу ТВЗ і вносить суттєві похибки при розрахунках величин критичних теплових потоків. В той же час використання у розрахунках розбиття, що відрізняється від традиційного, обмежено відсутністю надійних експериментальних даних, на підставі яких можливо було б апробувати розрахунок програм.

Метою роботи є дослідження розподілу теплогідрравлічних характеристик по перерізу моделі ТВЗ для двох різних типів розбиття її перерізу на характерні комірки та проведення апробації програм теплогідрравлічного розрахунку реакторів на базі отриманих експериментальних даних.

Методи дослідження. У роботі проводилось вимірювання локальних масових витрат і ентальпій методом ізокінетичного відбирання проб, а також ентальпій поперечного потоку методом неізокінетичного відбирання проб. За результатами дослідження проводилась верифікація програм теплогідрравлічного розрахунку реакторів ПУЧОК БМДФ та COBRA TF.

Наукова новизна.

1. Експериментально отримано розподіл теплогідрравлічних параметрів по перерізу 7-и стержневого пучка для двох типів розбиття його на характерні комірки. При першому типі розбиття відчинені межі комірок утворювались відрізками ліній максимальних дотичних напруг. При другому типі розбиття відчинені межі комірок утворювались відрізками ліній максимальних швидкостей. Дослідження розподілу масових витрат та ентальпій для другого типу розбиття проведено вперше.

2. Отримано розподіл теплогідрравлічних параметрів по п'яти харак-

терним коміркам за допомогою перерахунку даних для двох типів трьохко-міркового розбиття.

3. Описано фізичну картину течії двофазного потоку у діапазоні середньопучкових паровмістів $x < 0,2$. Аналіз виявленої картини течії дозволив пояснити виникнення кризи тепловіддачі на ділянках гріючих поверхонь, що розташовані у зоні зазору між периферійними стержнями.

4. Запропоновано фізичну модель течії двофазного потоку у пучкові, відповідно якій пучок моделюється як "еквівалентний кільцевий канал з ексцентриситетом".

5. Проведено верифікацію програм теплогідрравлічного розрахунку ТВЗ та їх адаптацію до експериментальних даних для двох типів розбиття пучка на характерні комірки.

Декларація особистого внеску. Особистим внеском дисертанта у розробку наукових результатів є всі положення, що виносяться на захист.

У дисертації захищаються:

1. Експериментальні дані по розподілу масових витрат, ентальпій та ентальпії поперечного потоку для двох типів розбиття пучка на комірки.

2. Фізична картина течії потоку, що запропонована на підставі аналізу виявленого розподілу параметрів і висновок про те, що найбільш імовірним місцем кризи у дослідженому типі пучка є поверхня, що розташована у зоні зазору поміж периферійними стержнями.

3. Запропонована фізична модель двофазного потоку, відповідно якій устанавлюється аналогія між кризою тепловіддачі у пучкові та у "еквівалентному кільцевому каналі з ексцентриситетом".

4. Рекомендації по удосконаленню програм теплогідрравлічного розрахунку ТВЗ, запропоновані за результатами їх верифікації.

Практичне значення.

1. Отримані експериментальні дані призначені для проведення верифікації програм теплогідрравлічного розрахунку реакторів АЕС. Використання нетрадиційного розбиття пучка на комірки дозволяє суттєво розширити можливості таких програм.

2. Експериментально підтверджено, що найбільш імовірним місцем кризи у пучках дослідженого типу є поверхня периферійних стержнів, що спрямована у зазор поміж периферійними стержнями.

3. Обґрунтовано використання при розрахунках величин кризових теплових потоків у пучках залежностей, що отримані для кільцевих каналів з ексцентриситетом.

Реалізація роботи. Результати роботи використані при проведенні верифікації програм теплогідрравлічного розрахунку реакторів ПУЧОК БМДФ та COBRA TF.

Апробація роботи. Матеріали дисертації доповідались на:

- 1). VIII Всесоюзної конференції "Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах" (г. Ленинград, 1990 г.);
- 2). Международном семинаре "Достижения и проблемы теплоэнергетики" (г. Киев, 1992 г.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 3 друковані праці.

Структура та обсяг роботи. Зміст дисертаційної роботи складає вступ, чотири основні розділи і заключення, що викладені на 76 сторінках машинописного тексту. Дисертація містить 59 малюнків, список літератури (87 найменувань) та 6 додатків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі коротко обґрунтовано актуальність роботи, а також викладені основні наукові результати і положення, що виносяться на захист.

У першому розділі наведено огляд робіт, які присвячені переважно експериментальним дослідженням розподілу теплогідрравлічних параметрів по перерізу пучків та комірковим методам аналізу цього розподілу.

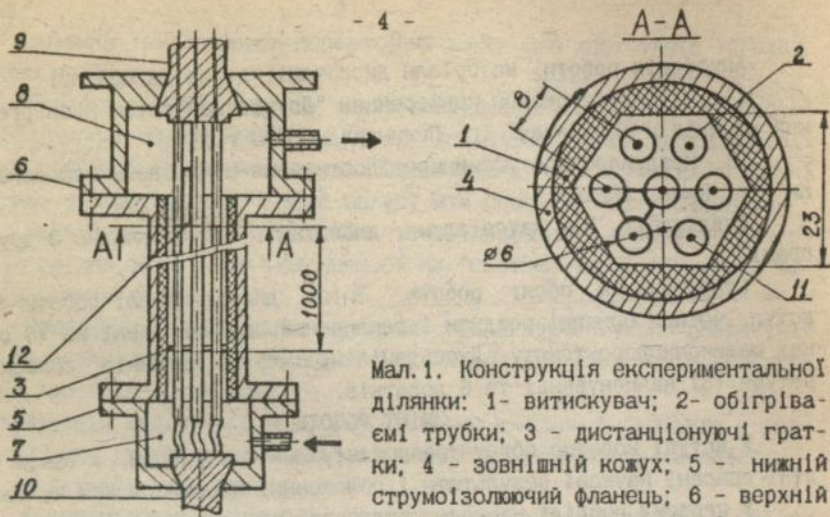
На підставі огляду зроблені наступні висновки.

Всі експериментальні дослідження проведені для одного типу розбиття перерізу пучка на характерні комірки, відчинені межі яких утворювались відрізками ліній максимальних дотичних напруг. У пучках з суттєвою нерівномірністю розподілу параметрів по перерізу у зазорах між периферійними стержнями створюються умови найбільш сприятливі до настання кризи тепловіддачі. При цьому параметри потоку у зоні зазору можуть суттєво відрізнятись від тих, що експериментально отримані у комірках, які утворені описаним вище традиційним способом.

Використання програм теплогідрравлічного розрахунку пучків для нетрадиційного розбиття перерізу каналу на характерні комірки (наприклад, на випадок, коли виділяється зона зазору між периферійними стержнями) обмежено двома основними причинами: по перше, відсутні експериментальні дані, що описують обмін маси та енергії поміж такими комірками; по друге, відсутні експериментальні дані про розподіл теплогідрравлічних параметрів по перерізу пучка, на підставі яких можливо було б судити про достовірність результатів розрахунку по програмам.

На підставі аналізу проведених робіт були сформульовані задачі цього дослідження.

У другому розділі наведені: методика проведення експерименту; опис експериментального стенду; конструкція експериментальної ділянки; схема вимірювань; опис налагодження роботи установки; методика обробки дослідних даних; оцінка похибки вимірюваних та розрахункових величин.

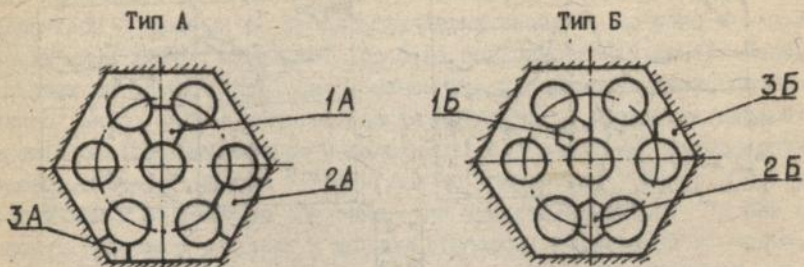


камера; 9- верхній струмопідвод; 10- нижній струмопідвод; 11- термопари; 12- пробовідбірник.

Мал.1. Конструкція експериментальної ділянки: 1- витискувач; 2- обігрівачі трубки; 3 - дистанціонуючі ґратки; 4 - зовнішній кожух; 5 - нижній струмоізолюючий фланець; 6 - верхній фланець; 7 - нижня камера; 8- верхня

Експериментальна ділянка являла собою семистержневий пучок (мал.1) у шестиграному витискувачі (1) з розміром "під ключ" - 23 мм, що рівномірно обігрівачється по довжині та стержням. Пучок набирался із семи трубок (2) діаметром 6 x 0,5 мм та довжиною 1 м, дистанціювання яких один від одного та від стінок витискувача здійснювалось за допомогою шести стільникових дистанціонуючих ґраток (3). Пучок та витискувач розміщувались у зовнішньому кожусі (4), який через нижній струмоізолюючий фланець (5) та верхній фланець (6) з'єднувався з нижньою (7) та верхньою (8) камерами. Підведення потужності до ділянки здійснювалось через верхній (9) та нижній (10) струмопідводи. У якості теплоносія використовувалась хімічно знесолена вода. В середині трубок на 10...15 мм вгору по потоку від кінця ділянки, що обігрівалась, встановлювались термопари (11) для фіксування температури стінки трубок з метою захисту від перепаду. В ході експерименту методом ізокінетичного відбирання проб здійснювалось вимірювання розподілу масових витрат ρW , та ентальпій i , по всім характерним коміркам пучка. Заміри проводились за допомогою рухомих профільованих пробовідбірників (12), внутрішній переріз яких цілком збігався з перерізом комірок, в яких проводились замірювання.

Пучок розбивався на два типи характерних комірок (мал.2.): тип А ("традиційне розбиття") - відчинені межі комірок утворювались відріз-



Мал.2. Розбиття пучка на характерні комірки.

ками ліній, що з'єднують центри стержнів, та відрізками перпендикулярів, що спущені з центрів стержнів до поверхні, що необігрівається; тип Б ("центрально-стержневий") - відчинені межі комірок утворювались відрізками ліній, з'єднуючих центри стержнів і центри комірок типу А.

Для розбиття типу А методом неізокінетичного відбирання проб проводились також замірювання ентальпії поперечного потоку між комірками 1А (центральної) та 2А (бокової).

Діапазон обраних режимних параметрів відповідав умовам протікання тяжких аварій, які супроводжуються зниженням тиску та витрати відносно їх номінальних значень, та складав: тиск на виході з ділянки Р - 6 та 10 МПа; середньопучкова масова витрата ρW - 300...1500 кг/(м²·с); відносна ентальпія на виході - від -0,6 до 0,2; температура на вході у ділянку - від глибоких недогрівів до $(t_s - 20)$ °С; $(q/\rho W) \times 10^{-3} = 1$.

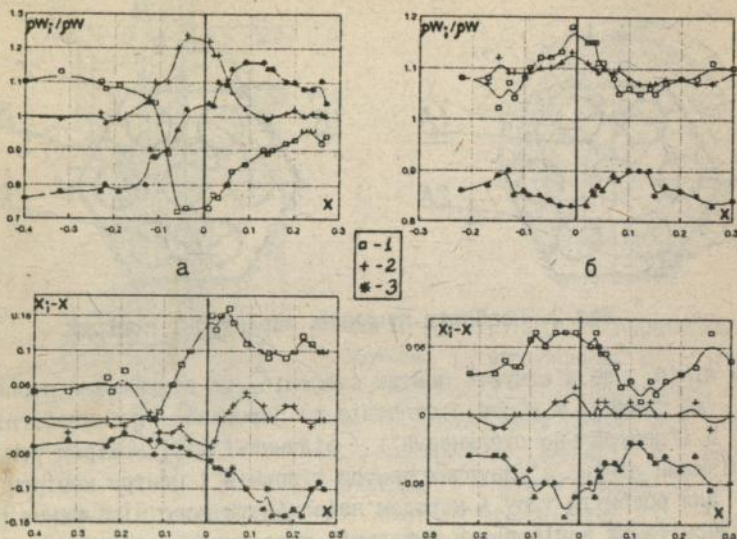
У третьому розділі наведені результати експериментального дослідження розподілу теплогідравлічних параметрів по перерізу пучка та аналіз отриманих результатів.

На мал.3,а приведені результати дослідження розподілу масових витрат і ентальпій для розбиття типу А на прикладі одного з режимів у вигляді безрозмірних залежностей:

$$\rho W_1 / \rho W = f(x) \quad \text{та} \quad x_1 - x = f(x). \quad (1)$$

Тут і далі параметри без індексу відносяться до середньопучкових значень. У області однофазної течії співвідношення між параметрами у комірках зберігалось постійним аж до середньопучкового паровмісту $x < x_{п.к.}$ і добре описувалось відомим рівнянням:

$$\rho W_1 / \rho W = (d_1 / d)^{2/3}.$$



Мал. 3. Результати дослідження розподілу масових витрат і ентальпій для розбиття типу А: а - отримані у даній роботі, б - отримані раніше в КПІ; $\rho W = 750 \text{ кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$, $p = 6 \text{ МПа}$. Комірки: 1 - центральна (1А), 2-бокова (2А), 3 - кутова (3А).

Співвідношення між ентальпіями у центральній (1А) та боковій (2А) комірками можна якісно оцінити залежністю:

$$a_1 = \Delta i_1 / \Delta i = [(d_1 / d)^{2/3} (d^T_1 / d^T)]^{-1}. \quad (3)$$

Ентальпія у кутовій комірці (3А) знаходиться нижче ентальпії у центральній та боковій комірках і нижче середньопучкової ентальпії незважаючи на те, що a_1 для цієї комірки вище, ніж у боковій (2А). Виявлений розподіл теплогідравлічних параметрів по перерізу пучка в області однофазної течії збігається з тим, що було отримано у попередніх дослідженнях.

Початок кипіння на графіках супроводжується достатньо різким зниженням масової витрати і відносним зростанням ентальпії у центральній комірці, а у кутовій комірці - збільшенням масової витрати та відносним зниженням ентальпії. Подібна тенденція зберігається аж до середньопучкових паровмістів $x \approx 0$, де розвірка параметрів по перерізу досягає максимуму. При подальшому зростанні x значення параметрів у комір-

ках наближаються. При $x = 0,15 \dots 0,2$ масові витрати у комірках устанавлюються близькими до середньопучкових значень, до того ж, розбірка проміж ними значно менше тої, що була при однофазній течії. Розбіг коміркових ентальпій при цих значеннях середньопучкових паровмістів значно вище, ніж в області однофазної течії. Поведінка параметрів у боковій комірці змінюється у залежності від значення середньопучкової масової витрати. При $\rho W = 324 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ параметри у боковій комірці із зростанням x змінюються так само, як у кутовій комірці, а при більш високих масових витратах у всьому діапазоні змінювання x - близькі до середньопучкових значень.

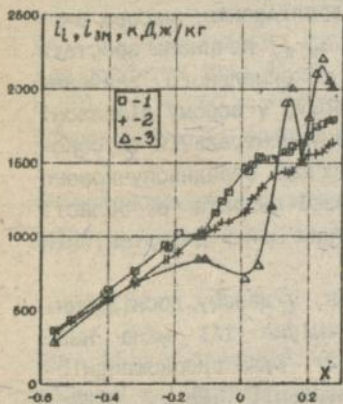
Виявлений розподіл ентальпій по перерізу пучка в області двофазної течії збігається з тим, що було отримано у всіх проведених раніше подібних роботах. У той же час, розподіл масових витрат при $x > x_{п.к.}$ збігається тільки з тим, що отримано у роботах Ф.С. Кастеллана. У всіх інших дослідженнях характер розподілу масових витрат між центральною та кутовою комірками відрізняється від виявлених у даній роботі. На мал. 3,6 для порівняння приведені результати однієї з таких робіт, виконаних раніше в КПІ. Відповідно даним цього дослідження, масова витрата у центральній та боковій комірках при $x > x_{п.к.}$ починала зростати (у кутовій комірці - зменшуватись), досягаючи максимального значення (для кутової - мінімального) при $x \approx 0$. При цьому, у всьому діапазоні зміни середньопучкових ентальпій масова витрата у центральній та боковій комірках залишалась вищою (у кутовій - нижчою) середньопучкового значення. Тобто картина розподілу значень масової витрати в області двофазного потоку діаметрально протилежна отриманій у дисертаційній роботі.

Але, ця уявна суперечність закономірна. Так, у даному дослідженні (а також роботі Кастеллана з інш.) центральна комірка (1А) мала найбільший гідравлічний діаметр d_1 , відповідно (2), була високошвидкісною. Ця ж комірка мала найбільше збільшення ентальпії (або a_1 відповідно (3)) порівняно з боковою коміркою. Можливо припустити, що у центральній комірці в першу чергу починалось кипіння, у ній найбільш інтенсивно відбувалось пароутворення і в цю комірку, відповідно гіпотезі про "дрейф" парової фази у високошвидкісну область, направлялась пара із бокової та кутової комірок по мірі того, як в них починалось пароутворення. В результаті відбувалось загромождження парю живого перерізу у центральній комірці та зниження у ній масової витрати аж до $x \approx 0$. У приведеній на мал. 3,6 роботі центральна комірка також була найбільш теплонапруженою, але високошвидкісною була бокова комірка. В цьому випадку, після закипання у центральній комірці, пара з неї пере-

міщувалась у високошвидкісну бокову комірку. З одного боку, це приводило до того, що лінійна швидкість в цих двох комірках підвищувалась порівняно з лінійною швидкістю середовища у кутовій комірці. З іншого боку, згладжувалась нерівномірність у розподілі пари по перерізу пучка. В результаті масова витрата у центральній та боковій комірках відносно збільшувалась (у кутовій - зменшувалась) аж до $x \approx 0$.

У експерименті проводилось замірювання з усіх характерних комірок, що дозволяло зводити баланс маси та теплоти у досліджуваному перерізі і по непогодженості цих балансів оцінювати похибку експерименту. Середньоарифметичні та середньоквадратичні відхилення у балансі маси складали відповідно 0,16 % та 1,78 %, ентальпії - 0,07 % та 0,57%.

У роботі методом неізокінетичного відбирання проб були проведені експерименти по виявленню ентальпії потоку змішування (поперечного потоку) i_{zm} між центральною та боковою комірками для розбиття А. Дані цього дослідження наведені на мал. 4 та в поєднанні з даними по розподілу масових витрат і ентальпій по комірках дозволяють пропонувати слідуєчу фізичну картину течії у пучку.

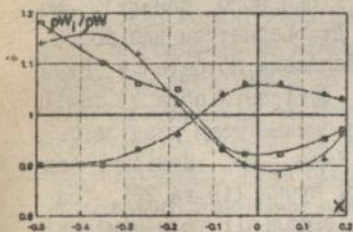


Мал. 4. Ентальпія поперечного потоку i_{zm} між центральною та боковою комірками: 1 - центральна комірка (1А), 2 - бокова комірка (2А), 3 - ентальпія поперечного потоку i_{zm} ; $\rho W = 750$ $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$, $p = 6$ МПа.

При однофазній течії ($x < x_{п.к}$) значення ентальпії поперечного потоку збігаються з ентальпією у боковій комірці та дорівнюють середній ентальпії по пучку. З початком кипіння у центральній комірці ентальпія поперечного потоку починає падати аж до $x \approx 0$ та в області досягання середньопучковим паровмістом нульового значення опускається навіть нижче значень ентальпії у кутовій комірці (3А). Це можна пояснити тим, що пара, яка концентрується переважно у центральній комірці, починає витискувати відносно більш "холодну" рідинну фазу у периферійні бокову та кутові комірки. Потім відбувається різке збільшення i_{zm} до значень, що значно перевищують ентальпію у самій "гарячій" центральній комірці. Це пов'язане з тим, що починається кипіння у боковій комірці і в поперечних перетоках починає переважати пара, що прагне переміститися у високошвидкісну цент-

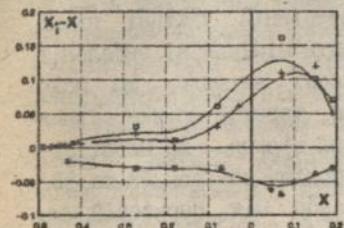
ральну комірку. При $x = 0,15 \dots 0,2$ ентальпія поперечного потоку починає стрибкоподібне зменшення до значень ентальпії середовища у бокових комірках з наступним відновленням до попередніх значень, що знаходяться вище значень ентальпії у центральній комірці. Відбувається перебудова структури потоку у пучці. Так, до $x = 0,15 \dots 0,2$ пара концентрувалась переважно у центральній комірці, а рідинна фаза - у бокових та кутовій комірках з межою розподілу фаз, що розміщувалась у зоні зазору між периферійними стержнями. Після перебудови структури потоку, рідинна фаза знаходиться на поверхнях стержнів та витискувача, а пара - у вільному просторі між стержнями та витискувачем, а також в зазорах поміж ними. Безпосередньо стрибок значення ентальпії поперечного потоку можна пояснити закидом рідини у зону зазорів в момент перебудови структури потоку.

Дослідження розподілу масових витрат та ентальпій для розбиття типу Б проводились у тому ж діапазоні режимних параметрів, що і для комірок типу А. Результати цього дослідження для одного з режимів наведені на мал. 5. Середньоарифметичні та середньоквадратичні відхилення у балансі маси складали відповідно 0,15 % та 1,48 %, ентальпії - 0,22 % та 0,27 %.



0-1 + -2 3-3

Мал. 5. Результати дослідження розподілу масових витрат і ентальпій для розбиття типу Б: $\rho_w = 750 \text{ кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$, $p = 6 \text{ МПа}$. Комірки: 1 - 1Б, 2 - 2Б, 3 - 3Б.



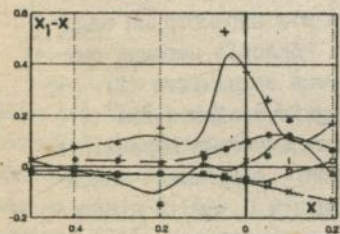
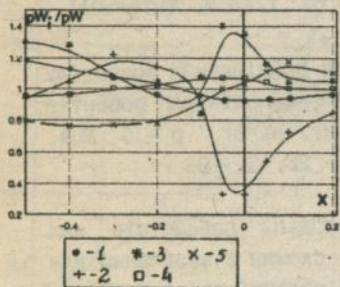
Характер розподілу параметрів для розбиття типу Б схожий з виявленим для розбиття типу А. В області однофазної течії співвідношення між параметрами залишається постійним. Розподіл масових витрат добре описується залежністю (2), а розподіл ентальпій якісно відповідає (3). З початком кипіння значення параметрів починають розбігатися, досягаючи максимального розбігу при $x \approx 0$, потім нівелюються, наближаючись до середньопучкових значень аж до $x \approx 0,2$.

Найбільш цікавим є поведінка параметрів у комірці 2Б. Ця комірка охоплює зазор між периферійними стержнями і лінія, що проведена поміж центрами периферійних стержнів, розділяє її на дві практично рівновеликі частини. Одна половина знахо-

диться в області "гарячої" комірки 1А. Друга половина - в області комірки 2А, параметри у якій близькі до середньопучкових значень (див. мал. 3,а). Із чого можна зробити висновок про те, що параметри у комірці 2В розподілені суттєво нерівномірно. Та частина комірки 2В, що знаходиться в зоні комірки 1А, суттєво "гарячіша" тієї частини, що розміщена у комірці 2А. Оскільки паровміст комірки 2В самий високий для комірок цього типу (див. мал. 5), то можна зробити висновок про те, що параметри у комірці 1А також розподілені суттєво нерівномірно. Паровміст частини комірки 1А, що прилягає до зазору між периферійними стержнями (спільної для комірок 1А та 2В), суттєво вище осередненого паровмісту усієї комірки 1А. Цей висновок наочно підтверджують дані про розподіл по п'яти комірках типу В.

При умові відсутності ексцентриситету в розміщенні пучка відносно витискувача, експериментально отриманий розподіл для двох типів розбиття пучка на комірки А і Б шляхом нескладного перерахунку можна звести до значно більш детального п'ятикоміркового розбиття типу В (мал. 6). Таке розбиття дозволяє оцінити параметри в зонах, що приймають до зазору між периферійними комірками.

Розподіл параметрів по комірках типу В у деякій мірі підтверджує модель "еквівалентного кільцевого каналу", що запропонована П. Дж. Барнеттом для розрахунку критичних теплових потоків у пучках. Дійсно, у двофазній області течії комірки за своїми параметрами розділяються на дві групи (мал. 6). Комірki, що розміщені у центрі пучка (1В та 2В), мають максимальні ентальпії та мінімальні масові витрати, що свідчить про високу концентрацію пари у них. Комірki, що розташовані, у периферійній частині пучка (3В, 4В, та 5В) мають мінімальні ентальпії та максимальні масові витрати, що може служити аналогією товстої плівки рідини на зовнішній стінці кільця, що необігривається. Межу розподілу комірок 2В та 3В, що припадає на зазор між периферійними стержнями, можна розглядати як межу розподілу парової (дисперсної) та рідинної фаз. Зміна параметрів у цих комірках має



Мал. 6. Розподіл параметрів по комірках типу В: $\rho_w = 750$ кг/(м²×с), $p = 6$ МПа; 1...5-комірki 1В...5В відповідно.

діаметрально протилежний характер і саме в них ρW_1 та x_1 досягають екстремальних значень.

В той же час, аналіз розподілу теплогідрравлічних параметрів по комірках типу В дозволяє виявити розбіжність моделі "еквівалентного кільцевого каналу" з тією, що витікає з експерименту. Основною відмінною є те, що ступінь нерівномірності у розподілі параметрів у пучковій виявляється суттєво вищою, ніж у кільцевому каналі. Це можна побачити при розгляді співвідношення масових витрат і ентальпій у комірках 1В та 2В. Комірка 2В для більшості досліджених режимів була самою "гарячою" у пучковій, параметри у ній знаходились значно вище середньопучкових значень, тоді як у комірці 1В параметри близькі до середньопучкових. Поясненням цього факту може бути наступне. Комірки 1В та 2В розміщені у центральній комірці розбиття типу А, для якої характерно те, що в ній протікає аксіальний потік з найбільшим паровмістом у пучковій. У цю комірку направляється пара з периферійних комірок, додатково підвищуючи її паровміст. Оскільки комірки 1В та 2В теплогідрравлічно рівноцінні, то масообмін між ними буде суттєво нижчим, як між коміркою 2В та периферійними комірками, і парова фаза концентруватиметься переважно у комірці 2В. Таким чином, найбільший паровміст у пучковій приходився на зону, що прилягає до зазору між периферійними стержнями, або, відповідно моделі "еквівалентного кільцевого каналу", до межі розділу фаз. У реальних же кільцевих каналах найбільший паровміст зміщений ближче до внутрішньої стінки, що обігрівається.

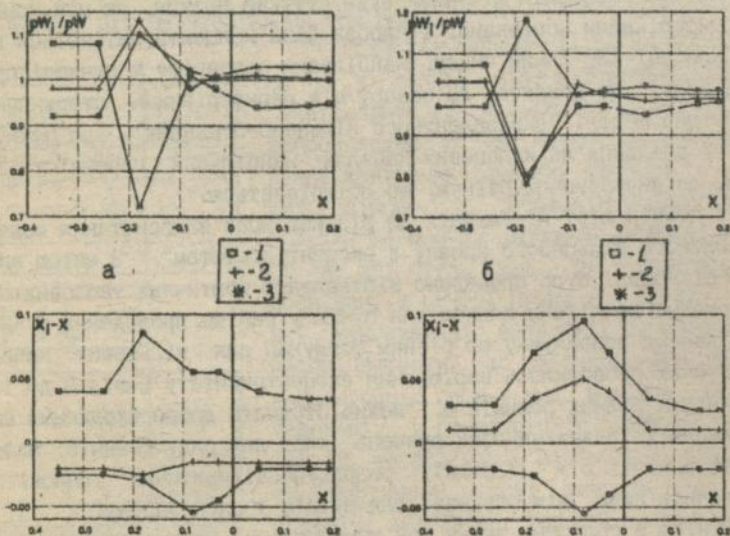
У певній мірі нівелювати цю різницю може використання моделі "еквівалентного кільцевого каналу з ексцентриситетом". З метою апробації подібної моделі було проведено зіставлення критичних теплових потоків, що отримані дослідним шляхом для пучка у раніше проведених у КПІ роботах з даними розрахунку по різних формулах для кільцевих каналів. У розрахунках проводилось варіювання ексцентриситету ϵ від 0 до 1. Підбираючи для різних режимів ϵ , можна отримати добре сходження експериментальних та розрахункових значень. Але, для ряду режимів, навіть при ексцентриситеті $\epsilon = 1$ (дотик), розрахункові критичні теплові потоки знаходились вище, ніж отримані для пучків у експерименті.

Однією з головних задач при використанні методу комірок є виявлення "гарячої" комірки. По її осередненим параметрам визначається криза тепловіддачі у пучковій. У більшості досліджень з традиційним розбиттям (типу А), а також у наведеній дисертаційній роботі, "гарячою" була центральна комірка (1А). В той же час, критичні теплові потоки, що розраховувались по параметрам комірки 2В, будуть суттєво менші, ніж такі самі для комірки 1А. Тобто, використання більш детального

п'ятикоміркового розбиття на характерні комірки має переваги по відношенню до трьохкоміркової моделі. Криза тепловіддачі у пучках, подібних дослідженим у даній роботі, буде відбуватися на стінках периферійних стержнів, що спрямовані у зону зазору між периферійними стержнями.

У четвертому розділі наведені результати розрахунків по програмам ПУЧОК БМДФ та SOBRA III, виконані на базі експериментальних даних цього дослідження.

Програми типу ПУЧОК та SOBRA засновані на практично однаковій фізико-математичній моделі течії і відрізняються, в цілому, емпіричними залежностями, що використані для замикання систем диференціальних рівнянь. Як правило, вибір цих залежностей надається споживачу. На мал. 7 для комірок типу А та типу Б наведений приклад розрахунку по програмі ПУЧОК БМДФ, у якому початок кипіння визначався із умов досягання стінками стержнів температури насичення, а коефіцієнт турбулентного перемішування визначався по залежностям Слущкера В.Г. Загальна тенденція змінювання параметрів, отриманих у експерименті, а також розрахованих по програмі, має схожий характер.



Мал. 7. Розрахунок розподілу параметрів по програмі ПУЧОК БМДФ: а - тип А, 1...3 - комірки 1А...3А відповідно; б - тип Б, 1...3 - комірки 1Б...3Б відповідно; $\rho W = 750 \text{ кг}/(\text{м}^3 \times \text{с})$.

У той же час є суттєві відмінності. Так, у розрахунках розбіг па-

раметрів починався при більш низьких середньопучкових паровмістах, ніж у експерименті. Нівелювати цю різницю може використання залежності Брантова В.Г., що закладена у програму. Розрахунок початку кипіння по Брантову В.Г. давав практичний збіг з експериментом, але при цьому приводив до помилки при визначенні параметрів комірок. Другою суттєвою відмінню є те, що розрахункові параметри після досягання максимальної розвірки, збігаються, наближаючись до середньопучкових значень при $x < 0$. В експерименті цей процес відбувається при більш високих значеннях середньопучкових паровмістів.

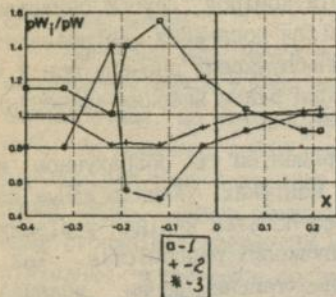
Однією з причин розбіжностей між експериментом та розрахунком є неточність у визначенні початку кипіння у комірках. Аналіз даних по розподілу параметрів по комірках показує, що початок кипіння у різних комірках суттєво зміщений відносно середньопучкових паровмістів. Так, згідно отриманим у цьому дослідженні експериментальним даним, можливо припустити, що кипіння починалось у центральній "гарячій" комірці (1А) при $x \approx 0,18$, у боковій (2А) та кутовій (3А) комірках цей процес "затягнутий" до $x \approx 0$. У той же час, розрахунок початку кипіння у різних комірках з використанням формули Брантова В.Г. дає практично одночасний початок закипання у всіх комірках. Розрахунок початку кипіння із умов досягання стінками стержнів температури насичення трохи "розносить" початок кипіння у комірках відносно середньопучкового паровмісту, але ступінь нерівномірності виникнення цього процесу залишається явно недостатній порівняно з тим, що спостерігалось у експерименті.

Здійснено дослідження впливу коефіцієнта турбулентного перемішування на збіжність розрахованих по програмі ПУЧОК БМДФ та експериментальних даних. У програму закладено п'ять залежностей для визначення коефіцієнтів турбулентного перемішування. Використання даних Слуцкера В.П. (мал.7) дало у загальному випадку задовільну збіжність з експериментом. У той же час, з тією ж точністю дозволяє проводити розрахунок використання значно більш простих залежностей, наприклад, постійного значення коефіцієнта турбулентного перемішування, рівного 0,01. Змінювання коефіцієнта справляло суттєвий вплив на абсолютні значення теплогідравлічних параметрів та ступінь нерівномірності їх розподілу по комірках, але практично не впливало на місце розташування початку кипіння, області максимального розбігу та області збіжності параметрів у пучкові відносно середньопучкових паровмістів.

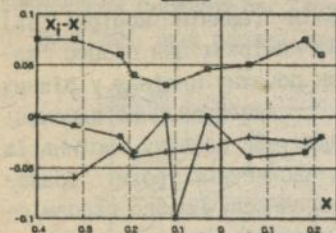
Із порівняння розрахункових та експериментальних даних можна зробити висновок про те, що програма ПУЧОК БМДФ з однаковою точністю дозволяє проводити розрахунок розподілу теплогідравлічних параметрів для двох суттєво різних типів розбиття пучка на комірки А та Б. Із цього

витікає, що у розрахунках по програмі ПУЧОК є можливим довільний спосіб розбиття пучка на комірки, щонайменше, у області однофазної течії.

На базі експериментальних даних цього дослідження в НИКИЭТ (м. Москва) була проведена верифікація програми COBRA III (мал. 8). Програ-



Мал.8. Розрахунок розподілу параметрів по програмі COBRA III:1...3 - комірки 1А...3А відповідно; $\rho W = 750 \text{ кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$, $p = 6 \text{ МПа}$.



ма для ряду режимів показала добру збіжність з експериментом у області однофазної течії. Але, в цілому COBRA дає результати гірші, ніж ПУЧОК. Так, для тої ж однофазної течії масова витрата у кутовій комірці 3А, розрахована по програмі COBRA, мала бути вищою, ніж у 1А та 2А. В області двофазної течії програма давала складну, практично непорівнянну з експериментом картину. Можливо це викликано тим, що на відміну від умов проведеного нами експерименту, у якому розглянуті стаціонарні умови, COBRA III призначена для розрахунку нестационарних процесів.

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

1. Отримано експериментальний розподіл масових витрат та ентальпій, а також ентальпій поперечних перетоків для комірок, відчиненими межами яких були відрізки ліній максимальних дотичних напруг.

2. Вперше отримано експериментальний розподіл масових витрат та ентальпій для комірок, відчиненими межами яких були відрізки ліній нульових дотичних напруг.

3. Визначено, в області однофазних течій співвідношення між значеннями масових витрат у комірках постійне та добре описується відомою залежністю $\rho W \sim d^n$, де $n = 2/3$.

4. Наведена детальна картина течії у дослідженому пучкові, на підставі якої установлено, що найбільш імовірним місцем кризи у діапазоні середньопучкових паровмістів $x_{п.к.} < x < 0,2$ є поверхня, спрямована у зазор між периферійними стержнями.

5. Запропонована фізична модель течії двофазного потоку, відпо-

відно якій пучок зводиться до еквівалентного кільцевого каналу з ексцентриситетом.

6. Проведена верифікація програми ПУЧОК БМДФ на базі отриманих у роботі експериментальних даних. Визначено, що розрахунок по програмі дає результат, якісно подібний отриманому у експерименті. У той же час, чисельні значення розрахункових теплогідравлічних параметрів суттєво відрізняються від експериментальних в області двофазних течій.

7. Проведена оцінка впливу точності визначення початку кипіння на результати розрахунку по програмі ПУЧОК БМДФ. Аналіз використаних у програмі залежностей показав, що розрахунок по ним дає практично одночасне закипання у всіх комірках, що суперечить експериментальним даним.

8. Проведене дослідження впливу коефіцієнта турбулентного перемішування на точність розрахунку по програмі ПУЧОК БМДФ. Отримана задовільна збіжність розрахунку та експерименту як при використанні складних залежностей Слуцкера В.П., так і простих рівнянь, наприклад, постійного значення коефіцієнта турбулентного перемішування, рівного 0,005...0,01. Зміна коефіцієнта турбулентного перемішування у розрахунках не виявляє практично ніякого впливу на місце розташування як початку кипіння, так і області максимальної розбіжки та області збіжності параметрів у пучку відносно середньопучкових паровмістів.

9. Установлено, що за допомогою програми ПУЧОК БМДФ з однаковою точністю проводиться розрахунок розподілу теплогідравлічних параметрів для двох суттєво різних типів розбиття на комірки одного й того ж пучка. У режимах однофазної течії програма може бути використана для довольного способу розбиття дослідженого типу пучка на комірки.

ПУБЛІКАЦІЇ НА ТЕМУ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Орнатский А. П., Маевский Е. М., Далипагич В. А. К определению горячей ячейки в пучке ТВЭЛ // Пром. теплотехника, 1992, Т.14, N 1, С.16-21.

2. Маевский Е. М., Далипагич В. А., Разумовский В. Г. К определению места кризиса в пучке ТВЭЛ // Киев. политехн. ин-т. - Киев, 1994. - Деп. в ГНТБ України, N 2377 - Ук. 94. - 9 с.

3. Далипагич В. А., Маевский Е. М. Опыт сравнения экспериментальных и рассчитанных по программе ПУЧОК БМДФ FUEL теплогидравлических параметров в ТВС // Киев. политехн. ин-т. - Киев, 1994. - Деп. в ГНТБ України, N 2376 - Ук. 94. - 7 с.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

x - балансовий паровміст; ρW - масова витрата, $\text{кг}/(\text{м}^2 \times \text{с})$; P - тиск, МПа; q - густина теплового потоку, $\text{МВт}/\text{м}^2$; t - температура, $^{\circ}\text{C}$; Δ - приріст; a - коефіцієнт теплонапруженості; d - діаметр, мм; i - питома ентальпія, $\text{кДж}/\text{кг}$; ε - відносний ексцентриситет.

ІНДЕКСИ

i - i -я комірка; s - насичення; t - тепловий; п.к. - початок кипіння; А, Б, та В - розбиття типу А, Б та В відповідно; зм - змішування.

SUMMARY

Dalipagich V.A. Investigation of the Distribution of Local Thermal - Hydraulic Characteristics in a Flowed along Rod Bundle.

The thesis for the degree of candidate of technical science in 05.14.05 speciality - Theoretical Heat Engineering, National Technical University of Ukraine "Kiev Politechnic Institute", Kiev, 1995.

The thesis contains the results of theoretical and experimental investigations on the distribution of local thermal-hydraulic characteristics in a flowed along 7-rod bundle of hexagonal geometry and the results of approbation of nuclear reactors thermal-hydraulic calculation programmes based on obtained experimental data.

АННОТАЦІЯ

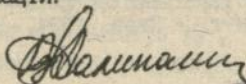
Далипагіч В. А. Исследование распределения локальных теплогидравлических характеристик в продольно омываемом пучке стержней.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.14.05 - Теоретическая теплотехника, Национальный Технический Университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 1995.

Диссертация содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований распределения локальных теплогидравлических характеристик в продольно омываемом семистержневом пучке в шестигранном вытеснителе, также результаты апробации программ теплогидравлического расчёта реакторов АЭС на базе полученного экспериментального материала.

Ключові слова: розподіл теплогідравлічних характеристик, пучок, безпека АЕС, верифікація.

Здобувач



В. А. Даліпагіч

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Підп. до друку 14.11.95 Формат 60x84/16 Папір *друк.* Друк. офс.
Друк. офс. Умови. друк. арк. 0,93. Обл.-вид. арк. 0,7. Тир. 110
Зам. 5-2995.

Київська книжкова друкарня наукової книги. Київ, Б. Хмельницького, 19.

446966

AB 33.560