

Харківський державний політехнічний університет

---

На правах рукопису

Шубенко Олександр Леонідович

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕЧІЇ ВОЛОГОЇ  
ПАРИ ТА ОЦІНКА ЇХ ВПЛИВУ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ТУРБІН

05.04.12 - турбомашини та турбоустановки

Автораферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук



Харків - 1994

AB 30. 721

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті проблем машинобудування НАН України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Косяк Дрій Федорович;

доктор технічних наук, професор  
Ільченко Олег Трохимович;

доктор технічних наук, професор  
Гаркуша Анатолій Вікторович.

Провідне підприємство - Науково-виробниче об'єднання по дослідженню та проектуванню енергетичного обладнання ім.І.І.Ползунова, м.Санкт-Петербург

Захист відбудеться " 15 " вересня 1994 р. о 11 год. на засіданні спеціалізованої ради Д 068.039.01 при Харківському державному політехнічному університеті (310002, Харків, МСП, вул. Фрунзе, 21).

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського державного політехнічного університету.

Автореферат розісланий " 4 " серпня 1994 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої ради

Зайченко С.Т.

ЛНБ ім. В. Стефанишина  
АН України

ЛНБ України ім. В. Стефанишина



00756626 (W)

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Зараз світова практика виробки електроенергії ґрунтується, головним чином, на використанні паротурбінних установок (ПТУ). Тому від поліпшення показників їх роботи в значній мірі залежить вирішення найважливішої задачі - виконання програми енергозберігавчих заходів і забезпечення помітного поліпшення екологічної обстановки.

Однією з можливостей подальшого підвищення економічності та надійності ПТУ є удосконалювання їх робочих процесів на підвалинах детального аналізу структури потоку в проточній частині турбіни. Істотні резерви реалізації цієї проблеми містяться в області двофазної течії, де процеси утворення, трансформації та переносу вологи негативно впливають на характеристики ступенів.

Загострення інтересу до проблем вологої пари в енергетичному машинобудуванні, що виявилось в останні роки, пов'язано з будівництвом турбін для атомних електростанцій, робочий процес котрих в основному протікає в двофазній області стану, а також зі зростанням потужностей турбоагрегатів, збільшенням довжини лопаткових апаратів і колових швидкостей, що ускладнює задачі підвищення економічності та захисту від ерозії.

Особливостям роботи турбін на вологій парі присвячено численні дослідження, що проводяться науково-дослідними організаціями та турбобудівними підприємствами. Разом з тим, не всі задачі, що є важливими для теорії та практики конструювання й експлуатації вологопарових турбін, розглянуті повною мірою. Обсягу накопичених знань часто-густо не вистачає не лише для їх закінченого розв'язання, але навіть для того, щоб пояснити конкретні експериментальні результати. На сучасному рівні розвитку турбобудування це потребує подальшого поглибленого вивчення фізичного стану процесів, що відбуваються в області двофазної течії. Розв'язання цієї задачі за рахунок збільшення обсягу експериментальних робіт обмежено труднощами моделювання реальної течії, а також недостатністю отримуваної інформації та високою вартістю експериментів. Тому зараз поряд з експериментальними дослідженнями отримують розвиток методи математичного моделювання, яким притаманна велика універсальність. Крім того, вони дозволяють побудувати стосовно до сучасних ЕОМ якісно нові алгоритми та програми як за змістом, так і за швидкодією.

Остання обставина пов'язана зі значним розширенням кола за-

дач, що розв'язуватися за допомогою створених моделей: синтез оптимальних конструкцій турбомашин, створення систем автоматизованого проектування й керування технологічним процесом, діагностування функціонального стану енергетичного обладнання і т.ін., а також розв'язання дослідних задач, де утворення та трансформація вологи є лише частиною дуже складних процесів (багатомірність, нестационарність, ерозія елементів проточної частини тощо).

Вирішення проблеми створення таких моделей і відповідних розрахункових методів й зумовило зміст цієї дисертаційної роботи, виконаної в Інституті проблем машинобудування (ІПМаш) НАН України безпосередньо автором і за його науковим керівництвом відповідно до завдань по державних програмах та планів науково-дослідних робіт ІПМаш НАН України по бюджетних темах і господарських договорах.

Мета роботи - удосконалення розрахункових методів і розробка обчислювальних комплексів для дослідження процесів в ступенях вологопарових турбін на підґрунті розвитку теорії і створення математичних моделей утворення, переносу, трансформації вологи та її взаємодії з елементами проточної частини.

У межах реалізації сформульованої мети роботи були поставлені такі задачі:

- розвиток підвалин теорії утворення зародкових крапель у високошвидкісних потоках пересохлої пари в проточній частині. Створення математичної моделі та методу розрахунку процесу конденсації. Апробація методу на підґрунті чисельного експерименту та порівняння з фізичним експериментом;

- створення математичної моделі та обчислювального комплексу для розрахунку течії пари, що спонтанно конденсується, в ступені великої віяльості;

- розробка математичної моделі ерозійного спрацювання робочих лопаткових апаратів турбін ґрунтуючись на кінетичній концепції руйнування твердих тіл під час високошвидкісної дії полідисперсних крапельних потоків. Проведення чисельного експерименту щодо прогнозування інтенсивності спрацювання та виявлення впливу різних конструктивних і режимних параметрів на характеристики руйнування.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в досягненні таких нових наукових результатів, що вносяться на захист:

- постановка задачі та математична модель процесу гомогенного утворення зародкових крапель при залежних від часу параметрах ста-

ну вихідної фази в проточній частині турбіни;

- метод і результати розв'язання задачі про однопараметричне (ізотермічне) та багатопараметричне (неізотермічне) зародження під час конденсації пари;

- чисельно-аналітичний метод опису процесу конденсації пари, що ґрунтується на послідовному урахуванні нестационарності процесу зародження рідкої фази, та результати чисельного експерименту за порівняльним аналізом точності відомих стаціонарних методів;

- математична модель, метод і обчислювальний комплекс для розв'язання задачі дослідження течії пари з нерівноважною конденсацією в ступені великої віяльності;

- постановка задачі про використання кінетичної концепції руйнування твердих тіл для опису ерозійного руйнування матеріалів під час краплеударної дії;

- математична модель і метод визначення інтенсивності ерозійного руйнування робочих лопаткових апаратів вологоспарових турбін під час дії полідисперсних крапельних потоків;

- результати чисельних досліджень інтенсивності ерозійного руйнування робочих лопаток з використанням розробленої моделі ерозії.

Варіаційність та обґрунтованість основних положень і результатів дисертації підтверджуються:

- використанням для побудови моделей фундаментальних законів і класичних теоретичних положень;

- застосуванням апробованих чисельних методів розв'язання газодинамічних задач;

- залученням для побудови елементів моделей результатів експериментальних і теоретичних досліджень інших авторів;

- порівнянням з результатами розрахунків за іншими методами, що використовуються в літературі, та фізичним експериментом.

Практична цінність роботи полягає в тому, що:

- ґрунтуючись на розвинених у дисертації теоретичних положеннях одержано нові якісні та кількісні дані щодо процесів конденсації під час розширення пари в проточній частині турбіни;

- створений чисельно-аналітичний метод розрахунку процесу конденсації є простим і надійним інструментом для практичних розрахунків процесу конденсації при течіях в прямих соплах і гнетках профілів та легко включається в газодинамічні розрахункові схеми;

- розроблений метод і програмно-обчислювальний комплекс для

визначення течії пари, що нерівноважно конденсується, в ступені великої віяльності, дозволяє одержати всі необхідні термогазодинамічні характеристики потоку;

- метод і комплекс програм для розрахунку інтенсивності ерозійного спрацювання робочих лопаток парових турбін можуть бути широко використані як для р'язання задач конструювання ерозійно-стійких проточних частин, так і для прогнозування інтенсивності ерозійного руйнування лопаток за умов експлуатації.

Реалізація результатів. Основні результати виконаних в роботі досліджень і пакети прикладних програм впроваджені в НВО ЦСТІ ім.І.І.Ползунова та НВО "Турбоостом" й використовуються в процесі проектування турбін при розрахунках проточної частини.

Апробація роботи. Наукові та практичні результати роботи доповідались та обговорювались на:

VIII і IX міжнародних конференціях "Парові турбіни великої потужності" (Чехія, м.Карлові Вери, 1984, 1989 рр.);

VII і VIII всесоюзних конференціях "Двофазний потік в енергетичних машинах і апаратах (м.Санкт-Петербург, 1985, 1990 рр.);

- III всесоюзній науково-технічній конференції "Сучасні проблеми двигунів та енергетичних установок літальних апаратів ( м.Москва, 1986 р);

- II всесоюзній конференції "Теплофізика та гідрогазодинаміка процесів кипіння і конденсації" (м.Рига, 1988 р.);

- республіканських науково-технічних конференціях "Математичні моделі процесів і конструкцій енергетичних турбомашин в системах їх автоматизованого проектування" (м.Зміїв, 1982, 1985, 1988, 1991 рр.);

- всесоюзному семінарі "Конструкційна міцність та захист двигунів, енергоустановок і літальних апаратів від ерозійних пошкоджень та сторонніх предметів (м.Москва, 1984 р.);

- загальноміському семінарі з теплофізики енергообладнання (м.Санкт-Петербург, 1982-1984 рр., 1986р.);

- науково-технічному семінарі Інституту проточних машин Польської академії наук (Польща, м.Гданськ, 1986-1989 рр.).

Публікації та особистий внесок автора. За матеріалами дисертації опубліковано 48 друкованих праць. Особистий вклад здобувача в роботи, написані у співавторстві, полягає ось у чому:

Роботи 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7

Здобувачем здійснені постановка та проведення експериментальних

досліджень по вимірюванню характеристик течії плівок і крапель вологи у плоских ґратках і ступенях вологопарових турбін. Виконані чисельні дослідження. Проведено аналіз результатів експериментів.

Роботи 8,9,11,14,21,31,33

Здобувачем проведена постановка задачі та розроблена математична модель для однопараметричного (ізотермічного) та багатопараметричного зародження рідкої фази під час конденсації переохолодженої пари. Проведено аналіз результатів чисельних досліджень.

Роботи 15,22,23,27,34,39,40

Здобувачем здійснена постановка задачі та розроблена комплексна математична модель процесу гомогенної конденсації під час швидких розширень переохолодженої пари. Проведено аналіз результатів чисельних досліджень.

Роботи 18,30,37,38,41,47

Здобувачем здійснена постановка задач та розроблена комплексна математична модель течії нерівноважної пари, що конденсується, у ступенях великої віяльності вологопарових турбін. Проведено аналіз результатів чисельних досліджень.

Роботи 10,12,13,16,19,24,25,32

Здобувачем здійснена постановка задачі та розроблена кінетична модель ерозійного руйнування матеріалів, що зазнають швидких високоскоростних крапельних потоків. Проведено аналіз результатів чисельних досліджень.

Роботи 20,28,29,35,36,42,43,46,48

Здобувачем розроблена комплексна математична модель і метод розрахунку інтенсивності ерозійного спрацювання робочих лопаткових апаратів ступенів вологопарових турбін. Виконані чисельні дослідження на моделі по прогнозуванню ерозії. Проведено аналіз результатів. Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновку, списку використаної літератури, що містить 259 найменувань, додатку, 50 рисунків, 6 таблиць, усього 265 сторінок.

#### ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ. Обґрунтована актуальність проблеми, що розглядається, сформульовані мета й основні задачі дослідження, наведена коротка анонція отриманих нових результатів та їх практична цінність.

Розділ I. У першому розділі після короткого історичного огляду розвитку проблеми вологої пари в турбобудуванні докладно розглянуто сучасний стан підвалин теорії та методів розв'язання задач,

пов'язаних з виникненням вологи, її трансформацією та взаємодією в елементами проточної частини.

Класична теорія конденсації та можливості її застосування для аналізу процесів вологоутворення в проточній частині. Одним з найбільш важливих питань в теорії вологопарових турбін є дослідження процесу конденсації в проточній частині. Це пов'язано з тим, що зародження крапель в значній мірі зумовлює характер дальшої течії робочого тіла. Його детальне дослідження й опис необхідні як для створення відповідних розрахункових газодинамічних схем, так і для вивчення складних фізичних явищ, що супроводжують утворення і трансформацию крапель і впливають на робочі процеси в турбіні.

Розглядається флуктуаційне (спонтанне) зародження крапель рідини під час розширення переохолодженої пари. При цьому використовується підхід, який ґрунтується на загальній теорії кінетики нерівноважних фазових перетворень.

Теорія зародження нової фази у сучасному вигляді була розроблена Зельдовичем, який отримав

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial j}{\partial g} = 0, \quad j = DN \frac{\partial f}{\partial g} \frac{1}{N}. \quad (1)$$

В (1)  $g$  - число молекул в зародковій краплі;  $j(g,t)$  - потік зародків у просторі розмірів;  $D(g)$  - коефіцієнт дифузії;  $f(g,t)$  і  $N(g,t)$  - відповідно кінетична та рівноважна функції розподілу.

При незалежних від часу зовнішніх умовах в системі встановлюється стаціонарний розподіл крапель за розмірами

$$f_{ст} = \frac{1}{2} N \operatorname{erfc} \left( \frac{g-g_*}{\Lambda} \right), \quad (2)$$

де  $g_*$  - зародок критичного розміру;

$$\Lambda = \left\{ - \frac{1}{2K_B T} \left. \frac{\partial W}{\partial g^2} \right|_* \right\}^{-\frac{1}{2}} - \text{ширина колокритичної області};$$

$W(g)$  - мінімальна робота, потрібна для утворення зародка даного розміру;  $K_B$  - стала Больцмана;  $T$  - температура середовища.

Швидкість нуклеації  $I_{ст}$ , тобто число стійких зародків, що утворились в системі за одиницю часу, визначається як незалежне від розміру стаціонарне значення потоку

$$J_{\text{ст}} = I_{\text{ст}} = \frac{D_* N_*}{\Delta \sqrt{\kappa}} = \frac{1}{2 \sqrt{\kappa}} \frac{\partial g}{\partial g} \left|_{N_* \Delta} \right. \quad (3)$$

де  $g$  - макроскопічна швидкість змінення розміру зародка.

Стосовно до перехолодженої пари роботи Зельдовича були розвинені Френкелем. Для випадку однопараметричної (ізотермічної) нуклеації в перехолодженій парі з(3) після конкретизації величин, що входять туди, випливає вираз для стаціонарної швидкості зародження (формула Зельдовича-Френкеля)

$$I_{\text{ст}} = \alpha_{\kappa} \left( \frac{2}{\kappa} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{p}{K_B T} \frac{1}{\rho} (\sigma m_m)^{\frac{1}{2}} N_1 \exp \left( - \frac{4\pi \sigma}{3 K_B T} r_{\kappa}^2 \right) \quad (4)$$

де  $p$  - тиск пари;  $\rho$  - густина рідини;  $\sigma$  - коефіцієнт поверхневого натягу;  $m_m$  - маса молекули;  $N_1$  - число молекул пари в системі;  $r_{\kappa}$  - радіус критичного зародка;  $\alpha_{\kappa}$  - коефіцієнт конденсації.

Роботами Зельдовича та Френкеля було завершено створення так званої "класичної" теорії зародкоутворення. Проведений аналіз її основних припущень показав, що одне з найбільш важливих припущень - про стаціонарність процесу зародження нової фази - може бути порушено у багатьох експериментальних ситуаціях, що характеризуються великими швидкостями розширення, зокрема в проміжній частині турбомашини.

Таким чином, одним з найбільш актуальних напрямів дальшого розвитку теорії конденсації стосовно до енергетичного обладнання є уточнення кінетичних аспектів зародження, пов'язаних з відзначеними вище ситуаціями, коли не можна застосувати стаціонарне наближення під час розв'язання рівняння (1).

Уперше нестаціонарне зародження було розглянуто Зельдовичем, який отримав оцінку характерного часу встановлення стаціонарного режиму нуклеації. Впливості наступних досліджень було спрямовано на уточнення зазначеної оцінки при фіксованих зовнішніх умовах.

У елементах проточної частини турбомашини процес конденсації відбувається в полі термодинамічних параметрів, що швидко змінюється. Це позначається, насамперед, на зміні величини активаційного бар'єра  $W_e / K_B T$ . Тоді рівень нестаціонарності слід характеризувати деякою величиною, що пов'язує час релаксації до стаціонарного розподілу  $\tau_{\text{рел}}$  та швидкість змінення бар'єру зародження  $\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{W_e}{K_B T} \right)$  - коефіцієнтом нестаціонарності "n"

$$n = -\tau_{\text{рел}} \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{W_s}{K_B T} \right). \quad (5)$$

Виконані оцінки показали, що для швидкостей охолодження та параметрів пари, характерних для турбомашин, нестационарні ефекти можуть стати істотними ( $n > 1$ ). Відзначимо, що часто в літературі зворотний час релаксації  $\tau_{\text{рел}}$  порівнювали не з швидкістю зміни величини активаційного бар'єра, а з швидкістю охолодження. Це приводило до необґрунтованого висновку щодо можливої ролі нестационарності лише при надто великих швидкостях охолодження.

Власне процес утворення зародкових крапель є лише початковим етапом фазового переходу I-го роду. Ефекти присутності нової фази, які "спостерігаються" (а саме вони і являють для нас основний інтерес), становляться такими лише після значного збільшення розмірів зародків, що утворилися. Для таких зародків справедливі макроскопічні рівняння росту, і зміна повного числа молекул, які перейшли в нову фазу  $N'$ , може бути описана таким чином:

$$\frac{dN'}{dt} = - \frac{dN_1}{dt} = \int_0^{\infty} I(t-t') g(t') dt', \quad (6)$$

де  $I(t-t')$  - швидкість зародження, яку загалом слід визначити в розв'язку рівняння Зельдовича ( $I$ ) з урахуванням ефектів нестационарності;  $g(t')$  - число молекул в зародковій краплі, що утворилась в момент часу  $(t-t')$  і спостерігається в момент часу  $t$ .

Виконаний у дисертації докладний аналіз існуючих в літературі методів дослідження рівнянь типу (6) показав істотні обмеження щодо можливостей їх використання в задачах, які характерні для турбомашин, де конденсація є лише частиною надто складних газодинамічних процесів. Це пов'язано або з помітним зниженням точності розв'язку, що є характерним для аналітичних підходів, які ґрунтуються на ряді серйозних припущень (стационарна швидкість зародження, незалежність швидкості росту крапель від їх радіуса та ін.), або з великою відчуженістю чисельних методів.

Таким чином, задача створення достатньо точного і простого методу розрахунку процесу конденсації, що враховує особливості зародження нової фази під час швидких розширень пари в проточній частині та зручного для включення в газодинамічні розрахункові схеми і задачі синтезу оптимальних конструкцій вологопарових турбін, зостається дуже актуальною. Докладно її викладено у розділі 2.

Течія пари, що конденсується, та вологої пари в ступені. Проведений аналіз показав, що детально описати течії в нерівноважній конденсації навіть в одновимірній постановці значно важко. Труднощі помітно збільшуються під час прагнення описати ці процеси в ступені вологопарової турбіни, особливо у випадках, що ускладнені істотною неоднорівністю потоку. Таким чином, спроби одночасного урахування під час створення розрахункового методу усіх явищ, пов'язаних з утворенням і трансформацією вологи (міжфазовий обмін масою, імпульсом, енергією; полідисперсність рідкої фази; деформація, дрібнення чи коагуляція частинок; взаємодія рідкої фази з поверхнями газодинамічного тракту-відбиття крапель від поверхонь лопаток, утворення рідких плівок, їх рух, дрібнення в кромковому слідові, випарування) не є реальними та й навряд чи раціональними. Разом з тим залежно від задачі, що розв'язується, можна виділити ті, пов'язані з утворенням і трансформацією вологи ефекти, які найбільш істотно впливають на хід процесу. Деякими ефектами можна зовсім знехтувати, а для інших ввести спрощуючі припущення.

Для задачі, що розглядається і де йдеться про течії в ступені пари, яка конденсується, коли аналізуються потоки в інтенсивним зародкоутворенням і створенням високодисперсної конденсованої фази, застосовується важливе спрощення - відсутність пов'язання фаз. Інше спрощення пов'язане з застосуванням відомого заходу - розчленування тривимірної задачі на двовимірні, однією з яких є осесиметрична течія через ґратки в нескінченним числом тонких лопаток. Проте, навіть в такій постановці задача залишається надто складною. Це пов'язано, зокрема, зі змішаним (до-й надзвуковим) характером течії і можливою появою розривів газодинамічних функцій, а також необхідність урахування складних фізичних процесів, що відбуваються під час конденсації пари.

Для розв'язання таких задач великі можливості постають при використанні скінченно-різницевої схем наскрізного розрахунку. При цьому розрахунок здійснюється однаково у всій області без явного виділення розривів. Проблема вибору оптимального розрахункового методу та відповідної різницевої схеми є багатоплановою та достатньо складною. Виконаний в дисертації аналіз застосування різних існуючих різницевоїх схем щодо розв'язання задач газової динаміки показав, що з урахуванням особливостей задачі, яка розглядається, найбільш прийнятною слід вважати одну з ефективних різницевоїх схем чисельного інтегрування систем рівня гіперболічного типу,

відому як схема С.К.Годунова. Різниця - схема "розпаду розриву", яку покладено в підґрунтя цього методу, економічна, фізична і проста в реалізації на ЕОМ. Метод було перевірено на багатьох задачах газодинаміки для однофазних середовищ: одновимірних та багатовимірних, стаціонарних і нестаціонарних.

Ефективне застосування цієї різницевої схеми зумовлено виконанням ряду вимог, які покладено в підґрунтя побудови чисельного методу. Це, насамперед, добра адаптованість розроблених на його підґрунті алгоритмів щодо особливостей течій, які розраховуються. Не менш важливим властивістю є монотонність різницевої схеми.

Стаціонарний розв'язок знаходиться за допомогою застосування процесу встановлення за часом. У задачах газової динаміки такий засіб використовують для розрахунку стаціонарних течій в областях, що містять в собі вони дозвукової та надзвукової течії.

Записана далі в дисертації система рівнянь Ейлера для просторової й осесиметричної течії ідеального газу в підґрунтях для переходу до математичного опису більш складної задачі течії пари в нерівноважних конденсаціях. З цією метою вона повинна бути доповнена рівняннями та членами, що описують фазовий перехід. Задача побудови відповідної системи рівнянь, а також результати чисельного розв'язку викладені у розділі 3.

Утворення крупнодисперсної вологи і ерозія елементів проточної частини. У комплексі задач аналізу й удосконалення процесів у ступенях парових турбін одне з найважливіших місць посідають питання моделювання взаємодії вологи з елементами проточної частини. Наслідком такої взаємодії, що призводить до ерозійного спрацювання цих елементів, є погіршення показників економічності та надійності турбомашин.

В турбомашинах, що експлуатуються, під спрацювання підпадає увесь тракт, що омивається потоками пари. Аналіз умов, в яких знаходяться окремі елементи обладнання, показує, що найбільш значним і постійним видом спрацювання у проточній частині є ерозія вхідних кромок робочих лопаткових апаратів останніх ступенів, викликана високошвидкісною дією крупнодисперсної вологи, яка надходить на вхідні кромки лопаток з великими негативними кутами атаки. Під час вивчення цієї проблеми можна виділити три основні задачі:

1) створення на підґрунті аналізу властивостей ерозійного середовища та фізичних явищ її взаємодії з твердою поверхнею (робочою лопаткою) методу прогнозування інтенсивності пошкоджень;

2) оцінка міри небезпеки ерозійних пошкоджень;

3) розробка комплексу заходів, що дозволять уникнути чи зменшити пошкодження від ерозії.

Очевидно, що усі три задачі тісно взаємопов'язані, і розв'язання двох останніх в аналогічній мірі залежить від першої. Разом з тим, незважаючи на великий об'єм досліджень на експериментальних установках з ерозійного спрацювання матеріалів, а також численний аналіз виявлених випадків ерозії в турбінах, зараз немає ще єдиної точки зору щодо механізму ерозії і, як наслідок, щодо підходу до побудови моделі ерозії.

Створення комплексної математичної моделі ерозії загалом передбачає розробку двох взаємопов'язаних проблем:

- вивчення реакції матеріалу по навантаженню крапельними потоками;

- визначення параметрів ерозійного середовища.

Вирішення цих питань ускладнюється тим, що зазначені фактори змінюються в процесі взаємодії з деталями крапельних потоків. Крім того, між впливовими краплями вологи та деталлю виникає проміжна система (плівка, частинки відбитої рідини), яка ускладнює оцінку величини пошкоджень. У деяких випадках ерозійне спрацювання слід розглядати в поєднанні з корозією металу під впливом тривалих середовищ.

Відзначені труднощі побудови комплексної математичної моделі ерозії лопаткових апаратів істотно ускладнюють реалізацію поставленої задачі.

Виконаний у дисертації численний аналіз існуючих моделей краплеударної ерозії дозволив зробити такі висновки:

- проведення детального аналізу процесів у мікроструктурі матеріалу, що є необхідним для побудови деяких моделей, обмежується недостатністю існуючої інформації щодо надзвичайно складних фізичних процесів, які зумовляють у підсоумку ерозійне руйнування. Тому зараз доцільним був би феноменологічний підхід щодо створення моделі ерозії на тому її рівні, де прогнозується реакція матеріалу на імпульсну краплеударну дію ерозійного середовища. У цілому ж необхідно орієнтуватися на комбінування наближених аналітичних і чисельних розв'язків комплексу задач, що постають, з наступною ідентифікацією, ґрунтуючись на широкомасштабному експерименті:

- загальним і, мабуть, основним недоліком існуючих моделей є те, що в них не враховується кінетична пригода руйнування матеріа-

лів, які перебувають під навантаженням; Ця обставина не дозволяє достатньо обґрунтовано розглянути процес руйнування під час навантаження деталі високошвидкісними потоками вологи. Тому найбільш прогресивною зараз уявляється така постановка задачі, що ґрунтується на загальному кінетичному підході до проблеми руйнування твердих тіл;

-ровроблювана модель ерозії повинна складатись з двох частин. Перша містить в собі розв'язання задачі щодо визначення реакції матеріалу на високошвидкісне навантаження полідисперсними крапельними потоками, друга - визначення параметрів ерозійного середовища в проточній частині для розрахунку характеристик ввасмодії крапель з лопатковими апаратами.

На закінчення розділу розглянуті деякі положення системного підходу, що є істотними під час створення математичних моделей, а також сформульовані задачі дослідження.

Розділ 2 присвячений питанням розвитку класичної теорії конденсації для випадку нестационарного зародження нової фази під час швидких розширень пересохлої пари. Викладений матеріал умовно розділено на дві частини. У першій розглянуто задачу щодо визначення нестационарної швидкості зародження під час ізотермічної та неізотермічної нуклеації. Отримані результати є підґрунтям для опрацювання у другій частині розділу методу розрахунку еволюції функції розподілу під час росту та перевищаровування зародкових крапель, які утворилися. Він є зручним для використання в складних газодинамічних розрахункових схемах, а також в задачах синтезу оптимальної проточної частини.

Відповідно до викладеного у першому розділі процес нестационарного зародження нової фази описується у межах рівняння Зельдовича (I). Нестационарність задачі пов'язана з залежністю від часу зовнішніх умов й, отже, коефіцієнтів рівняння (I).

Основним малим параметром задачі вважається величина

$$\varepsilon = (\Delta/g_*)^2, \quad (7)$$

що характеризує гостроту максимуму рівноважної функції розподілу й обернено пропорційна величині активаційного бар'єра. Мета розв'язання задачі про зародження нової фази полягає в отриманні асимптотично точних при  $W_0/K_B T \rightarrow \infty$  виразів для функції розподілу зародків за розмірами, потоку та швидкості зародження.

Вірність отриманого розв'язку підтверджується його переходом

до відомого стаціонарного розв'язку Зельдовича при  $n \rightarrow 0$  та ілюструється порівнянням з чисельним експериментом.

На першому етапі розглядається випадок однопараметричної (ізо-термічної) нуклеації. Така ситуація може виникнути під час конденсації в газі-носії чи при малих коефіцієнтах конденсації  $\alpha_k$ , коли тепло швидко відводиться від краплі та температури пари і крапель збігаються. Результати використовуються як для порівняння з чисельним експериментом, так і для дальшого розвитку задачі в разі багатопараметричного зародження.

Введемо до розгляду наведений розмір  $u = g/g_*$  і перейдемо до нової невідомої функції  $w=f/N$ . Тоді вихідне кінетичне рівняння (I) може бути перетворено до вигляду

$$\frac{\varepsilon}{2} \frac{\partial}{\partial u} \frac{D}{D_*} \frac{\partial w}{\partial u} + \frac{D}{D_*} \frac{W'}{W_*} \frac{\partial w}{\partial u} - nuw = \tau_{\text{рел}} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\varepsilon}{2} nu \frac{\partial w}{\partial u}. \quad (8)$$

Граничні умови до (8), так як і до вихідного рівняння (I) вивчаються в вимог пристайності кінетичної та рівноважної функції розподілу для зародків малих розмірів  $g \ll g_*$  та обмеженості повного числа зародків у системі

$$w(u, t) \rightarrow 1 \text{ при } u \rightarrow 0; \quad w(u, t) \rightarrow 0 \text{ при } u \rightarrow \infty. \quad (9)$$

Нестаціонарність зовнішніх умов виявляється в рівнянні (8) через параметр "n".

При асимптотично малих значеннях  $\varepsilon$  рівняння (8) є рівнянням з малим параметром при другій похідній та особливих точках при  $u=1$ , де  $W'=0$ . Математичний спосіб розв'язання, використаний в цій роботі, є найбільш близьким до методу асимптотичних розкладань, що зрощуються.

Оскільки параметри зовнішнього середовища змінюються слабо за час  $\tau_{\text{рел}}$ , а граничні умови (9) не залежать від часу, то в області колокритичних розмірів встановлюється квазістаціонарний розподіл, що описується рівнянням

$$\varepsilon \frac{d}{du} \frac{D}{D_*} \frac{dw}{du} + \frac{D}{D_*} \frac{2W'}{W_*} \frac{dw}{du} - 2nuw = \varepsilon nu \frac{dw}{du}. \quad (10)$$

Підкреслимо, що незважаючи на повільність, яка передбачається, (в одиницях  $\tau_{\text{рел}}$ ) зміни зовнішніх умов, розподіл, що розглядається,

не є близьким до стаціонарного. Це пов'язано з тим, що безрозмірна величина "n", яка містить похідну за часом від асимптотично великого параметра  $W_0/K_B T \sim \varepsilon^{-1}$  може становити коло одиниці й більше.

Знайдений асимптотично точний розв'язок рівняння (10) дозволяє одержати вираз для функції розподілу та швидкості зародження рідкої фази. У вихідних змінних результат має вигляд:

$$f(g, t) = \frac{1}{2} N(g, t) \Gamma(n+1) e^{n \left( \frac{25}{12} - \ln 3 \right) \left( \frac{\Delta}{g_0} \right)^n} I^{\text{erfc}} \left( \frac{g - g_0}{\Delta} \right); \quad (11)$$

$$\begin{aligned} I &= I_{\text{ст}} \Gamma(n+1) \left[ 2e^{-\frac{25}{12}} \frac{W_0}{K_B T} \frac{g_0 - g_0}{g_0} \right]^{-n} = \\ &= I_{\text{ст}} \Gamma(n+1) \left[ 6e^{-\frac{25}{12}} \frac{W_0}{K_B T} \frac{\Gamma_0 - \Gamma_0}{\Gamma_0} \right]^{-n}; \quad (12) \end{aligned}$$

$$n = \frac{4\pi}{3} g_0^4 (q/K_B T) v_M^{-2} (\alpha_K \beta \ln S)^{-1} \varepsilon. \quad (13)$$

В (11)–(13)  $\Gamma$  – гамма-функція;  $g_0$  – початковий розмір зародка, який може бути вибраним в інтервалі  $\Delta < g_0 - g_0 < g_0$ ;  $v_M$  – молекулярний об'єм рідкої фази;  $\beta$  – частота співударання молекул з одиничною поверхнею;  $S$  – ступінь пересичення;  $q$  – теплота фазового переходу в розрахунку на молекулу;  $\varepsilon = -\frac{\partial}{\partial T} (\ln T)$  – швидкість охолодження.

Виконана оцінка членів, відкинутих під час переходу до квазі-стаціонарного рівняння (10), показує, що отриманий розв'язок (11), (12) адекватний розв'язку вихідного рівняння (1) в широкому діапазоні значень показника нестационарності "n".

Вирази (11), (12) являють собою узагальнення відомого розв'язку Зельдовича-Френкеля (2), (4) у разі залежних від часу зовнішніх умов. Порівняно зі стаціонарним вони містять в собі додатковий параметр "n", який характеризує швидкість зміни величини активаційного бар'єра. Легко впевнитись, що стаціонарний розв'язок впливає з (11), (12) при  $n \rightarrow 0$ .

Отримані результати для ізотермічного зародження с підґрунтям для дальшого розвитку задачі у разі багатопараметричного зародження.

Багатопараметричність процесу зародження під час конденсації пари пов'язана з її неізотермічністю. Виконані оцінки показують, що умові ізотермічності нуклеації відповідають значення  $\alpha_k < 0,01$ . Разом з тим наявні знання про  $\alpha_k$  дуже суперечливі. Ряд даних свідчить про те, що  $\alpha_k$  може бути помітно більше зазначеної величини. Тому під час аналізу процесу конденсації в турбіні слід розглянути неізотермічну ситуацію, що виникає при відносно повільному відведенні тепла від зародка. Вираз для розрахунку швидкості зародження у цьому разі зберігає вигляд (12), де теплові ефекти, однак, перенормовують значення стаціонарної швидкості зародження та показника нестационарності "n".

$$I_{ст}^{неіз} = \frac{\lambda}{\lambda + \frac{K_B}{C_M} (q/K_B T)^2} I_{ст}; \quad (14)$$

$$n = \frac{4}{3} \pi r_0^4 (q/K_B T)^3 v_M^{-2} (\alpha_k \lambda \frac{C_M}{K_B} \beta \ln S)^{-1} z, \quad (15)$$

де  $C_M$  — теплоємність рідини в розрахунку на молекулу, а величина  $\lambda$  характеризує теплообмін між зародком і паром;  $I_{ст}$  визначається за формулою Зельдовича-Френкеля (4).

Як видно з порівняння (13) і (15), неізотермічність процесу зародження крім розглянутого вище перенормування  $I_{ст}$  істотно ( $(\lambda C_M / K_B)^{-1}$  разів) збільшує нестационарні ефекти. Відзначимо також, що оскільки  $\lambda \sim \alpha_k^{-1}$ , в ситуації, яка розглядається, показник "n" не залежить від  $\alpha_k$ . Ця обставина може зіграти важливу роль для однозначної інтерпретації результатів експериментів, де дані про  $\alpha_k$  валишаються, як вже зазначалось, найменш визначеними.

Результати дослідження структури нестационарного джерела зародків нової фази використовуються далі для побудови універсального методу розрахунку процесу конденсації. Отримана у дисертації система рівнянь, яка є повним аналогом інтегрального рівняння (6), дозволяє здійснювати розрахунки для довільних умов тепломасообміну під час конденсації в широкому діапазоні швидкостей розширення робочого тіла, що визначають рівень впливу нестационарних ефектів. Для етапу зародження вона має такий вигляд:

$$\dot{N}_3 = 3\dot{\Gamma}_{ккк} N_2; \quad \dot{N}_2 = 2\dot{\Gamma}_{ккк} N_1 + J_0^2; \quad \dot{N}_1 = \dot{\Gamma}_{ккк} N_0 - J_0; \quad \dot{N}_0 = J;$$

$$J = I_{\text{ст}} \frac{\mu}{\ln S} \Gamma(n+1) \left( 6 \frac{W}{k_B T} e^{\frac{25}{12}} \right)^{-n}; \quad (16)$$

$$\delta = \left\{ \frac{\mu}{\exp(\mu) - 1} \ln \left[ \frac{2}{\pi} \frac{1 - \exp(-\mu)}{\mu} \right] - 1 \right\} r_*;$$

$$\dot{r}_{\text{ккк}} = \alpha_K \beta v_M' \left[ 1 - \exp(-\mu) \right];$$

$$n = \frac{4\pi}{3} r_*^4 (q/k_B T) v_M'^{-2} (\alpha_K \beta \mu)^{-1} \approx; \quad \mu = \frac{\lambda \ln S}{\lambda + \frac{k_B}{C_M} (q/k_B T)^2};$$

де  $\Omega_\nu = \int_{r_*}^{\infty} r_K^\nu f(r_K) dr_K$  ( $\nu=0,1,2,3$ ) - моменти функції розподілу

крапель за розмірами.

Система (16) є узагальненням широко розповсюдженого зараз методу "моментних рівнянь", справедливою лише для припущень "стаціонарної" теорії, у разі довільних умов зародження.

Аналогічно для заключного етапу конденсації, що настає під час зниження пересичення та виключає випаровування утвореної раніше деякої частини вологи й ріст крупних крапель, можна записати:

$$\begin{aligned} \dot{\Omega}_\nu &= \nu \alpha_K \beta v_M' \Omega_{\nu-1} \left\{ 1 - \exp \left[ \mu \left( \frac{r_* \Omega_{\nu-2}}{\Omega_{\nu-1}} - 1 \right) \right] \right\}, \quad \nu = 2, 3; \\ \dot{\Omega}_0 &= -\frac{3}{4} \alpha_K \beta v_M' \mu \Omega_0 r_* R^{-2}; \\ \Omega_1 &= \left( \frac{8}{9} \Omega_0 \Omega_2 \right)^{1/2}; \quad R = \left( \frac{9}{8} \frac{\Omega_2}{\Omega_0} \right)^{1/2}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для оцінки ефективності запропонованого методу розрахунку процесу конденсації у дисертації виконано численні розрахунки

дослідження в використанні систем рівнянь (16), (17). Розглядалась течія як зі сталю , так і з періодичною за часом швидкістю розширення  $Q$ . Отримані результати порівнювались як з розповсюдженими в літературі "стаціонарними" методами опису конденсації, так і з "еталонним" розв'язком, точність якого відповідає точності вихідних рівнянь теорії. Для його отримання в роботі проведено сумісне пряме розв'язання нестационарного кінетичного рівняння Зельдовича (1) та інтегрального співвідношення (6). Під час чисельної реалізації цієї задачі замість континуального рівняння (1) розглядався його дискретний аналог. Стаціонарний опис здійснювався на підґрунті двох моделей. У першому випадку розглядалась система рівнянь для моментів функції розподілу, отримана за припущенням про незалежність швидкості росту краплі від її радіуса; у другому - початковий розмір зародків, що утворюються, передбачався рівним критичному, а для швидкості зародження в рівнянні (6) використовувалось стаціонарне значення.

З виконаного порівняння випливає, що для усіх розглянутих випадків в широкому діапазоні швидкостей розширення результати розрахунків за запропонованим в роботі методом практично не відрізняються від "еталонних" і є істотно більш точними порівняно з результатами розрахунків за аналогічними "стаціонарними" методами, які існують в літературі (рис.1,2). В той же час використання методу значно спрощує обчислення порівняно з "чисельним експериментом", що дозволяє рекомендувати його для включення в газодинамічні розрахункові схеми під час аналізу складних просторових течій.

Для оцінки можливостей методу були також виконані розрахунки процесу конденсації в прямих соплах і проведено порівняння з даними фізичного експерименту. Збіжність результатів можна вважати вдовільною.

Розділ 3 присвячений розробці чисельного методу розв'язання задачі про осесиметричну течію пари, що нерівномірно конденсується, в ступені великої вільності. Відповідна система рівнянь газодинаміки в циліндричній системі координат має такий вигляд:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial r} = \bar{f} \quad (18)$$

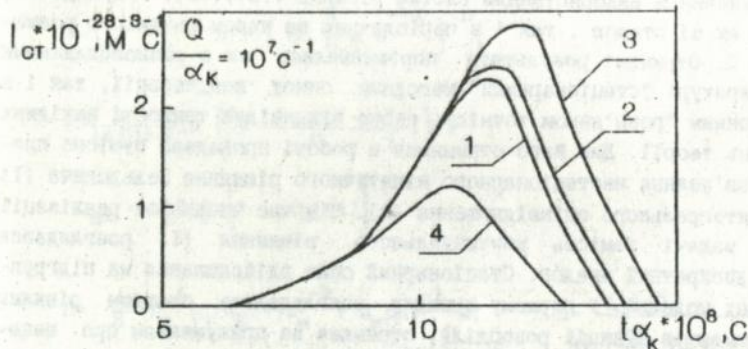


Рис.1. Залежність швидкості зародження від часу, визначена на підґрунті різних методів  
 1 - чисельний експеримент;  
 2 - метод, що пропонується;  
 3 - метод "моментних рівнянь";  
 4 - "стаціонарний інтегральний" метод

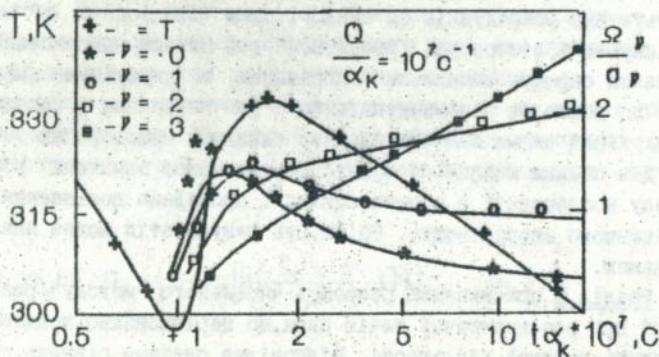


Рис.2. Залежність температури та безрозмірних моментів від часу  
 суцільні криві - чисельний експеримент;  
 точки - розрахунок за методом, що пропонується

$$\vec{a} = \begin{bmatrix} \rho r k \\ \rho r w_z k \\ \rho r w_r k \\ \rho r^2 w_\varphi k \\ \rho r k (e + \frac{1}{2} \dot{\psi}^2) \\ \rho r k \gamma \\ \rho r k \Omega_0 \\ \rho r k \Omega_1 \\ \rho r k \Omega_2 \end{bmatrix}; \quad \vec{a} = \begin{bmatrix} \rho r w_z k \\ r k (\rho w_z^2 + p) \\ \rho r w_r w_\varphi k \\ \rho r^2 w_z w_\varphi k \\ \rho r k (1 + \frac{1}{2} \dot{\psi}^2) w_z \\ \rho r w_z k \gamma \\ \rho r w_z k \Omega_0 \\ \rho r w_z k \Omega_1 \\ \rho r w_z k \Omega_2 \end{bmatrix};$$

$$\vec{b} = \begin{bmatrix} \rho r w_r k \\ \rho r w_z w_r k \\ r k (\rho w_r^2 + p) \\ \rho r^2 w_r w_\varphi k \\ \rho r k (1 + \frac{1}{2} \dot{\psi}^2) w_r \\ \rho r w_r k \gamma \\ \rho r w_r k \Omega_0 \\ \rho r w_r k \Omega_1 \\ \rho r w_r k \Omega_2 \end{bmatrix}; \quad \vec{f} = \begin{bmatrix} 0 \\ r \left( \frac{\Delta p}{\theta} \frac{\partial \varphi_{s2}}{\partial z} + p \frac{\partial k}{\partial z} \right) \\ \rho k + \rho (w_\varphi + \omega r)^2 k + r \left( \frac{\Delta p}{\theta} \frac{\partial \varphi_{s2}}{\partial r} + p \frac{\partial k}{\partial r} \right) \\ - r (2 \rho w_r \omega r k + \frac{\Delta p}{\theta}) \\ \rho w_r r^2 \omega^2 k \\ - \bar{\omega} \rho r k \\ \rho r \dot{\omega}_0 \\ \rho r \dot{\omega}_1 \\ \rho r \dot{\omega}_2 \end{bmatrix}$$

У (18)  $w_z, w_r, w_\varphi$  - складові вектора швидкості: осьова, радіальна, колова;  $k$  - стиснення потоку;  $e, i$  - внутрішня енергія й ентальпія вологої пари;  $\omega$  - кутова швидкість обертання;  $\theta$  - кутівий крок гребки;  $\Delta p$  - перепад тиску на лопатці;  $\varphi_{s2}(r, z)$  - форма міжлопаткової поверхні  $S_2$ ;  $\bar{\omega} = \frac{d(1-\gamma)}{dt}$  - швидкість фазових перетворень;  $\gamma$  - ступінь сухості пари.

Система (18) доповнюється рівнянням стану. Швидкість фазових перетворень  $\bar{\omega}$  визначається з (16), (17).

Чисельне розв'язання поставленої газодинамічної задачі здійснюється на підґрунті використання різницевої схеми першого

порядку апроксимації С.К.Годунова. Розв'язок шукається в розрахунковій області (рис.3), розбитій на чотирикутні фіксовані комірки сітки, що утворена двома сім'ями кривих. Комірки заповнюють розрахункову область без зазорів, не мають накладень та не виходять за межі області.

Розрахунок проводиться послідовними кроками за часом. Окремий крок розрахунку полягає в тому, що за величинами параметрів в момент часу  $t$  визначаються такі ж величини, які є постійними по кожній комірці, в момент часу  $t + \Delta t$ , де  $\Delta t$  - величина кроку за часом. Рівняцям рівняння, що дозволяють визначити перехід від стану задачі в момент часу  $t$  до стану в момент часу  $t + \Delta t$ , отримуються на підґрунті інтегральних законів зберігання маси, імпульсу та енергії. Величини на межах комірок визначаються із розв'язку одновимірної задачі про розпад довільного розриву газодинамічних параметрів. Для параметрів рідкої фази використовується умова "замороженості" фазових перетворень під час переходу через ударну хвилю.

Для проведення обчислень на гранях комірок, прилеглих дозовільних меж розрахункової області, потрібно залучити додаткову інформацію, котра задається у вигляді граничних умов, форма яких визначається конкретним змістом задачі, що розв'язується. Для характерних ситуацій, що відповідають дозвуковим режимам течії на вільних межах (по нормальних до межі складових швидкості) задаються:

- на вхідній вільній межі - параметри гальмування та вектор швидкості (розподіл кутів входу потоку в ґратку);
- на вихідній вільній межі - розподіл тисків;
- на кореневій і периферійній меридіанних твірних - умова непроходження;
- у лопаткових областях - умова непроходження та стиснення каналу  $K$ . У безлопаткових областях  $K-I$ .

Паралічені умови на вільних межах доповнюються характеристичними співвідношеннями.

Початкове наближення у принципі може вибиратися достатньо довільно. Очевидно, однак, що його вдалий вибір, достатньо близький до розв'язку, може збільшити швидкість затухання хвильового процесу та скоротити тривалість устанавлення. Виконані розрахунки показали, що для задачі, яка розглядається, гарні результати досягаються під час найбільш простого способу задання початкових умов, коли лише у вихідному перерізі задаються параметри виходу, а в решті

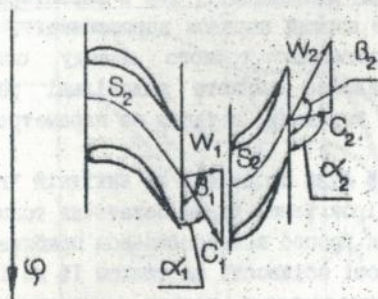
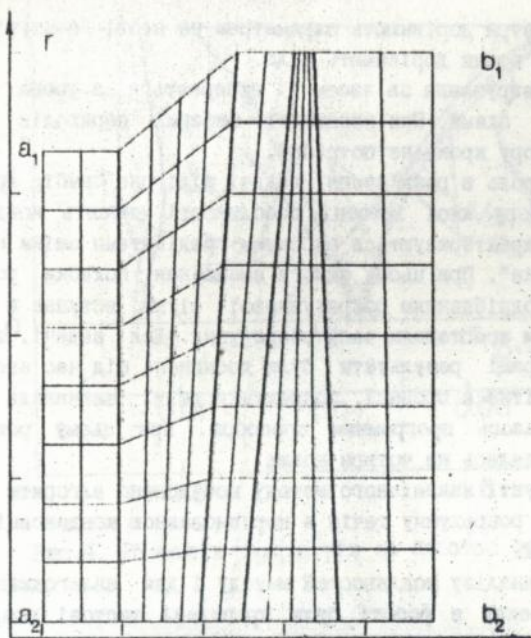


Рис.3. Розрахункова область з сіткою

області параметри дорівнюють параметрам на вході в ступінь. Швидкості при  $t=0$  всюди дорівнюють нулю.

Крок інтегрування за часом  $\Delta t$  вибирається з умови стійкості розрахункової схеми. При наявності фазових переходів додаткові умови для вибору кроку не потрібні.

Важливу роль в розв'язанні задачі відіграє вибір різничевої сітки, в побудову якої істотні особливості вносять конденсаційні процеси, які характеризуються високими градієнтами зміни параметрів в зоні "стрибка". При цьому вимога зменшення похибки розрахунку, пов'язана з подібненням розрахункової сітки, вступає в суперечність з різким зростанням часу розрахунку. Для задачі, що розглядається, найкращі результати були досягнені під час застосування заходу, коли сітка в процесі розрахунку двічі завнавала згущення, яке здійснювалось програмним способом. При цьому розрахункова комірка розпадалась на чотири нових.

На підґрунті викладеного методу побудовано алгоритм і розроблено програму розрахунку течії в нерівноважній конденсації через ступінь турбіни.

З метою аналізу можливостей методу і для налагодження програмного комплексу в роботі були проведені тестові розрахунки в прямих соплах. Отримані результати показали, що незважаючи на певне "розмазування" стрибка конденсації, яке є характерним для схеми С.К.Годунова, котра має перший порядок апроксимації, застосування в чисельній схемі достатньо точного методу опису процесу конденсації в цілому дозволяє одержати задовільні результати за місцем початку фазового переходу, а також по параметрах за межами стрибка.

Розрахунки ступенів були проведені на вихідній "грубій" сітці, що має розміри  $8 \times 20$  комірок. Таким чином, остаточно тонка сітка містила в собі 2560 комірок. Процес встановлювався приблизно за 1000 ітерацій при заданій умові вільності за тиском 1% на 100 ітерацій. Точність обчислень контролювалась шляхом розрахунків на різних сітках і перевірок виконання закону зберігання маси. Інформація про результати розрахунку видавалась на друк у вигляді масивів газодинамічних параметрів і параметрів рідкої фази.

На рис. 4-5 як приклад наведені деякі результати розрахунку течії в ступені з  $D_{\text{ср}}/l=2,5$  для таких вихідних даних:  
 $p_0=23,5 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ ;  $\rho_0=0,156 \text{ кг/м}^3$ ;  $p_2=3,9 \cdot 10^3 \text{ Н/м}^2$ ;  $\omega=942,5 \text{ І/с}$ .  
 Суцільні лінії на рисунках відносяться до течії з конденсацією.

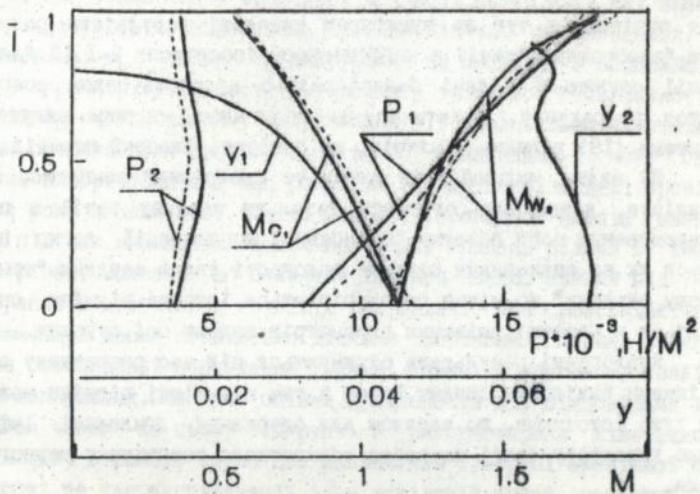


Рис.4. Розподіл параметрів за висотою ступеня

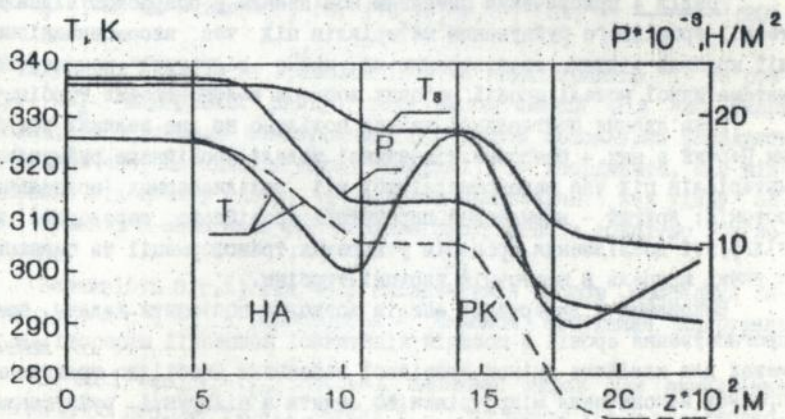


Рис.5. Розподіл параметрів на середньому діаметрі ступеня

Для порівняння тут же пунктиром наведені результати розрахунків для "замороженої" течії з коефіцієнтом ізоентропи  $k=1,13$ . Для реалізації останньої задачі безпосередньо застосовувався розроблений метод розрахунку. Практично це досягалось прямим вилученням з системи (18) рівнянь і членів, що описують фазовий перехід.

Як видно, розроблений метод та програмний комплекс, що його реалізує, дозволяють отримати детальну картину течії в ступені. Говташування зони початку інтенсивної конденсації легко визначається як за значеннями ступеня вологості, так і завдяки "температурному стрибку", що чітко спостерігається. Істотні відмінні спостерігаються в картині змінення параметрів вдовж осі ступеня.

Аналогічні результати отримуються під час розрахунку ступенів з іншими вихідними даними. Разом з тим кількісні відмінні можуть бути дуже істотними, що загалом для одержання докладної інформації щодо характеру течії потребує конкретного розрахунку кожного ступеня.

В цілому проведені чисельні дослідження показали високу надійність методу під час розрахунку течії в конденсаціях в ступенях у широкому діапазоні їх вихідних характеристик.

Розділ 4 присвячений питанням, пов'язаним з розробкою підвалин теорії ерозійного руйнування матеріалів під час високошвидкісної дії крапель рідини, та створення на цьому підґрунті комплексної математичної моделі ерозії робочих лопаток вологопарових турбін.

Розв'язання поставленої задачі поділено на два великих розділи. Перший з них - розробка кінетичної моделі ерозійного руйнування матеріалів під час високошвидкісної дії полідисперсних крапельних потоків; другий - визначення параметрів ерозійного середовища на підґрунті дослідження процесів утворення, трансформації та переносу крупних крапель в проточній частині турбіни.

Виконаний у дисертації аналіз дозволив поставити задачу щодо прогнозування ерозії з позиції кінетичної концепції міцності. В її межах для надійних оцінок ерозійної небезпеки необхідно врахування процесу накопичення мікротріщин, що лежить в підґрунті руйнування, який відбувається протягом усього терміну експлуатації деталі, котра перебуває під навантаженням. З цієї метов в роботі введено критерій ерозійного руйнування у вигляді такого кінетичного рівняння:

$$\frac{d\phi}{dt} = - \frac{d\omega}{dt} = \begin{cases} -C(\sigma_v / \phi)^k, & \sigma_v > 0; \\ 0 & \sigma_v \leq 0; \end{cases} \quad (19)$$

де  $C > 0$ ,  $k \geq 0$  - константи ерозійної міцності матеріалу, які визначаються в результаті випробувань зразків під час навантаження, що контролюється;  $\sigma_y$  - нормальне напруження на площадці з нормаллю  $y$ ;  $\phi$  -  $I - \omega$  - параметр суцільності;  $\omega$  - параметр ерозійної пошкодженості.

У дисертації показано, що рівняння (19) задовільно відповідає фізичним особливостям процесу ерозійного руйнування і може бути ефективно використано під час розробки математичної моделі ерозії.

Для розв'язання цієї задачі в роботі проведено аналіз навантаження під час високошвидкісної взаємодії крапель рідини в твердодов поверхнею. Показано, що складний імпульс навантаження під час удару краплі в достатньою точністю для задачі, яка розглядається, можна замінити двома послідовно діючими імпульсами, перший з яких визначає розтягальні напруження у хвилі Релея, а другий - квазістатичні напруження. Виконано оцінки протяжності дії відповідних імпульсів за часом. На цьому підґрунті в використанні кінетичного рівняння (19) отримано вираз для визначення сумарної ерозійної пошкодженості за час експлуатації  $t_0$  в довільній точці поверхні, що зростається краплями рідини, для кожної з груп крапель, які формують полідисперсний потік

$$\int_0^{\omega} (I - \omega)^k d\omega = 2\pi n_i t_0 \int_{r_{R1}}^{\omega} r dr \int_0^{t_{d1}} C [\sigma_1(r, t)]^k dt, \quad (20)$$

де індекс "1" вказує на приналежність до групи крапель "1- го" розміру;  $r_R$  - внутрішній радіус зони навантаження під час удару краплі;  $n$  - крапельне навантаження (кількість крапель, що випадають в одиницю часу на одиницю площі поверхні);  $r$  - координата, яка відрахована від центру удару;  $t_d$  - час дії навантаження від удару однієї краплі;  $\sigma$  - найбільше розтягальне напруження в точці, що розглядається.

Залежність  $\sigma(r, t)$  від часу визначається умовою всередині інтервалу  $0 < t < t_d$  а просторова - законом затухання напружень вздовж осі  $r$ .

З (20) при  $t_0 = t_{1нк}$  та  $\omega = 1$  впливає вираз для визначення прихованого періоду ерозії деталі  $t_{1нк}$ , що взаємодіє з полідисперсним потоком крапель

$$t_{1нк} = \frac{1}{2\pi(k+1)C} \left\{ \sum_{i=1}^{i_{max}} n_i \left[ \frac{2\sigma_{R1}^k r_{R1}^k t_{R1}^k}{k-4} + \frac{A_i}{2} x \right] \right\} \quad (21)$$

$$X \left[ \frac{1}{w_{H1}' d_{k1} \Gamma_{R1}^{2k-4} (k^2 - 3k + 2)} - \frac{1}{C_R \Gamma_{R1}^{2k-3}} - \frac{1}{2k^2 - 5k + 3} \right] \Bigg\}$$

$$\text{де } A = \left[ d_k^2 w_H' \left( \frac{1-2\nu}{E} \right) p'_{\text{сер}} \right]^k C_{\text{уд}}^{-k};$$

$\sigma_R, t_R$  - максимальне розтягальне напруження в хвилі Релея та час його дії;  $w_H'$  - нормальна складова швидкості співударяння;  $d_k$  - діаметр краплі;  $C_R$  - швидкість поширення хвилі Релея;  $C_{\text{уд}}$  - швидкість ударної хвилі в рідині;  $\nu$  - коефіцієнт Пуассона;  $p'$  - осереднений тиск на плямі контакту.

Вираз (21) є основним результатом теорії, оскільки величина інкубаційного періоду  $t_{\text{інк}}$ , що характеризує властивості матеріалу, який розглядається, з точки зору його здатності протистояти руйнуванню може бути інтерпретована як універсальна характеристика спрацювання.

Отримані результати, що дозволяють оцінювати тривалість інкубаційного періоду спрацювання матеріалу деталі в точках поверхні, які нас цікавлять, при заданих параметрах краплеударного навантаження є підґрунтям для розв'язання більш загальної задачі про рух ерозійних руйнувань в глибину деталі.

Система рівнянь для визначення глибини спрацювання має такий вигляд:

$$Y = Y_0 \left( \frac{w'}{w'_{\text{інк}}} - 1 \right), \quad Y \leq Y_M;$$

(22)

$$Y = \tilde{a} Y_0 \frac{w'}{w'_{\text{інк}}} \left( \frac{Y}{Y_M} \right)^{\tilde{b}} \exp \left( \tilde{c} \frac{Y}{Y_M} \right), \quad Y \geq Y_M;$$

$$Y_M = \frac{\tilde{a} \tilde{c}^{\tilde{b}}}{1 - \tilde{a} \tilde{c}^{\tilde{b}}} Y_0; \quad w'_{\text{інк}} = \frac{\omega_0 t_{\text{інк}}}{\tilde{c}} \sum_{i=1}^{i_{\text{max}}} n_i d_{k1}^3.$$

де  $w'$  - кількість рідини, що падає на одиницю площі поверхні, яка експонується;  $w'_{\text{інк}}$  - те ж за час інкубаційного періоду;  $\tilde{a}, \tilde{b}, \tilde{c}, Y_0$  - константи ерозійної міцності, які є характерними для заданого матеріалу.

Виконані з використанням (21), (22) розрахункові дослідження показали задовільний збіг в результатами експериментів, отриманими на краплеударних стендах, що дає можливість в успіхом використо-

увати розроблену модель ерозійного руйнування матеріалів під час створення комплексного методу прогнозування щодо спрацювання лопаткових апаратів. Одним з найважливіших етапів, що визначають його побудову, є визначення параметрів ерозійного середовища. Ця задача розв'язується на підґрунті рівняння руху крапель, яке для спрощень, що традиційно приймаються, пов'язаних з виділенням переважного механізму дії на краплю — сили аеродинамічного опору, записується таким чином:

$$\frac{dC'}{dt} = 0,75 C_x d_k^{-1} \rho^* \rho^{*-1} C_{\text{відн}} (\vec{C}'' - \vec{C}'), \quad (23)$$

де  $C_{\text{відн.}} = |\vec{C}'' - \vec{C}'|$  — швидкість парового потоку відносно краплі;  
 $C_x$  — коефіцієнт опору краплі, що рухається в потоці.

Оцінка необхідних для розрахунку розгону крапель початкових умов в кромковому слідві напрямного апарату, що несе найбільш ерозійнонебезпечні краплі, здійснювалась на підвалинах виконаних автором експериментальних досліджень.

Вивчення дрібнення пливки вологи на сході з кромки соплових лопаток здійснювалось на пародинамічному стенді Ленінградського політехнічного інституту (ЛПІ) за допомогою швидкісної кінозйомки для режимів течії, що є характерними для останніх ступенів потужних парових турбін.

В результаті вивчення отриманих кінофільмів була в'ясована картина сходу пливки з кромки лопаток і дрібнення вологи в кромковому слідві. Показано, що швидкості руху крапель в кромковому слідві безпосередньо після відриву від суцільної частини пливки становлять 0,3–0,5 м/с. Формування спектра крапель здійснюється на відстані (4–5)  $10^{-3}$  м від кромки лопаток, а швидкість крапель при цьому становить (5–10) м/с.

Виконані з використанням експериментальних даних оцінки критичного значення критерію дрібнення  $We_{\text{кр}}$  дають величину, що є близькою до 14, на яку звичайно вказують в літературі за умов дрібнення, характерних для турбомашин.

Витрати вологи в потоці вторинних крапель в слідах напрямних лопаток визначались на підґрунті дослідів автора та інших дослідників. Виміри кількості вологи у пливці, що рухається по профільних поверхнях соплових лопаток, виконані автором на пародинамічному стенді та на експериментальній турбіні в ЛПІ, показували, що

відносні витрати в пливці для характерних значень вологості перед ступенем  $u_0 = 3-7\%$  становлять  $\sim 18-20\%$  від усієї вологості, що надходить на ступінь. При цьому у верхній половині лопатки зосереджено  $\sim 2/3$  усієї вологості, яка осідає в пливку, що добре погоджується з експериментальними даними інших дослідників по розподілу вологості за висотою ступеня.

Отримані результати використані під час розв'язання задачі про розгін крапель в кромковому слідві за рівнянням (23). Розподіл крапель за розмірами згідно з численними експериментальними даними приймався нормальним, а модальний розмір краплі - таким, що дорівнює половині максимального. Задача про розгін до співударення з робочою лопаткою розв'язувалась для кожної групи крапель, що характеризується деяким середнім радіусом  $r_{k1}$ . Таким чином формувались матриці параметрів краплеударного навантаження  $\| \psi_{n1, j} \|$ ,  $\| p_{2, j} \|$  відносно кромки робочої лопатки у вибраному перерізі. Індекс "1" визначає групу крапель, а індекс "j" - номер порції ерозійнонебезпечної вологості, що послідовно розганяється в робочому каналі, до яких належить 1-а група крапель.

Розроблений метод розрахунку робочих лопаток на ерозію реалізовано у вигляді комплексу програм.

У дисертації виконані розрахункові дослідження на моделі ерозії стосовно до робочих лопаткових апаратів останніх ступенів турбін К-220-44, К-1000-60/1500, КТ-40/32-6.4, ТК-200 (Польща) та ін. Порівняння ерозійної небезпеки в точках по обводах профілів у вибраних перерізах здійснювалось по відношенню до найбільш "слабкого" місця входної кромки - точці, де швидкість ерозії  $E_e$  максимальна. Як приклад на рис.6 наведено порівняльну оцінку інтенсивності ерозійного спрацювання на поверхні робочої лопатки останнього ступеня турбіни КТ-40/32-6.4 для ряду перерізів в найбільш ерозійнонебезпечній зоні за висотою ( $1 > 0,7$ ). Результати розрахунків дозволяють виділити ділянки підвищеної ерозійної небезпеки й дати кількісну оцінку темпів ерозійного спрацювання на профільній поверхні робочої лопатки, що дає можливість обґрунтованого призначення зон зміцнення входної кромки.

Виявлено істотний вплив на інтенсивність спрацювання структури вологості, що зумовляє для підвищення вірогідності прогнозу особливу важливість питання щодо врахування у моделі ерозії полідисперсності впливаючих крапельних потоків. Проведені оцінки впливу деяких конструктивних і режимних параметрів ступенів на характе-

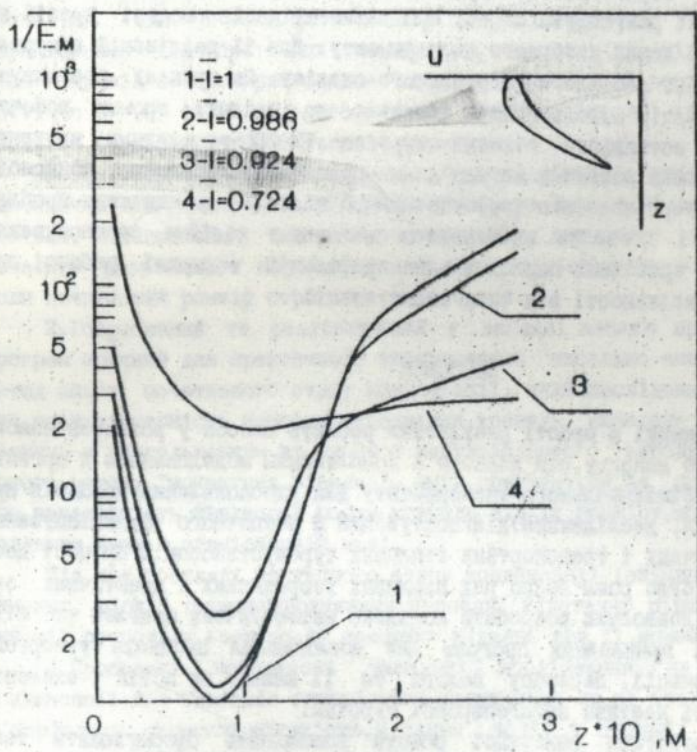


Рис.6. Порівняльна оцінка ерозійної небезпеки в різних точках поверхні робочої лопатки

ристки процесу ерозійного руйнування.

З метою розширення можливостей методу для прогнозування абсолютних характеристик спрацювання за умов експлуатації турбін в дисертації розглянуто задачу про ідентифікацію моделі еросії на підґрунті даних натурального експерименту. Для її реалізації використано апарат лінійного регресійного аналізу. Як приклад розглянуто ідентифікацію моделі еросії стосовно до входних кромek робочих лопаток останнього ступеня турбіни ТК-200 за даними натурних спостережень розвитку ширини зони спрацювання. Показано, що комбінація детермінованого і статистичного підходів до вивчення проблеми еросії дозволяє здійснювати достатньо надійне прогнозування розвитку ерозійних пошкоджень на профільній поверхні робочої лопатки в залежності від часу експлуатації.

#### ВИСНОВОК

Отримані в роботі результати роблять внесок у розвиток нового наукового напрямку, пов'язаного з комплексним моделюванням й організацією обчислювального експерименту для удосконалення процесів проектування, дослідження, діагностування й безпечного функціонування енергетичних і транспортних теплових турбоустановок. В процесі досліджень було розв'язано ряд важливих теоретичних і практичних задач, які дозволили розробити комплекс математичних моделей та відповідних прикладних програм для дослідження процесів утворення, трансформації, переносу вологи та її впливу на потік і елементи проточної частини вологопарової турбіни.

Результати виконаної роботи дозволяють сформулювати такі основні висновки.

1. Поставлена й розв'язана задача про нестационарне зародження рідкої фази в потоках переохолодженої пари, що швидко поширюється. Опис початкового етапу конденсації здійснено на підґрунті нестационарного кінетичного рівняння Вельдовича. Знайдено асимптотично точний розв'язок основного кінетичного рівняння у випадку залежних від часу зовнішніх умов, що визначають рівень метастабільності вихідної фази, й одержано вираз для швидкості зародження крапель. Розглянуті як ізотермічна ситуація, коли температури пари та крапель збігаються, так й істотно неізотермічний випадок, що виникає при слабкому теплообміні між паром та краплями.

Нестационарність процесу зародження характеризується параметром "n", що визначає зміну активаційного бар'єра процесу зародження  $W_a/K_B T$  за характерний час встановлення стаціонарного розподілу. Для значень показника нестационарності "n", що є характерними для проточних частин турбін ( $n \sim 1$ ) відмінність розв'язку від стаціонарного дуже істотна. При слабкій нестационарності  $n \rightarrow 0$  із загального виразу для швидкості зародження випливає відома формула Зельдовича-Френкеля.

Нестационарна швидкість зародження на відміну від стаціонарної однозначно пов'язана з початковими розмірами зародків, що утворюються. Встановлення такого взаємозв'язку дозволило збільшити точність розв'язання порівняно з чисто стаціонарним розглядом, коли початковий розмір строго не визначався.

2. Розроблений та реалізований у вигляді пакета прикладних програм зручний для практичного використання чисельно-аналітичний метод опису початкового етапу конденсації, який послідовно враховує нестационарність процесу зародження крапель. Виведена система рівнянь є узагальненням на випадок нестационарного зародження відомого методу "моментних рівнянь", який ґрунтується на припущенні про незалежність швидкості росту крапель від їх розміру, що є справедливим лише в стаціонарній межі.

Під час розгляду наступного етапу конденсації (змінення пересичення, ріст і перевипаровування крапель) кінетичне рівняння для функції розподілу зведено до ланцюжка рівнянь для її моментів.

3. Проведені комплексні чисельні дослідження на моделі конденсації для випадків однорідного розширення як зі сталю, так і з періодично змінною швидкістю, а також течій у соплах. Виконане порівняння з "еталонною" розрахунковою схемою, що включає прямий розв'язок основного кінетичного рівняння, з результатами експериментальних досліджень на соплах, а також з розрахунками за іншими відомими в літературі методами, що ґрунтуються на стаціонарному розгляді процесу конденсації, показало високу ефективність і задовільну точність методу в широкому діапазоні швидкостей розширення.

4. Розроблені математична модель і чисельний метод для розв'язання задачі дослідження плоских та осесиметричних течій пари, що нерівноважно конденсується. Метод використовує отримані результати опису процесу конденсації й ґрунтується на застосуванні монотонної скінченно-різницевої схеми наскрізного рахунку С.Р. Годунова.

Виконані розрахункові дослідження стосовно до течій з нерів-

новажною конденсацією в прямих соплах і в турбінному ступені великої віяльності.

Метод реалізовано у вигляді комплексу програм, який дозволяє отримувати всі необхідні термогазодинамічні параметри течії та характеристики рідкої фази. Комплекс програм може використовуватись для проведення детальних розрахунків структури течії в проточних частинах вологопарових турбін.

5. Сформульована та реалізована задача про побудову математичної моделі ерозії лопаткових матеріалів, що зазнають ударної дії високошвидкісних полідисперсних потоків крапельної вологи. Під час створення моделі використано підхід, що враховує кінетичну природу руйнування матеріалу, який перебуває під навантаженням.

Проаналізовано кінетичне рівняння, запропоноване для опису накопичення мікродфектів суцільності еродуючого матеріалу. При цьому введений до розгляду феноменологічний параметр ерозійної пошкодженості дозволив встановити взаємозв'язок фізичних процесів, що протікають в матеріалі деталі, з процесами навантаження й отримати таким чином інформацію про стан поверхневого шару еродуючої деталі.

Одержано залежність для результативної ерозійної пошкодженості в точці поверхні, що розглядається, за час експозиції за умов дії полідисперсних крапельних потоків. На цьому підґрунті, а також в урахуванням аналізу навантаження, що виникає під час взаємодії краплі рідини з матеріалом деталі, отримано вирази для розрахунку величини прихованого періоду спрацювання. Показано роль інкубаційного періоду як фактора, що визначає спрацювання на усіх стадіях, і здійснено розвиток моделі для прогнозування ерозійного процесу в цілому.

6. На підґрунті кінетичної моделі ерозії та визначення характеристик ерозійнонебезпечних крапельних потоків у проточній частині вологопарової турбіни розроблено та реалізовано у вигляді програмного комплексу метод прогнозування інтенсивності ерозійного руйнування віхідних кромки робочих лопаткових апаратів вологопарових турбін.

Виконані різноманітні чисельні дослідження на моделі ерозії. Виявлені найбільш істотні фактори, що впливають на інтенсивність ерозійного спрацювання. Показані можливості методу з точки зору вибору раціональних характеристик проточної частини за прийнятим критерієм ерозійної небезпеки.

7. Сформульована задача про ідентифікацію моделі ерозії на підґрунті результатів натурних досліджень закономірностей спрацювання. Виконані розрахунки щодо прогнозування абсолютних значень характеристик зон ерозійних пошкоджень вхідних кромek робочих лопаток вологопарових ступенів турбін. Показана доцільність комбінування детермінованого та статистичного підходів до прогнозування ерозійного спрацювання.

8. У результаті виконаних досліджень запропоновано універсальний математичний інструмент у вигляді банку прикладних програм для дослідження дії процесів утворення, переносу та трансформації вологи на характеристики проточних частин парових турбін.

### Публікації по роботі

1. Возможности внутриканальной сепарации влаги в ступенях Ч.Н.Д. паровых турбин /И.И.Кириллов, А.И.Носовицкий, В.Н.Амелишкин, А.Л.Шубенко, Б.В.Наумчик//Энергомашиностроение.- 1966:VII.-С.14-15.

2. Фаддеев И.П., Шубенко А.Л. Исследование движения пленок конденсата на вогнутой поверхности соплевой турбинной лопатки //Тез. докл. науч.-техн. конф., посвященной 50-летию Великой Октябрьской Социалистической революции.-Ленинград, 1967.-С.8.

3. Фаддеев И.П., Шубенко А.Л. Движение пленки конденсата на вогнутой поверхности соплевой турбинной лопатки // Энергомашиностроение.-1968.-№2.- С.47.

4. Дробление пленок влаги на скосе с кромek соплевых лопаток паровых турбин /И.И.Кириллов, И.П.Фаддеев, В.Н.Амелишкин, А.Л.Шубенко // Инж.-физ. журн.- 1968.-Т.15, №1.- С.85-90.

5. Влагулавлывание в направляющем аппарате мощных паровых турбин / И.И.Кириллов, А.И.Носовицкий, Б.В.Наумчик, А.Л.Шубенко // Теплоэнергетика.- 1968.-№8.- С.21-23.

6. Исследование влагуудаления на моделях последних ступеней мощных паровых турбин / И.И.Кириллов, Б.В.Наумчик, А.И.Носовицкий, А.Л.Шубенко //Тр. Ленингр. политех. ин-та. Энергомашиностроение.- Л.: Машиностроение, 1969.-№10.- С.45-51.

7. Кириллов И.И., Фаддеев И.П., Шубенко А.Л. Сепарирущая способность решеток турбинных профилей, работающих на влажном паре // Энергомашиностроение.- 1970.-№10.- С.40-41.

8. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Образование зародышевых капель в сильно переохлажденном паре.-Харьков, 1982.-26 с.- (Препринт /АН

УССР. Ин-т пробл. машиностроения; N175).

9. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Неравновесное влагообразование в потоке переохлажденного пара // Математические модели процессов и конструкций энергетических турбомашин в системах их автоматизированного проектирования: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф. Готвальд, 1982. - Харьков: Ин-т пробл. машиностроения АН УССР, 1982. - Ч. I. - С. II7.

10. Шубенко-Шубин Л.А., Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. О построении кинетической модели эрозивного разрушения материала турбинных лопаток // Там же. - С. II8.

11. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Рост и перегрев зародышевых капель при конденсации сильно переохлажденного пара // Пробл. машиностроения. - 1983. - Вып. I9. - С. 80-85.

12. Шубенко-Шубин Л.А., Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. О построении математической модели кинетики разрушения материала турбинных лопаток при эрозивном воздействии влаги // Пробл. машиностроения. - 1983. - Вып. I9. - С. 3-7.

13. Шубенко-Шубин Л.А., Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. О кинетической модели разрушения материала при эрозивном воздействии влаги // Пробл. прочности. - 1984. - N1. - С. 95-99.

14. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Нестационарное ядрообразование при быстром изменении термодинамических параметров исходной фазы // Докл. АН УССР. Сер. А. - 1984. - N8. - С. 70-73.

15. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Неравновесное влагообразование в потоке переохлажденного пара // Proc. VIII-th Conf. Steam Turbines of Large Output. Karlovy Vary, 1984. - Praha, 1986. - Vol. 2. - P. 281-287.

16. Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Модель расчета длительности скрытого периода эрозивного разрушения материала при воздействии капельных потоков. - Харьков, 1985. - 38 с. - (Препринт /АН УССР. Ин-т. пробл. машиностроения; N209).

17. Шубенко А.Л. Некоторые задачи математического моделирования процессов в проточной части влажнопаровых турбин // Математические модели процессов и конструкций энергетических турбомашин в системах их автоматизированного проектирования: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф. Готвальд, 1985. - Харьков: Ин-т пробл. машиностроения АН УССР, 1985. - Ч. I. - С. I28-I29.

18. Шубенко А.Л., Ковалев А.С. Расчет осесимметричного потока неравновесно конденсирующегося пара в ступенях влажнопаровых турбин // Там же. - С. I30-I31.

19. Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Кинетическая модель эрозии

материалов турбинных лопаток, испытывающих каплеударное нагружение полидисперсными потоками // Там же. - С.131-132.

20. Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Модель процесса образования и переноса эрозионноопасных капель и оценка параметров эрозионной среды в проточной части влажнопаровых турбин // Там же. - С.133:

21. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Скорость образования и начальный размер зародышей при конденсации переохлажденного пара // Там же. - С.129-130.

22. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Неравновесное нестационарное влагообразование и распределение капель по размерам в потоках переохлажденного пара // Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах: Тез. докл. VII. всеобщ. конф., 1985. - Л.: НИО Центр. котлотурбин. ин-т, 1985. - Т.3. - С.326-327.

23. Шнейдман В.А., Шубенко А.Л. Нестационарное ядрообразование в переохлажденном паре. Аналитическое описание и численные расчеты // Изв. АН СССР, Механика жидкости и газа. - 1986. - №2. - С.169-171.

24. Шубенко-Шубин Л.А., Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Кинетическая модель процесса и оценка инкубационного периода разрушения материалов, подвергаемых воздействию капельных потоков // Теплоэнергетика. - 1987. - №2. - С.46-50.

25. Shubenko A.L., Kovalsky A.E. On prediction of erosion wear of details on the basis of its kinetic model by impact of liquid drop on polydisperse flows of moisture // Proc. 7-th Int. Conf. on Erosion by Liquid and solid Impact. - Cambridge, 1987. - Paper 14. - P.1-6.

26. Шубенко А.Л. Особенности моделирования физических процессов при течении конденсирующегося и влажного пара в ступенях турбомашин // Математическое моделирование процессов и конструкций энергетических и транспортных турбинных установок в системах их автоматизированного проектирования: Тез. докл. респ. науч.-техн. конф. Гутвальд, 1988. - Харьков: Ин-т пробл. машиностроения АН УССР, 1988. - Ч.1. - С.117-118.

27. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Зарождение, рост и переиспарение капель жидкости в потоках переохлажденного пара // Там же. - С.118-119.

28. Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Прогнозирование интенсивности каплеударной эрозии рабочих лопаток паровых турбин // Там же. - С.120-121.

29. Методика проектирования оптимальных эрозионностойких

проточных частей паровых турбин / Л.А.Шубенко-Шубин, А.Л.Шубенко, Ф.А.Стоянов, М.И.Роговой, А.Э.Ковальский // Там же.-С.3-4.

30. Комплекс программ для определения осесимметричного течения пара с неравновесной конденсацией в ступени турбомашин А.Л.Шубенко, В.Я.Качуринер, А.С.Ковалев, А.М.Тревгода, В.В.Гнесин // Там же.-С.126-127.

31. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Нестационарное неизотермическое зарождение жидкой фазы при конденсации // Докл.АН УССР.Сер.А.-1968.-№1.-С.69-70.

32. Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Кинетическая модель процесса эрозии деталей при каплеударном нагружении полидисперсными потоками влаги // Проб.машиностроения,-1968.-Вып.30.-С.4-8.

33. Шнейдман В.А., Шубенко А.Л. Нестационарное вскипание перегретой жидкости // Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации: Тез. докл. второй всесоюз. конф., 1968. -Рига: Риж. политех. ин-т, 1968. -Т.1. -С.176-178.

34. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. Распределение по размерам капель жидкости при их зарождении, росте и переиспарении // Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации: Тез. докл. II всесоюз. конф., 1968. -Рига: Риж. политех. ин-т, 1968. -Т.2. -С.145-147.

35. Оптимальное проектирование эрозиянстойких проточных частей тепловых турбин /А.Л.Шубенко, Ф.А.Стоянов, М.И.Роговой, А.Э.Ковальский// Научные основы конструирования машин: Тез. докл. I-й Международной конф. МОИТ ПАИ (Варшава) и ИМаш АН СССР (Москва).-Льблнна, Польша, 1968. -С.23-25.

36. Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Кинетическая модель каплеударной эрозии рабочих лопаточных аппаратов паровых турбин // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1969.-№5.-С.94-101.

37. Шубенко А.Л., Ковалев А.С. Моделирование процесса спонтанной конденсации при пространственном течении пара в ступени турбины // Кипение и конденсация: Сб. науч. тр.- Рига: Риж. политех. ин-т.-1969.-С.81-88.

38. Шубенко А.Л., Ковалев А.С., Гнесин В.В. Расчет течения пара со спонтанной конденсацией в турбинной ступени большой верности // Proc. IX-th Conf. Steam Turbines of Large Output. - Karlovy Vary, 1969. - Vol.2. -P.206-210.

39. Шнейдман В.А., Шубенко А.Л. Формирование и эволюция спектра размеров частиц жидкой фазы при неравновесной гомогенной конденсации // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа.-1990.-№1.-С.108-116.

40. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А. О формировании спектра размеров частиц жидкой фазы в потоке переохлажденного пара // Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах: Тез. докл. VIII всесоюз. конф., 1990. - Л.: НПО Центр. котлотурбин. ин-т, 1990. - Т. П. - С. 48.

41. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А., Ковалев А.С. Моделирование и расчет неравновесной конденсации при течении переохлажденного пара в элементах турбомшины // Там же. - Т. Ш. - С. 320-321.

42. Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Прогнозирование эрозионного износа рабочих лопаток влажнопаровых турбин методами математического моделирования // Там же. - С. 378-379.

43. Кийжановски Е., Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Совершенствование методов расчета каплеударной эрозии рабочих лопаток паровых турбин. // Теплоэнергетика. - 1990. - №7. - С. 58-62.

44. Шубенко А.Л. Моделирование процесса зарождения новой фазы при расширении переохлажденного пара в проточной части турбомшины // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1990. - Т. 36, №6. - С. 90-97.

45. Шубенко А.Л. Математическое моделирование и совершенствование расчетных методов исследования процессов в ступенях влажнопаровых турбин // 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. Эмиев, 1991. - Харьков: Ин-т пробл. машиностроения АН УССР, 1991. - Ч. I. - С. 70-71.

46. Шубенко А.Л., Ковальский А.Э. Моделирование и идентификация процесса каплеударной эрозии рабочих лопаток влажнопаровых турбин: // Там же. - С. 72-73.

47. Шубенко А.Л., Шнейдман В.А., Ковалев А.С. Расчет течения пара с неравновесной конденсацией в турбинной ступени: // Там же. - С. 73.

48. Krzyzanowski J.A., Kowalsky A.E., Shubenko A.L. Some Aspects of Erosion Prediction of Steam Turbine Blading. // Trans. of the ASME J. of Eng. for Gas Turbines and Power. - 1994. - Vol. 116, №2. - P. 442-451.

458546

Ав 30.721

Відповідальний за випуск докт.техн.наук Палагін А.А.

---

Підл. до друку 12.07.1994 р. Формат 60x90 1/16  
Папір друк. Н1. Ум. друк. арк. 2,0. Обл.-вид. арк. 1,02  
Тираж 100 прим. Сам. N 182

---

Ротапринт Інституту проблем машинобудування НАН України  
310046, Харків, вул. Пожарського, 2/10