

І. Г. Шараєвський*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна*

Розпізнавання аварійного режиму погіршеної тепловіддачі в каналах перспективних легководних реакторів із надкритичними термодинамічними параметрами

Ключові слова:

реактори з надкритичними термодинамічними параметрами теплоносія, теплообмін на поверхні тепловіддачі тепловидільних елементів, автоматична діагностика, спектральна структура діагностичних сигналів

Розглянуто визначальні фізичні відмінності виникнення режиму погіршеної тепловіддачі в активній зоні реакторної установки з надкритичними термодинамічними параметрами (НКТП). Конкретизовано головні діагностичні принципи автоматичної ідентифікації аварійного теплогідрравлічного режиму погіршеної тепловіддачі, що має бути своєчасно виявлений у створюваних перспективних реакторах із НКТП теплоносія. Сформульовано засадничі принципи побудови перспективних систем внутрішньореакторного контролю для легководних реакторів із НКТП. Показано, що ядро математичного забезпечення для перспективних систем внутрішньореакторного контролю реакторів із НКТП легководного теплоносія мають складати інтелектуальні процедури автоматичного розпізнавання початкових фаз виникнення псевдокипіння, що передують руйнації оболонки тепловидільного елемента в режимі погіршеної тепловіддачі. Запропоновано математичну модель превентивної діагностики аварійного режиму погіршеної тепловіддачі, яка має у своїй основі процедури побудови роздільної гіперплощини в багатовимірному ознаковому просторі.

Вступ

Проблема суттєвого підвищення рівня експлуатаційної безпеки та надійності обладнання сучасних АЕС із реакторами основних енергетичних типів має комплексний і системний характер. Не меншою мірою гострота і складність цієї міждисциплінарної проблеми проявляє себе і під час створення перспективних ядерних реакторів (ЯР) з надкритичними термодинамічними параметрами (НКТП) легководного теплоносія для майбутніх АЕС. Відповідно до виконаного в роботах [1, 2] аналізу стану розробок пілотних проєктів дослідно-промислових зразків легководних ЯР з НКТП теплоносія, які активно розробляються в низці провідних країн світу, реалізація цієї проблеми зумовила необхідність попереднього

виконання значного обсягу наукових досліджень, які тривають і донині. Дійсно, створення цих реакторних установок (РУ) наступного, четвертого, покоління поставило на порядок денний наявність всебічно обґрунтованої інформації з низки фундаментальних проблемних питань фізики РУ з НКТП, включаючи практично недосліджену теплофізику виникнення та динаміку розвитку специфічних для цього типу ЯР аварійних теплогідрравлічних процесів (ТГП) на поверхні тепловидільних елементів (ТВЕЛ). Зазначені ТГП розглядаються розробниками цих перспективних реакторів як необхідна передумова для успішного створення цієї новітньої ядерної енерготехнології, історія розробки якої налічує кілька десятиліть. Відомо, що на початку досліджень цієї технології понад півстоліття тому технічні переваги перспективних

© І. Г. Шараєвський, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

реакторів із НКТП, як вважали ініціатори їхнього створення, є незаперечними. При цьому зазначені переваги мали включати не тільки високі техніко-економічні показники термодинамічного циклу ЯР з НКТП, але й підвищений рівень безпеки та надійності цих РУ. Але висока технологічна складність розроблюваної енергетичної технології зумовила гостру потребу в наявності нових, поглиблених фізичних уявлень про ТГП, що реалізуються в активній зоні (АкЗ) уже на молекулярному рівні. З'ясувалося, що ці процеси є критично важливими для адекватного опису мікрокінетики пристінкового шару надкритичного теплоносія на поверхні ТВЕЛ, аварійної динаміки теплогідрравлічних режимів у структурі тепловидільних збірок (ТВЗ) ЯР з НКТП, а також молекулярної кінетики умов виникнення та розвитку аварійного режиму погіршеної тепловіддачі, що є характерним лише для РУ з НКТП легководного теплоносія. Очевидно, що відсутність у розробників ЯР з НКТП фундаментальних знань із цих проблемних питань сьогодні зумовила значний дефіцит визначальної інформації для створення фізично обґрунтованої розрахункової бази, без якої прийнятна надійність теплогідрравлічного розрахунку ЯР з НКТП не може бути забезпечена.

Як засвідчили нещодавні публікації, зокрема [3, 4], сучасний етап досліджень та розробок перспективних ЯР з НКТП зумовив також пріоритет невідкладного вирішення комплексу актуальних проблем із забезпечення експлуатаційної безпеки зазначених реакторів. Визначальним є те, що реалізація цієї безпекової проблематики має на меті розробку якісно нового функціоналу контролю створюваних ЯР з НКТП, який за своїм діагностичним змістом принципово відрізняється від наявних детермінованих методів оперативного моніторингу та діагностики технічного стану АкЗ легководних РУ з докритичними параметрами теплоносія, насамперед таких як ВВЕР.

У цьому контексті в нещодавній публікації [5] було конкретизовано ті визначальні фізичні відмінності виникнення та розвитку аварійних ТГП на поверхні ТВЕЛ, що є характерними для створюваних ЯР з НКТП. З урахуванням визначальних аспектів аварійної динаміки розвитку режиму погіршеної тепловіддачі в АкЗ цих РУ в зазначеній роботі фізично обґрунтовано принципів відмінності між процедурами діагностики кризових з точки зору теплообміну явищ на поверхні ТВЕЛ, що здатні виникати у водоохолоджуваних докритичних ЯР типу ВВЕР, та виявленням аварійного режиму погіршеної тепловіддачі

в ЯР з НКТП. З огляду на зазначені фізичні відмінності аварійних режимів у РУ з до- та надкритичними термодинамічними параметрами в роботі [5] системно обґрунтована обмеженість застосування детермінованих підходів, що реалізуються комплексами оперативного моніторингу поточного експлуатаційного стану АкЗ реакторів типу ВВЕР. Утім, відповідно до даних роботи [4], функціональна обмеженість детермінованих алгоритмів моніторингу АкЗ, що їх реалізують сучасні системи внутрішньореакторного контролю (СВРК) легководних докритичних РУ, є добре відомою фахівцям.

З огляду на вищезазначене та з урахуванням розглянутих у [5] визначальних особливостей молекулярної кінетики процесу виникнення та розвитку на поверхні ТВЕЛ в ЯР з НКТП режиму погіршеної тепловіддачі доцільно відзначити головні діагностичні принципи автоматичної ідентифікації цього аварійного теплогідрравлічного режиму, що має бути своєчасно виявленим в АкЗ ЯР з НКТП перспективною СВРК. При цьому слід підкреслити, що: а) виникнення аварійного режиму погіршеної тепловіддачі має бути автоматично виявлене на початковій фазі його утворення; б) ядро математичного забезпечення для створюваних СВРК надкритичних РУ мають складати насамперед інтелектуальні процедури автоматичного розпізнавання потенційно небезпечних початкових фаз виникнення режиму погіршеної тепловіддачі в ТВЗ; в) висока інформативність спектральних складових діагностичних сигналів, сформованих на основі режимних параметрів АкЗ РУ з НКТП, передусім тиску (зокрема, акустичної емісії процесу псевдокипіння на поверхні ТВЕЛ) та флуктуацій нейтронного потоку в АкЗ (особливо нейтронного шуму в ТВЗ) має бути ефективно використана в розроблюваних алгоритмах превентивної діагностики режиму погіршеної тепловіддачі.

Таким чином, на основі представленого вищестислого огляду сучасної проблематики безпеки перспективних ЯР з НКТП слід відзначити таке. По-перше, розробка безпекового функціоналу перспективних технічних засобів оперативного контролю цих РУ з метою раннього автоматичного виявлення аварійних ТГП в їхніх ТВЗ є актуальним науковим завданням. По-друге, розробка методології та відповідних математичного та програмно-алгоритмічного забезпечення для цього функціоналу безпеки є очевидним пріоритетом. Практичній реалізації зазначених актуальних завдань і присвячено представлену публікацію.

Аналіз фізичних передумов превентивної діагностики погіршеної тепловіддачі в надкритичних реакторах

Відомо [3–5], що аварійний режим погіршеної тепловіддачі може непередбачувано виникати на поверхні ТВЕЛ у каналах із НКТП навіть за умови підтримання безперервного штатного охолодження цієї поверхні плинном турбулентного надкритичного теплоносія. При цьому інтегральною фізичною ознакою виникнення зазначеного ТГП, що є притаманним лише надкритичній термодинамічній зоні, вважається значне погіршення тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, яка непередбачувано стає аномально низькою, чим спричиняє її перегрів та невідворотну наступну руйнацію. З огляду на фізичні прояви режиму погіршеної тепловіддачі в аналізі [5] на основі відомих результатів досліджень інтегральних теплогідравлічних характеристик та мікрофізичних ефектів в умовах плину води надкритичних параметрів у циліндричному експериментальному каналі, що їх наведено в попередній роботі [4], було обґрунтовано наукову гіпотезу щодо фізичної природи та динаміки розвитку цього аварійного режиму тепловіддачі. Показово, що головні теплофізичні засади цієї гіпотези пояснюють процес виникнення та подальшого еволюційного погіршення тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ в області НКТП, у першу чергу, ефектами молекулярної кінетики, що реалізуються в пристінковому шарі надкритичного теплоносія. Таким чином, відповідно до даних досліджень [4, 5], засадничими постулатами сформульованої гіпотези є такі:

- 1) між фазовим переходом в умовах кипіння з недогрівом за докритичних термодинамічних параметрів та процесом псевдофазового переходу в надкритичній області існує аналогія, основою якої є доведений факт визначального впливу фізики поверхневих ефектів на формування границь фазового розділу в до- та надкритичній області;

- 2) виникнення перших псевдопарових утворень у зоні НКТП, що їх генерують рухомі осердя турбулентних вихорів у пристінковому шарі в безпосередній близькості до поверхні ТВЕЛ, становить необхідну фізичну передумову для наступного переходу цього аномального теплогідравлічного стану поверхні тепловіддачі до її передаварійного режиму, яким є нестабільне псевдоплівкове кипіння;

- 3) подальша еволюція передаварійного режиму на основі коагуляції нестабільних псевдопарових утворень сприяє їхній гідродинамічній стабілізації

на поверхні ТВЕЛ і фізично зумовлює поступове погіршення тепловіддачі з цієї поверхні, яке відповідає умовам початку аварійного підвищення її температурного стану.

З огляду на розглянуту вище аварійну динаміку послідовної зміни характеру теплообміну в області НКТП у процесі виникнення та подальшого розвитку макромолекулярних ансамблів у вигляді псевдопарових утворень фізично обґрунтованим видається превентивний підхід до реалізації раннього виявлення аварійного режиму погіршеної тепловіддачі на основі автоматичного розпізнавання початку процесу псевдокипіння надкритичного теплоносія, що розглядається далі. З огляду на це та відповідно до даних досліджень [4, 5] простір діагностичних ознак, які можуть бути сформовані на основі спектральної структури сигналів акустичної емісії процесу псевдофазового переходу, дає змогу виявити визначальні особливості цієї трансформації, що реалізується на молекулярному рівні. Наочною ілюстрацією високої інформативності спектральних сигнатур цих сигналів, особливо в зоні початку псевдофазового переходу в області НКТП, можуть слугувати наведені на рис. 1 спектрограми початку псевдокипіння води в експериментальному циліндричному каналі з внутрішнім діаметром 6,3 мм та довжиною обігріву 0,6 м за величини тиску теплоносія $P = 23,5$ МПа; його масової швидкості $\rho w = 250$ кг/(м²с); вхідної температури $T_{\text{вх}} = 250$ °С та різних рівнів густини теплового потоку q з роботи [5].

У контексті аналізу частотної структури наведених на рис. 1 спектральних сигнатур пульсацій тиску надкритичного теплоносія в експериментальному каналі слід звернути увагу на їхні визначальні особливості. Так, спектр, представлений на рис. 1, а, відповідає умовам відсутності теплового навантаження поверхні тепловіддачі за наявності в експериментальному каналі циркуляції надкритичного теплоносія. Показово, що присутність у низькочастотній частині цього спектра інтенсивних спектральних складових акустичного шуму, що генерується в контурі за відсутності теплового навантаження поверхні тепловіддачі, свідчить про визначальний вплив на формування відповідного акустичного поля імпульсів тиску, що їх генерує насосна група контуру. Остання, відповідно до гідравлічної схеми стенду з роботи [4], забезпечує рух надкритичного теплоносія в експериментальному каналі. Крім того, показовим є спектр на рис. 1, б, зареєстрований за наявності суттєвого теплового навантаження робочої поверхні експери-

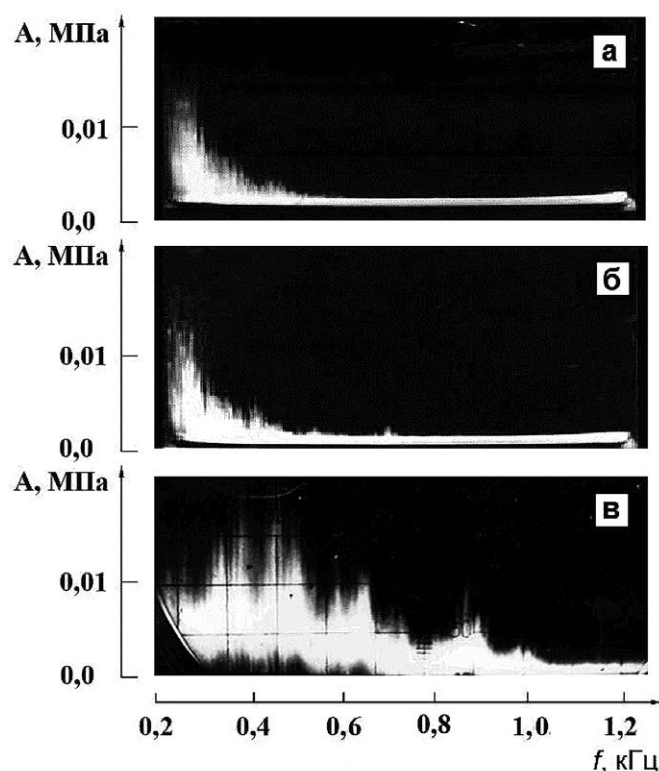


Рис. 1. Спектральна структура сигналів акустичної емісії початку псевдокипіння води в області НКТП у разі поступового підвищення густини теплового потоку за даними [5] (A – амплітуда пульсації, f – частота пульсації): а — $\rho w = 250 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$, $T_{\text{вх}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 0$ — теплове навантаження відсутнє; б — $\rho w = 250 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$, $T_{\text{вх}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 280 \text{ МВт/м}^2$ — псевдокипіння відсутнє; в — $\rho w = 250 \text{ кг/(м}^2\text{с)}$, $T_{\text{вх}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $q = 0,325 \text{ МВт/м}^2$ — початок псевдокипіння надкритичного теплоносія

ментального каналу. Тепловіддача від цієї поверхні реалізується в режимі турбулентної конвекції до однофазного потоку «гарячого газу» з надкритичного теплоносія, що рухається вздовж поверхні нагріву робочої ділянки каналу.

Характерним для спектра, зображеного на рис. 1, б, є збереження його низькочастотної структури, яка, подібно до спектра на рис. 1, а, є сформованою виключно акустичним шумом насосної групи циркуляційного контуру. З огляду на вищенаведені спектральні сигнатури показовою є статистична усталеність спектральних компонент на рис. 1, а і б та їхній низькочастотний характер, який свідчить про відсутність псевдофазового переходу на поверхні тепловіддачі в області НКТП. Цей висновок підтверджується експериментальними даними, що їх наведено в роботах [4, 5]. Звертає на себе увагу формування в спектральній структурі на рис. 1, в розвиненої високочастотної області, виникнення якої спричинено початком процесу псевдофазового переходу в умовах подальшого збільшення густини теплового потоку на поверхні тепловіддачі робочої ділянки експериментального каналу.

Відповідно до даних [4, 5], цей процес фізично проявляє себе як виникнення в каналі макромолекулярних утворень надкритичного теплоносія, що генеруються випадково розподіленими у пристінко-

вому шарі осердями турбулентних вихорів. Показовим у цьому контексті є той факт, що дані досліджень з аналізу спектральної структури акустичного шуму процесу кипіння докритичного теплоносія добре корелюють із вищезазначеною фізичною гіпотезою з роботи [5] щодо існування фізичної аналогії між процесами фазового та псевдофазового переходу, які реалізуються відповідно в докритичній та надкритичній термодинамічних областях. Саме про наявність такої аналогії наочно свідчить амплітудно-частотна структура спектрів акустичного супроводу основних режимів кипіння теплоносія, системний аналіз якої виконано в роботах [4, 5], а також характерний вигляд широкополосних спектральних ознак процесу псевдокипіння, представлених у наведених на рис. 1, в спектральній сигнатурі процесу акустичної емісії псевдофазового переходу в області НКТП.

Таким чином, з огляду на наведені вище результати аналізу фізичних передумов для реалізації процедур превентивної діагностики режиму погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в АкЗ ЯР з НКТП за шумами технологічних параметрів РУ необхідно підкреслити таке.

1. Мікрокінетичні процеси, що реалізуються у пристінковому шарі надкритичного теплоносія і зумовлюють утворення макромолекулярних ансамблів у вигляді псевдопарових утворень, є безпосередньою

причиною їхнього подальшого динамічного переходу до просторової коагуляції в безпосередній близькості до поверхні ТВЕЛ.

2. Просторова коагуляція псевдопарових утворень у плинні надкритичного теплоносія біля поверхні тепловіддачі ТВЕЛ призводить до теплової ізоляції цієї поверхні від турбулентного однофазного потоку «гарячого газу» і створює тим самим необхідні передумови для подальшого розвитку аварійного режиму погіршеної тепловіддачі.

3. Спектральні структури процесу акустичної емісії режимів псевдофазового переходу в області НКТП містять достатню фізичну інформацію щодо виникнення початкових фаз та можливої подальшої динаміки мікрокінетичних процесів, що реалізуються у пристінковому шарі надкритичного теплоносія.

4. Наявність статистичного зв'язку між режимом початку псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ та спектральними параметрами процесу акустичної емісії цього режиму слід розглядати як необхідну передумову для розробки обчислювальних процедур з автоматичного розпізнавання аварійного режиму погіршеної тепловіддачі на початкових стадіях його виникнення.

5. Обчислювальні алгоритми автоматичного розпізнавання початкових фаз процесу псевдокипіння у пристінковому шарі надкритичного теплоносія слід розглядати як функціональне ядро перспективних технічних засобів превентивної діагностики аварійного режиму погіршеної тепловіддачі у структурі СВРК створюваних ЯР з НКТП.

6. Розробка математичного та програмного забезпечення для реалізації процедур превентивної діагностики потенційно небезпечних нештатних теплогідрравлічних режимів АкЗ ЯР із НКТП має розглядатися як засаднича основа функціоналу безпеки перспективних надкритичних реакторів.

Таким чином, підсумовуючи наведені результати аналізу фізичних ознак аварійної динаміки процесу виникнення режиму погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в області НКТП, можна конкретизувати такі пріоритетні напрями наукових розробок та пов'язані з ними актуальні завдання зі створення функціоналу безпеки перспективних СВРК для створюваних ЯР з НКТП:

1) створення методології автоматичного розпізнавання початкових фаз виникнення процесу псевдофазового переходу в області НКТП;

2) розробка алгоритмічного та програмного забезпечення для реалізації процедур автоматичного

розпізнавання аномального теплогідрравлічного режиму початку псевдокипіння на поверхні ТВЕЛ за шумами технологічних параметрів АкЗ перспективних ЯР з НКТП;

3) відпрацювання методології превентивної діагностики АкЗ ЯР з НКТП на основі використання спектральних параметрів сигнатур акустичної емісії процесу псевдофазового переходу в експериментальному каналі в надкритичній області.

Очевидно, що важливою складовою конкретизованих вище напрямів розробок є насамперед математична формалізація розглянутої вище в загальних рисах фізичної концепції превентивної діагностики аварійного режиму погіршеної тепловіддачі в АкЗ ЯР з НКТП. З огляду на це математичній формалізації запропонованої в цій роботі комп'ютерної моделі автоматичного розпізнавання початкових фаз псевдофазового переходу та практичний перевірці цієї моделі присвячено наступні розділи цієї публікації.

Математична формалізація задачі превентивної діагностики режиму погіршеної тепловіддачі

З позицій конкретизованих у вступі до цієї публікації завдань щодо розробки та практичної реалізації запропонованого автором превентивного діагностичного підходу до раннього виявлення в АкЗ ЯР з НКТП початку виникнення на поверхні ТВЕЛ режиму погіршеної тепловіддачі, у роботі [5] теоретично обґрунтовано засадничі питання обчислювальної реалізації процедури автоматичного розпізнавання. Її головний принцип полягає в реалізації алгоритму ідентифікації двох різних класів фізичних об'єктів, зокрема теплогідрравлічних режимів, кожен з яких представлено окремим вектором у багатовимірному ознаковому просторі і компактно займає в ньому, відповідно до своєї приналежності, певну область. При цьому процедура розпізнавання невідомого вектора полягає у визначенні його орієнтації відносно до попередньо побудованої гіперповерхні, що розділяє дві компактні групи фізичних об'єктів, приналежність яких є попередньо відомою. Ці групи, що представлені кінцевими масивами спектральних реалізацій, становлять вихідну статистичну вибірку для попереднього навчання системи розпізнавання.

Запропонована модель автоматичної ідентифікації випадкових об'єктів передбачає застосування відомої в теорії розпізнавання образів концепції мінімізації середнього ризику формування помил-

кових діагностичних рішень. При цьому зазначена концепція мінімізації передбачає заміну невідомого функціоналу середнього ризику близькою за своїм змістом функцією $R_{\text{емп}}(\gamma)$. Реалізація цієї заміни передбачає виконання наведених нижче основних етапів з мінімізації функціоналу R_γ .

Етап 1. Пошук (на основі вибірки випадкових векторів розпізнаваних класів $X_1, X_2, \dots, X_r$) параметра $\gamma = \gamma^{\text{опт}}$, що забезпечує $\min R_{\text{емп}}(\gamma^{\text{опт}})$.

Етап 2. Визначення (на основі параметра $\gamma = \gamma^{\text{опт}}$) пошукової функції $G[\gamma^{\text{опт}}(X)]$.

У контексті аналізованого геометричного підходу до розпізнавання випадкових об'єктів визначальним є той факт, що реалізація вищевказаних етапів 1, 2 на основі методу впорядкованої мінімізації ризику фактично зводиться до формування в N -вимірному ознаковому просторі з апіорно заданою навчальною послідовністю, представленою кінцевими множинами $X_1 = x_1, \dots, x_a; X_2 = x_1, \dots, x_b$ гіперплощини Γ , що розділяє опуклі оболонки X_1 та X_2 множини $A(M=2)$ так, що $\rho = \max$. При цьому варто підкреслити, що дві кінцеві множини векторів (множина $X = x_1, \dots, x_a$ і множина $\bar{X} = \bar{x}_1, \dots, \bar{x}_b$) є розділними орієнтованою гіперплощиною в тому випадку, якщо для деякого $k < 1$ існує такий вектор φ , який забезпечує виконання нерівності

$$x_i^T \varphi \geq 1, i = 1, \dots, a; \bar{x}_j^T \varphi \leq k, j = 1, \dots, b. \quad (1)$$

Очевидно, якщо існує вектор φ , для якого виконується нерівність (1), то існує і множина векторів φ , що задовольняють цій умові.

Характерно, що серед однопараметричної (за параметром $k < 1$) спорідненості цих векторів існує вектор φ_0 , що визначає такий напрямок, на якому проєкції множин X і $\bar{X}$ є найбільш дистанційованими одна від одної, тобто

$$\varphi_0 = \arg \max_{\varphi} \left[\min_{x_i \in X} x_i^T \varphi - \max_{\bar{x}_j \in \bar{X}} \bar{x}_j^T \varphi \right]. \quad (2)$$

Цей вектор φ_0 й обумовлена ним розділяюча гіперплощина, а саме:

$$x\varphi_0 = C_0, \quad (3)$$

де

$$C_0 = \frac{\min_{x_i \in X} x_i^T \varphi_0 + \max_{\bar{x}_j \in \bar{X}} \bar{x}_j^T \varphi_0}{2}, \quad (4)$$

є оптимальними. При цьому гіперплощина відокремлює елементи множини $\bar{X}$ (для цих елементів виконується нерівність $x\varphi_0 < C_0$) від елементів множини X (для цих елементів спрацьовує нерівність $x\varphi_0 > C_0$). Крім того, зазначена гіперплощина найбільш віддалена від елементів об'єднаної множини $X \cup \bar{X}$. Геометрична інтерпретація алгоритму впорядкованої мінімізації ризику на основі формування оптимальної розділяючої гіперплощини представлена на рис. 2.

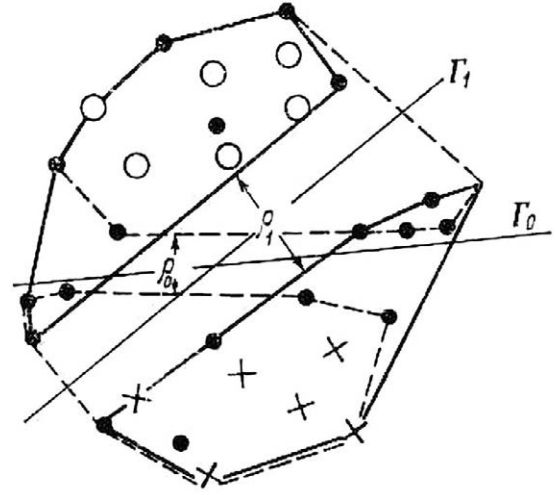


Рис. 2. Геометрична інтерпретація процедури автоматичного поділу спектральних сигнатур шатних та аномальних теплогідрравлічних режимів у багатовимірному ознаковому просторі на основі побудови оптимальної розділяючої гіперплощини

Показово, що для пошуку напрямного вектора φ_0 оптимальної розділяючої гіперплощини розглядається кінцева множина векторів Z , що сформована з векторів множин X і $\bar{X}$: $Z = \{z_j = x_i - \bar{x}_j\}, i = 1, \dots, a; j = 1, \dots, b$; (усього $a \times b$ елементів).

При цьому мінімальний за модулем вектор ψ_0 має задовольняти нерівності:

$$z_{ij} \psi^3 \geq 1, z_{ij} \in Z \quad (5)$$

У цьому зв'язку може бути доведено, що вектор ψ_0 збігається за напрямком з оптимальним вектором φ_0 , а величина $1/\|\psi_0\|$ є відстанню між проєкціями множин X і $\bar{X}$ на напрямок вектора ψ_0 . У результаті пошук вектора ψ_0 та обумовленої ним розділяючої гіперплощини зводиться до мінімізації функціоналу

$$I = \psi^T \psi \quad (6)$$

при виконанні обмежень (5). Іншими словами, розв'язувана задача фактично зводиться до задачі квадратичного програмування. Причому необхідні і достат-

ні умови мінімізації функціоналу (6) визначаються наслідком з теореми, яку наведено далі. Слід зазначити, що ця теорема свого часу була доведена М. Кунем та Г. Такером в теорії оптимізації. При цьому зазначена теорема формулюється в такий спосіб.

Теорема 1. Мінімальний за модулем вектор ψ_0 , що задовольняє умові (5), може бути представлений у вигляді

$$\psi_0 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b z_{ij} \alpha_{ij}^0, \quad \alpha_{ij}^0 \geq 0, \quad (7)$$

причому вектор параметрів α_{ij} відповідає умові

$$\alpha_{ia}^0 [z_{ij}^T - 1] = 0, \quad i = 1, \dots, a; \quad j = 1, \dots, b; \quad (8)$$

Показово, що серед множини всіх векторів ψ , що задовольняють нерівності (5), деякий вектор ψ , що забезпечує виконання умов (7) і (8) є мінімальним за модулем. Відповідно до зазначеної теореми пошуковий напрямний вектор може бути представлений у вигляді лінійної комбінації крайніх векторів. При цьому очевидно, що вектори z_{ij}^* , для яких виконуються умови $z_{ij}^* \psi_0 = 1$, є крайніми, оскільки їхні формуючі вектори $x_i, \bar{x}_j$ є визначальними. Крім того, з теореми 1 випливає, що задача знаходження напрямного вектора ψ_0 пошукової гіперплощини фактично зводиться до аналізу функції $W(\alpha)$ з вектором параметрів α_{ij} , яка має вигляд

$$W(\alpha) = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \alpha_{ij} - \frac{1}{2} \psi^T \psi, \quad (9)$$

де вектор Ψ є

$$\Psi = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \alpha_{ij} z_{ij}.$$

При цьому необхідними й достатніми умовами досягнення максимуму функції $W(\alpha)$ в точці α_0 є співвідношення

$$\frac{\partial W(\alpha_0)}{\partial \alpha_{ij}} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \alpha_{ij}^0 > 0, \quad i = 1, \dots, a; \\ \leq 0, & \text{якщо } \alpha_{ij}^0 = 0, \quad j = 1, \dots, b. \end{cases} \quad (9)$$

Аналіз цих співвідношень з урахуванням наведених у виразі (7) позначень, а саме $\psi_0 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \alpha_{ij}^0 z_{ij}$, приводить їх до вигляду

$$1 - z_{ij}^T \psi_0 = \begin{cases} 0, & \text{якщо } \alpha_{ij}^0 > 0, \quad i = 1, \dots, a; \\ \leq 0, & \text{якщо } \alpha_{ij}^0 = 0, \quad j = 1, \dots, b. \end{cases} \quad (10)$$

Іншими словами, це має такий вигляд:

$$\begin{aligned} z_{ij}^T \psi_0 &\geq 1, \quad \alpha_{ij}^0 \geq 0, & i = 1, \dots, a; \quad j = 1, \dots, b; \\ \alpha_{ij}^0 (1 - z_{ij}^T \psi_0) &= 0, & j = 1, \dots, a; \quad j = 1, \dots, b; \end{aligned} \quad (11)$$

Відповідно до визначень теореми 1, що представлені у виразах (7) і (8), умови вигляду (12) визначають мінімальний за модулем напрямний вектор ψ_0 . У результаті задача побудови гіперплощини, яка розділяє множини X_1 і X_2 (див. рис. 2) фактично зводиться до пошуку максимуму функції $W(\alpha)$ з формули (9) з умовою (12) і вектором параметрів α_{ij} , який локалізований у позитивному квадранті. При цьому синтез алгоритму розпізнавання, що сформований на основі функції (9) за виконання умови (12) забезпечується на основі розглянутої далі теореми 2. Зазначена теорема була свого часу доведена В. Н. Вапником і А. Я. Червоненкісом під час аналізу статистичних проблем навчання. При цьому зазначена теорема формулюється в такий спосіб.

Теорема 2. Якщо поділяюча гіперплощина, що обумовлена вектором ψ_0 при умовах (5), існує, то максимум функції $W(\alpha)$ в позитивному квадранті визначається співвідношенням

$$W(\alpha_0) = \frac{\|\psi_0\|^2}{2}.$$

Прямим наслідком наведеної теореми 2 слід вважати можливість використання відстані $\rho(\psi)$ між проєкціями множин X та $\bar{X}$ на напрямок Ψ , а саме

$$\rho(\psi) \geq [2W(\alpha_0)^{-0,5}], \quad (13)$$

як критерій роздільності підлягаючих розпізнаванню векторів-реалізацій. При цьому показовим є той факт, що рівність у співвідношенні (13) досягається при векторі параметрів $\Psi = \Psi_0$, тобто при $\alpha = \alpha_0$.

Вищезазначене дозволяє засвідчити, що дві кінцеві множини векторів X і $\bar{X}$ не є роздільними гіперплощиною в тому випадку, якщо відстань між проєкціями цих множин на будь-який напрямок менша заданої відстані ρ_0 . Це означає, що роздільність неможлива, якщо знайдуться такі параметри $\alpha_{ij}^* > 0$, що

$$W(\alpha_{ij}^*) > \frac{1}{2\rho_0^2} = W_0 \quad (14)$$

Зрештою завдання визначення мінімального за модулем напрямного вектора Ψ_0 зводиться до реалізації таких етапів обчислень:

- 1) знаходження максимуму за умови (10) квадратичної форми $W(\alpha)$ в позитивному квадранті $\alpha_{ij}^* > 0$;
- 2) установлення того факту, що максимум функції $W(\alpha)$ перевищує задану величину W_0 .

Відповідно до першого з вищевказаних обчислювальних етапів алгоритм максимізації негативно визначеної квадратичної форми виду $F(y) = b^T y - y^T A y$ з векторами b , y і позитивно визначеною матрицею A реалізується на основі методу сполучених градієнтів. Відповідно до реалізації другого з вищевказаних обчислювальних етапів передбачено також визначальну процедуру функціоналу навчання діагностичної системи, а саме: алгоритм формування оптимальної розділяючої гіперплощини, що дає змогу мінімізувати можливі похибки розпізнавання.

Таким чином, підсумовуючи теоретичний аналіз головних обчислювальних процедур, що складають функціональне ядро запропонованої діагностичної моделі на основі оптимального лінійного класифікатора, необхідно відзначити таке.

Обчислювальна реалізація запропонованої моделі превентивної діагностики аварійного режиму погіршеної тепловіддачі з використанням оптимального лінійного класифікатора дає змогу своєчасно виявити режим початку псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ і тим самим запобігти подальшому формуванню коагульованих об'ємів макромолекулярних утворень, що безпосередньо спричиняють виникнення режиму погіршеної тепловіддачі в АкЗ ЯР з НКТП.

Запропонована в цій роботі модель багатовимірної геометричного розпізнавання потенційно небезпечної теплогідрравлічної аномалії — початку процесу псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ в АкЗ ЯР з НКТП — дає змогу мінімізувати можливі похибки розпізнавання, а також використовувати при реалізації процедури навчання суттєво обмежені обсяги апріорної інформації для попередньої адаптації (навчання) діагностичної системи.

Комп'ютерна реалізація розглянутих у роботі процедур автоматичної діагностики режиму псевдокипіння теплоносія в експериментальному циліндричному каналі з внутрішнім діаметром 6,3 мм в області НКТП (параметри експерименту вказані на рис. 1) показали можливість безпомилкового розпізнавання цього режиму з надійністю близько 100 %. Методичні особливості цих обчислювальних експериментів мають бути викладені в наступній публікації.

Математично формалізований у представленій публікації багатовимірний лінійний класифікатор має розглядатися як основний елемент математично-

го забезпечення розглянутого діагностичного функціоналу безпеки перспективних СВРК для ЯР з НКТП наступного покоління.

Висновки

1. Реалізація широкого спектра завдань безпекової проблематики перспективних реакторів із НКТП теплоносія зумовлює необхідність розробки якісно нових засобів оперативного контролю АкЗ легководних ЯР з НКТП, функціонал яких за своїм діагностичним змістом принципово відрізняється від існуючих підходів до побудови систем детермінованого контролю, управління та діагностики поточного технічного стану сучасних РУ типу ВВЕР.

2. Суттєва обмеженість діагностичних функцій детермінованих алгоритмів оперативного контролю АкЗ сучасних СВРК реакторів типу ВВЕР не дає змоги використати існуючі підходи для ідентифікації таких потенційно небезпечних імовірнісних теплогідрравлічних процесів, якими є режими кипіння теплоносія в ТВЗ існуючих докритичних реакторів, а також аномальні явища псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ у перспективних ЯР з НКТП.

3. Динаміка виникнення процесу псевдофазового переходу на поверхні ТВЕЛ в області НКТП та подальше еволюційне погіршення тепловіддачі з цієї поверхні є зумовленими ефектами молекулярної кінетики, що реалізуються в пристінковому шарі в умовах плинну надкритичного теплоносія.

4. Формування перших псевдопарових утворень в області НКТП, що їх генерують рухомі осердя турбулентних вихорів у пристінковому шарі та в безпосередній близькості до поверхні ТВЕЛ, становить необхідну фізичну передумову для наступної трансформації цього аномального теплогідрравлічного режиму в надкритичній термодинамічній області до передаварійного стану поверхні тепловіддачі, яким є перехід до нестабільного псевдоплівкового кипіння.

5. Мікрокінетичні процеси, що реалізуються у пристінковому шарі надкритичного теплоносія і зумовлюють утворення макромолекулярних ансамблів у формі псевдопарових утворень є безпосередньою причиною їхньої наступної коагуляції, яка спричиняє виникнення погіршеної тепловіддачі ТВЕЛ в ЯР з НКТП.

6. Динамічний еволюційний розвиток режиму нестабільного псевдоплівкового кипіння в його стабільний плівковий надкритичний різновид, зумовлений процесами коагуляції псевдопарових утворень та їхньою наступною гідродинамічною стабілізацією на

поверхні ТВЕЛ в області НКТП, безпосередньо призводить до теплової ізоляції поверхні тепловіддачі, зовнішнім проявом якої є суттєве зниження інтенсивності тепловіддачі на цій поверхні та її наступна незворотна руйнація.

7. Формування спектральних складових у сигналах діагностичних сигналів акустичної емісії процесу псевдофазового переходу в області НКТП є зумовленим процесом виникнення макромолекулярних об'ємів в надкритичному теплоносії, що генеруються випадково розподіленими у пристінковому шарі осередками турбулентних вихорів.

Список використаної літератури

1. Світові тенденції розвитку конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 2 (17). — С. 3–15.
2. Головні напрями російських розробок перспективних конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 3 (18). — С. 34–41.
3. Проблемні питання теплогідравлічного розрахунку активних зон перспективних водоохолоджуваних реакторів з надкритичними параметрами / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 4 (19). — С. 3–15.
4. Актуальні проблеми забезпечення теплогідравлічної надійності перспективних ядерних реакторів з надкритичними параметрами / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — № 1 (20). — С. 27–38.
5. Проблеми аварійної динаміки теплогідравлічних процесів у перспективних реакторах із надкритичними параметрами легководного теплоносія / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — № 2 (21). — С. 3–16.

I. G. Sharaievskyi

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysohirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

Identification of Emergency Mode of Deteriorated Heat Transfer in Channels of Advanced Light Water Reactors with Supercritical Thermodynamic Parameters

From the standpoint of physical analysis of the micro-kinetics of the near-wall layer of the supercritical coolant, as well as the emergency dynamics of the heat transfer process from the surface of the fuel rods under these conditions, the features of the emergency mode development of deteriorated heat transfer in the channels of advanced light water reactors with supercritical thermodynamic parameters are analyzed. The defining physical differences in the onset of the deteriorated heat transfer mode in the reactor core with supercritical thermodynamic parameters are specified. The fundamental differences between the procedures for operational diagnostics of heat exchange crises on the surface of fuel rods, which may arise in water-cooled reactors under subcritical parameters, and the development of the emergency mode of deteriorated heat transfer in the core under supercritical parameters are physically substantiated. The fundamental impossibility of applying deterministic approaches to the implementation of existing monitoring and diagnostics systems for the current operational state of subcritical reactors of the VVER type to solve the problem of early detection of the initial phases of the deteriorated heat transfer mode is justified. Taking into account the defining features of the molecular kinetics of the onset and development of the deteriorated heat transfer mode on the surface of fuel rods in the reactor core with supercritical thermodynamic parameters, the main diagnostic principles for the automatic identification of this emergency thermal-hydraulic mode, which must be timely detected in future reactors with supercritical coolant parameters, are specified. In this context, the fundamental principles of building advanced in-core monitoring systems for light water reactors with supercritical parameters are formulated. It is justified that the onset of the emergency mode of deteriorated heat transfer on the surface of fuel rods in a supercritical light water reactor must be detected at the initial phase of this emergency mode. It is shown that the core of the mathematical software for advanced in-core monitoring systems for reactors with supercritical thermodynamic parameters of the light water coolant should consist of intelligent procedures for automatic recognition of the initial phases of the pseudo-boiling mode, which precedes the pseudo-film boiling mode and the destruction of the fuel rod cladding in the deteriorated heat transfer mode. A mathematical model of preventive diagnostics of the emergency mode of deteriorated heat transfer is proposed, based on procedures for constructing a separating hyperplane in a multidimensional feature space. The adequacy of the developed model for automatic recognition of the pseudo-boiling

mode in an experimental cylindrical channel under the conditions of a thermal-hydraulic stand with supercritical thermodynamic parameters was verified based on the spectral parameters of the acoustic emission process during the pseudo-phase transition process. A 100% reliability of correct identification of the pseudo-boiling mode was achieved.

Keywords: reactors with supercritical coolant parameters, heat exchange on the heat transfer surface of fuel rods, automatic diagnostics, spectral structure of diagnostic signals.

References

1. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Nosovskyi A. V., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2020). World trends of construction development of water-cooled supercritical pressure reactors. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 17, no. 2, pp. 3–15. (in Ukr.)
2. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2020). Main Directions of Russian Developments of Prospective Structures of Water-Cooled Supercritical Pressure Reactors. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 18, no. 3, pp. 34–41. (in Ukr.)
3. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2020). Problem issues of cores thermal-hydraulic calculation for prospective water-cooled reactors with supercritical parameters. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 19, no. 4, pp. 3–15. (in Ukr.)
4. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2021). Actual problems of the thermal hydraulic reliability ensuring of prospective nuclear reactors with supercritical parameters nuclear energy and the environment. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 20, no. 1, pp. 27–38. (in Ukr.)
5. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2021). Problems of abnormal dynamics of thermal hydraulic processes in prospective reactors with supercritical parameters of light water coolant. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 21, no. 2, pp. 3–16. (in Ukr.)

Надійшла 19.08.2024
Received 19.08.2024