

І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський, Л. Б. Зімін, Т. С. Власенко, Г. І. Шараєвський

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

Проблеми аварійної динаміки теплогідролічних процесів у перспективних реакторах із надкритичними параметрами легководного теплоносія

Ключові слова:

легководний ядерний реактор,
надкритичні параметри
теплоносія,
погіршений теплообмін,
температура стінки каналу,
теплове навантаження

Систематизовано комплекс науково-технічних проблем, пов'язаних із пріоритетом забезпечення безпеки та надійності активних зон перспективних енергетичних ядерних реакторів із надкритичними термодинамічними параметрами легководного теплоносія. Розглянуто проблеми реалізації ефективної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ та забезпечення надійного розрахунку теплових та гідродинамічних процесів у турбулентних потоках теплоносія. Головну увагу приділено обумовленості фізичного характеру цих процесів закономірностями трансформації теплофізичних властивостей теплоносія за умов змін його температури. Відзначено недостатню дослідженість цих явищ та практичну відсутність фізично обґрунтованих адекватних уявлень щодо природи аварійного режиму погіршеної тепловіддачі, здатного непередбачувано виникати на поверхні ТВЕЛ навіть за умови безперервного її охолодження. Головною фізичною ознакою виникнення цього аварійного режиму є суттєве погіршення тепловіддачі, яка стає аномально низькою, але фізичні причини такої небезпечної аномалії є невідомими. На основі аналізу даних молекулярної кінетики пристінкового шару теплоносія ці явища запропоновано вважати обумовленими виникненням невідомого режиму псевдопливкового кипіння. З використанням експериментальних даних показано, що на поверхні теплообміну можуть виникати макромолекулярні ансамблі у вигляді псевдопарових утворень, які порушують теплопередачу, і що існує достатньо глибока фізична аналогія між теплообміном у надкритичній термодинамічній системі та процесом недогрітого кипіння за умов докритичних параметрів теплоносія. Проаналізовано зміни характеристик експериментальних спектрів акустичної емісії псевдокипіння у разі послідовного підвищення теплового навантаження та доведено, що ці явища принципово можуть бути використані в перспективних системах діагностики реакторів з надкритичними параметрами для раннього виявлення початкових фаз псевдокипіння та оперативного запобігання виникненню аварійних режимів погіршеної тепловіддачі.

Вступ

Перспективні розробки пілотних проектів дослідно-промислових зразків легководних реакторних установок (РУ) з надкритичними параметрами

(НКП) теплоносія в активній зоні (АкЗ) на сьогодні реалізуються в низці промислово розвинених країн світу. Головні напрями створення ядерних реакторів (ЯР) цього типу відповідно до обраних науково-конструкторськими колективами країн-розробників

© І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський,
Л. Б. Зімін, Т. С. Власенко, Г. І. Шараєвський, 2021

концепцій технологічних схем РУ з НКП проаналізовано в роботах [1, 2]. За результатами системного аналізу, виконаного в цих публікаціях, крім того, відзначається суттєве зниження за останні роки темпів конструкторських розробок цих надкритичних ЯР. У наступних роботах [3, 4], що продовжили аналіз досліджень та пілотних розробок АкЗ ЯР з НКП, гальмування створення цих реакторів, яке було попередньо відзначено в [1, 2], розглянуто з точки зору впливу на нього низки об'єктивних фізичних чинників. Слід підкреслити, що результати публікацій [1–4], насамперед, мали на меті привернути увагу наукового загалу до двох визначальних чинників. Перший стосується критичної нестачі фундаментальних знань стосовно фізичних особливостей перебігу аварійних процесів в умовах НКП. Вплив другого чинника пов'язаний з наявністю значного дефіциту розрахункової бази, що є необхідною передумовою для реалізації адекватного теплогідрравлічного розрахунку АкЗ перспективних реакторів з НКП. Як зазначено в роботах [1–4], розробка конструкцій перспективних ЯР з НКП зумовила необхідність пріоритетного вирішення значної кількості проблемних завдань. Слід підкреслити, що ядро всієї безпекової проблематики ЯР з НКП становить комплекс завдань, обумовлений дефіцитом надійної інформації про головні фізичні особливості перебігу аварійних теплогідрравлічних процесів (ТГП) у навколокритичній області. Проте ця інформація є критично необхідною для розробки наукових підходів, зокрема до вирішення комплексу завдань із забезпечення ефективного оперативного контролю температурного стану ТВЕЛ у процесі експлуатації АкЗ з НКП. Враховуючи теплофізичні особливості надкритичних ЯР та сучасний стан їхніх розробок, головна складова створюваного безпекового функціонала конкретизована в роботах [1, 2] саме як вимога виявлення початкових фаз виникнення аварійних температурних режимів поверхонь тепловіддачі ТВЕЛ. Зазначений комплекс завдань має скласти фундаментальну наукову основу для розробки та створення ефективної методології та сучасних технологій превентивної оперативної діагностики передаварійних температурних режимів ТВЕЛ в АкЗ ЯР з НКП. Вирішення цих наукових проблем у контексті безпекових пріоритетів зумовлює необхідність першочергового вирішення таких завдань: 1) розробки новітніх фізичних принципів раннього виявлення температурних аномалій в АкЗ РУ з надкритичними параметрами; 2) створення принципово нових програмно-технічних засобів, що мають забезпечити

ефективну реалізацію процедур оперативного контролю та превентивної діагностики температурних режимів ТВЕЛ у процесі експлуатації ЯР з НКП. Розробці принципів методологічних підходів до вирішення першої з вищезазначених проблем і присвячено представлену наукову публікацію.

Проблемні питання теплогідрравлічного розрахунку реакторів із надкритичними термодинамічними параметрами

Аналізуючи стан сучасних розробок ЯР з НКП, слід, насамперед, відзначити, що негативний вплив об'єктивних фізичних чинників не подоланий розробниками і дотепер. Складності фізичного характеру продовжують бути перешкодою виконанню діючих програм розробки ЯР з НКП. У цьому контексті слід звернути також увагу на деякі важливі інженерно-фізичні, економічні та організаційні аспекти, що пов'язані з чинниками гальмування розробок надкритичних ЯР.

По-перше, нестача розрахункової бази, критично необхідної для реалізації теплогідрравлічного розрахунку перспективних реакторів з НКП, є, насамперед, зумовленою значним дефіцитом експериментальних даних щодо фізичних особливостей перебігу ТГП в навколокритичній області. Відомо [5, 6], що дані цих експериментів мають бути отримані на модельних експериментальних каналах основної геометрії (циліндричні, кільцеві, стрижневі збірки теплових імітаторів ТВЕЛ) із використанням стендів мегаватної електричної потужності, здатних забезпечити досягнення області навколокритичних параметрів. Очевидно, що практична реалізація таких комплексних теплофізичних досліджень, зважаючи на їхню високу складність, вимагає значних фінансових та матеріальних ресурсів, оскільки потребує залучення людського капіталу висококваліфікованих дослідників, що можливе лише в умовах провідних дослідницьких ядерних центрів. Складність, довготривалість та високий технологічний рівень таких досліджень, включаючи спеціальну теплофізичну методологію отримання та обробки масивів даних для розробки розрахункової бази, стають очевидними з розгляду монографій [5, 6].

По-друге, дефіцит розрахункової бази надкритичних РУ також пов'язаний з реальною нестачею фундаментальних знань щодо визначальних особливостей фізичної природи самого аварійного режиму погіршеної тепловіддачі, який, згідно з відомими

даними [7, 8], може непередбачувано виникати на поверхні ТВЕЛ. Таким чином, сучасний стан теплофізичних досліджень ТГП в області НКП відповідно до поточних проблем створення надкритичних ЯР можна охарактеризувати такими головними рисами: а) відсутністю надійних наукових даних щодо визначальних характеристик аварійної динаміки параметрів легководного теплоносія; б) критичною недостатністю розрахункової бази для реалізації надійного теплогідролічного розрахунку ЯР з НКП.

Враховуючи вищевказану оцінку стану досліджень процесів теплообміну та гідродинаміки в навколкритичній області відповідно до потреб розробки перспективних ЯР з НКП, видається за необхідне далі висвітлити проблемні питання: 1) розглянути нечисленні відомі дотепер експериментальні дані та фізичні моделі, що стосуються механізму виникнення аварійного режиму погіршеної тепловіддачі; 2) проаналізувати сучасний стан теплофізичних досліджень ТГП у стрижневих збірках ТВЕЛ в області НКП.

Як відомо, наявність розрахункової бази для реалізації теплогідролічного розрахунку ЯР є необхідною передумовою для адекватного визначення на етапі проектування РУ низки засадничих теплофізичних характеристик та параметрів створюваного реактора. Ця база, насамперед, має включати комплекс сертифікованих розрахункових залежностей та керівних матеріалів, що розробляються для колективів проєктантів створюваних ЯР. Основні структурні елементи цієї розрахункової бази для теплогідролічного розрахунку докритичних реакторів системно розглянуто в монографії [5]. У той же час слід зазначити, що розробка такої бази для ЯР з НКП є суттєво ускладненою через значні теплофізичні відмінності теплоносія, що має використовуватися в надкритичних легководних реакторах. Як відомо [6, 7], фізичний характер ТГП в умовах НКП визначальною мірою зумовлюється нелінійними закономірностями трансформації теплофізичних властивостей надкритичного теплоносія, яка відбувається зі зміною рівня його температури. У цих умовах практично важлива для експлуатації ЯР з НКП область термодинамічних параметрів, що отримала назву «зона великих теплоємностей», зазнає суттєвих змін. Так, зокрема, у центрі цієї термодинамічної зони (її межі відповідно до даних [7] визначаються умовою $c_p \geq 8$ кДж/кг) визначальні теплофізичні властивості води — ізобарна теплоємність, теплопровідність, коефіцієнт термічного розширення та ін. — досягають своїх екстремальних значень. Так, наприклад, в інтер-

валі ентальпій $\Delta h = 1700 \dots 2700$ кДж/кг в'язкість та теплопровідність води зменшуються відповідно у два та три рази, а теплоємність, навпаки, зростає майже двадцятикратно. Очевидно, що такі фізичні трансформації визначальних теплофізичних властивостей води в області НКП зумовлюють специфічний характер розподілу головних теплогідролічних параметрів цього теплоносія як за перерізом, так і за довжиною окремих субканалів тепловидільних збірок (ТВЗ), що утворюються їхніми окремими стільниками. Особливо це стосується практично важливого інтервалу ентальпій теплоносія, що відповідає діапазону $\Delta h = h_1 \dots h_2 = 1600 \dots 3000$ кДж/кг, де на його нижній межі, тобто $h_1 < 1600$ кДж/кг, з фізичної точки зору ще існує крапельна рідина, а на його верхній межі, яка відповідає нерівності $h_2 > 3000$ кДж/кг, робоче тіло стає газом.

З огляду на нелінійний характер динаміки теплофізичних властивостей легководного теплоносія в зоні навколкритичних параметрів якісний характер перебігу ТГП в радіальному напрямку найпростішого — циліндричного — каналу виглядає таким чином. Якщо по радіусу цього каналу псевдокритична температура $T_{пк}$ знаходиться в інтервалі між середньою температурою потоку $T_{ср}$ та температурою стінки $T_{ст}$, тобто $T_{ср} < T_{пк} < T_{ст}$, то ізобарна теплоємність теплоносія c_p в означеному радіальному напрямку також буде змінюватись відповідним чином. Зокрема, з віддаленням від стінки каналу параметр c_p буде швидко зростати, досягне максимуму, після чого буде виявляти тенденцію до зменшення. При цьому густина теплоносія буде швидко збільшуватись від стінки каналу до його осі, тобто в тому ж радіальному напрямку. Результатом вищезазначених змін теплофізичних властивостей теплоносія в радіальному напрямку, а також уздовж геометричної осі каналу є суттєвий вплив їхньої динаміки на осереднений та пульсаційний рух теплоносія. Очевидно, що останній зумовлює прямий фізичний вплив параметрів швидкості на процес тепловіддачі та характеристики гідравлічного опору каналу. Разом з тим неоднорідний розподіл густини теплоносія призводить також до виникнення термогравітаційних ефектів та формування імпульсів прискорення, що також впливають на структуру потоку. Суперпозиція всіх взаємопов'язаних фізичних ефектів зумовлює відповідні зміни температури потоку, яка визначає зміни густини теплоносія вздовж аксіальної координати каналу теплообмінного пристрою. Очевидно, що така нерівномірність її розподілу в аксіальному напрямку впливає на виникнення термогравітаційних сил та

імпульсів термічного прискорення потоку. Останні, у свою чергу, визначають осереднений і пульсаційний рух теплоносія і впливають на характер процесів турбулентного переносу та обумовлену ним інтенсивність тепловіддачі з поверхні каналу.

Завершуючи вищенаведений якісний розгляд характеру ТПП у найпростішому циліндричному каналі, слід відзначити: 1) фізичний механізм виникнення та розвитку аварійного режиму погіршеної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ в умовах НКП дотепер залишається нез'ясованим; 2) існуючі підходи до реалізації теплогідравлічного розрахунку робочих каналів АкЗ (особливо в частині визначення температури поверхні ТВЕЛ) не можуть вважатися надійними та фізично обґрунтованими; 3) емпіричні розрахункові залежності, що використовуються розробниками для оцінки інтенсивності тепловіддачі, відповідають виключно ідеалізованим штатним режимам нормальної тепловіддачі, яка суттєво відрізняється від аварійної в цих реакторах; 4) можливе за певних умов в області НКП виникнення аварійних режимів погіршеної тепловіддачі існуючими розрахунковими методиками не прогнозується; 5) наявність міжстільникового поперекового тепломасообміну в ТВЗ ускладнює фізичну картину виникнення режимів погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ; 6) небезпека виникнення режимів погіршеної тепловіддачі в області НКП зумовлена не тільки їхньою невідомою фізичною природою, але також непередбачуваним характером їхнього виникнення, оскільки вони здатні раптово виникати навіть за умов забезпечення штатних умов охолодження поверхонь надкритичним теплоносієм та при незначному форсуванні теплової потужності ТВЕЛ; 7) існуюча невизначеність фізичної природи режимів погіршеної тепловіддачі значною мірою зумовлена використанням у проведених дотепер експериментах лише інтегральних теплофізичних параметрів, зокрема температури, тиску, витрат теплоносія та інших узагальнених теплотехнічних показників, які не несуть інформації про перебіг ТПП на молекулярному рівні; 8) існує суттєвий дефіцит адекватних фізичних моделей щодо виникнення умов погіршення тепловіддачі в АкЗ перспективних ЯР з НКП.

Як зазначено в роботах [1–4, 7, 8], режими погіршеної тепловіддачі здатні непередбачувано виникати на поверхні ТВЕЛ за умов плинну надкритичного теплоносія в ТВЗ. Проте відсутніми в сучасному науковому доробку є апробовані розрахункові залежності для адекватного прогнозування умов виникнення режимів погіршеної тепловіддачі в ТВЗ. Цей інформаційний дефіцит унеможливує надійне

визначення основних безпекових характеристик ЯР з НКП, зокрема максимально допустимої теплової потужності ТВЗ. Відсутньою є також розрахункова база для надійного визначення низки засадничих характеристик та параметрів процесів теплообміну і гідродинаміки в ЯР з НКП. Зокрема, це стосується коефіцієнтів тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ та коефіцієнтів гідравлічного опору окремих частин ТВЗ. Очевидно, що відсутність таких засадничих даних унеможливує реалізацію теплогідравлічного розрахунку АкЗ надкритичних РУ. З цих позицій слід також звернути увагу на такі теплогідравлічні аспекти експлуатації ТВЗ. Як відомо [5, 6], ТВЗ мають складну форму поверхні тепловіддачі й відрізняються наявністю в них теплогідравлічної структури з окремих субканалів, що формуються на основі характерних топологічних фрагментів стрижневої збірки (на основі її стільників). При цьому завдяки інтенсивному тепломасообміну, який існує між окремими субканалами ТВЗ, реальні умови виникнення погіршеної тепловіддачі в окремих теплогідравлічних стільниках є суттєво відмінними від середніх показників, що можуть визначатися для всієї збірки ТВЕЛ, а також каналів інших геометрій (циліндричні, кільцеві та ін.).

З огляду на зазначену складність та недостатню дослідженість ТПП у ТВЗ у навколокритичній області значне уповільнення темпів розробок перспективних ЯР з НКП [1, 2] слід вважати закономірним. Підтвердженням такого стану досліджень може бути суттєве зменшення наукових публікацій із зазначеної тематики. Насамперед це стосується реальних фізичних експериментів з модельними ТВЗ. Ілюстрацією такого скорочення масштабів експериментальних досліджень фізики процесів теплообміну та гідродинаміки надкритичного теплоносія в ТВЗ є також нечисленна доступна бібліографія з нещодавньої оглядової роботи [9], в якій поряд з двома відомими експериментальними роботами, що були виконані зі стрижневими збірками, здебільшого розглядаються результати моделювання теплогідравліки субканалів стрижневих збірок ТВЕЛ в області НКП із використанням комп'ютерних кодів FLUENT або ANSYS. Проте, як відомо, використання методів обчислювальної гідродинаміки на основі кодів FLUENT, ANSYS ICEM та подібних їм стикається з низкою принципових проблем. Насамперед використання кінцевоелементного методу, що лежить в основі комп'ютерних кодів, базується на фундаментальному постулаті, який визначає реальні фізичні межі його адекватного застосування і стосується умов порушення суцільності

середовища, яке моделюється. Початок появи псевдопарових утворень [5] (тобто генерації псевдопарової фази в процесі псевдокипіння теплоносія), що виникає за умов збільшення теплового навантаження поверхні тепловіддачі, порушує цю фундаментальну вимогу і тому становить верхню фізичну межу можливості застосування методів обчислювальної гідродинаміки теплообмінних пристроїв. Тобто до результатів застосування методів обчислювальної гідродинаміки в області НКП слід ставитися зі значною обережністю.

Таким чином, слід констатувати наявність значного дефіциту надійних експериментальних даних щодо перебігу процесів теплообміну та гідродинаміки в ТВЗ у навіолокритичній області. Крім того, має місце практична відсутність експериментально підтверджених моделей та фундаментальних знань стосовно фізичного походження та природи аварійної динаміки режимів погіршеної тепловіддачі, що, як відомо [3, 7, 8], є зовнішнім проявом нештатного розвитку ТПП на поверхні ТВЕЛ в області НКП. Проте, відповідно до нагальних практичних потреб реалізації адекватного розрахунку АкЗ ЯР з НКП, невідкладним завданням пріоритетних теплофізичних досліджень слід вважати отримання таких складових розрахункової бази: 1) емпіричних залежностей для визначення коефіцієнтів тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, особливо з урахуванням поперекових плинів в ТВЗ, що зумовлені нерівноцінністю окремих субканалів відповідно до сучасних стільникових підходів, викладених у [5, 6]; 2) структурних характеристик визначальних режимів плину надкритичного теплоносія; 3) розрахункових даних для визначення коефіцієнтів гідравлічного опору ТВЗ, а також контуру циркуляції РУ з НКП. Також важливим пріоритетом теплофізичних досліджень в області НКП продовжує залишатися розробка та аналіз експериментально підтверджених розрахункових моделей щодо фізичної природи виникнення та динаміки можливого розвитку аварійних режимів погіршеної тепловіддачі. Системному розгляду зазначеної фундаментальної проблеми присвячено наступний розділ цієї публікації.

Аварійна динаміка режиму погіршеної тепловіддачі

Відомо, що в надкритичній області режим погіршеної тепловіддачі є безпосередньою загрозою функціонуванню поверхні теплообмінного пристрою, оскільки його виникнення невідворотно призводить до катастрофічного зростання її температури.

Зазвичай це зростання завершується руйнацією всієї поверхні, на якій виникло локальне погіршення тепловіддачі, оскільки локалізація цього аварійного режиму швидкоплинно поширюється на її прилеглі частини. Очевидно, що за цих умов раптове виникнення режиму погіршеної тепловіддачі на одному з ТВЕЛ здатне охопити всю ТВЗ, де він розташований. Показово, що при цьому попередні фізичні прояви виникнення цього аварійного режиму практично відсутні. Таким чином, розвиток зазначеного аварійного температурного стану в енергонапруженій структурній частині АкЗ ЯР з НКП виглядає практично непрогнозованим. Відповідно до зовнішніх фізичних проявів раптового виникнення цього нештатного теплового режиму тепловіддачі з поверхні окремого ТВЕЛ або загалом всієї ТВЗ раптово погіршується і стає аномально низькою. Очевидно, що в цих умовах температура поверхні тепловіддачі різко підвищується, що є наслідком аварійного зниження інтенсивності тепловіддачі, і таке зниження неприпустиме з точки зору температурної міцності охолоджуваних надкритичним теплоносієм цирконієвих оболонки ТВЕЛ, які в таких екстремальних температурних умовах зазнають невідворотної руйнації.

В історичній ретроспективі слід звернути увагу на те, що вперше подібне раптове зниження інтенсивності тепловіддачі в області НКП було визначено в роботі [10] саме як непрогнозоване відхилення тепловіддачі з охолоджуваної надкритичним теплоносієм поверхні від закономірностей турбулентного теплообміну. Останній, як відомо [4, 7], у штатних умовах може реалізуватися за мінімально можливого температурного напору між стінкою та охолоджуючим агентом, тобто в умовах $\Delta t = (t_{cr} - t_r) \rightarrow 0$. У контексті цього визначення слід звернути увагу на таке. Так, уже в перших дослідженнях особливостей процесу тепловіддачі в умовах НКП, зокрема в роботах [11, 12], був установлений вплив низьки фізичних чинників на характеристики тепловіддачі від охолоджуваної надкритичним теплоносієм поверхні. Зокрема, було з'ясовано, що вплив густини теплового потоку q на величину коефіцієнта тепловіддачі α є визначальним. Особливо це стосується умов, що відповідають нерівності $t_{cr} > t_m > t_r$, тобто коли температура псевдокритичного стану t_r нижча за температуру стінки t_{cr} та вища за середню температуру теплоносія t_r . З огляду на такі умови зона знижених рівнів температурного напору в роботах [11, 12] та інших публікаціях цього початкового періоду досліджень теплообміну в умовах НКП була визначена як «покрощена». Проте подальше зростання q і перевищення цієї величиною

деякого критичного рівня, що визначається відповідними емпіричними співвідношеннями режимних (особливо масової швидкості ρw та вхідної ентальпії $h_{\text{вх}}$) та геометричних параметрів експериментального каналу (насамперед довжини обігріву $l_{\text{об}}$ та еквівалентного діаметра d_e) та, крім того, напрямку руху теплоносія, призводить до різкого погіршення тепловіддачі. У цих умовах температура стінки $t_{\text{ст}}$ непередбачувано та катастрофічно зростає, сягаючи свого максимуму в одному чи кількох перерізах каналу з рухомим надкритичним теплоносієм. Як було зазначено вище, коефіцієнт тепловіддачі у відповідних аварійних перерізах у порівнянні з нормальною тепловіддачею різко (на порядок і більше) знижується, а поверхня тепловіддачі звичайно зазнає перегріву та руйнації. Наведена на рис. 1 за даними роботи [13] типова аварійна динаміка температурного режиму поверхні тепловіддачі циліндричного каналу в області НКП за підйомного та опускного рухів легководного теплоносія ілюструє раптовий (хоч і з деякою тепловою інерцією) перегрів стінки цього каналу при виникненні режиму погіршеної тепловіддачі за умови підвищення вхідної ентальпії навколоскритичного теплоносія.

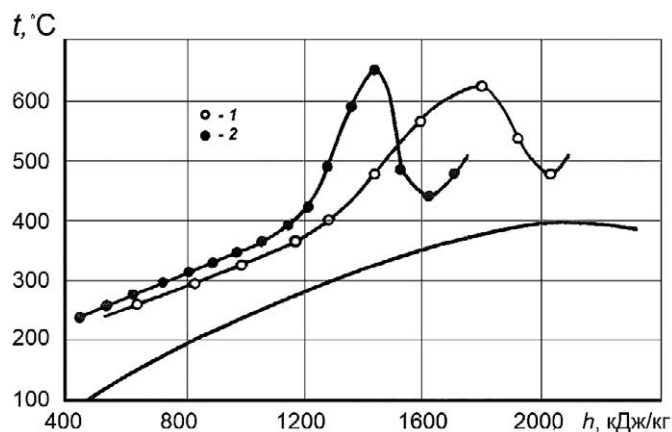


Рис. 1. Аварійна динаміка температурного режиму поверхні тепловіддачі циліндричного каналу при підйомному та опускному плинах легководного теплоносія залежно від величини його вхідної ентальпії за даними роботи [13]. Значення тиску $P = 25,5$ МПа, 1 — підйомний рух теплоносія, масова швидкість $\rho w = 1500$ кг/(м² · с), густина теплового потоку $q = 1,81$ МВт/м²; 2 — опускний рух, $\rho w = 1530$ кг/(м² · с), $q = 1,61$ МВт/м²

У цій же роботі була виявлена також можливість виникнення декількох аварійних температурних максимумів уздовж аксіальної координати досліджуваного циліндричного каналу. Автором роботи [14], в експериментах якого були також отримані

подібні результати, було зроблено припущення, що за незначних температурних напорів Δt в умовах НКП процес тепловіддачі у надкритичному теплоносії до певної міри подібний до режиму пухиркового кипіння за докритичних параметрів з інтенсивною тепловіддачею з поверхні ТВЕЛ. Навпаки, в умовах великих Δt при НКП, що відповідають режиму погіршеної тепловіддачі, процес тепловіддачі, згідно з роботою [14], подібний до докритичного плівкового кипіння, що (на відміну від погіршеної тепловіддачі) відзначається різким порушенням температурного стану поверхні ТВЕЛ. З огляду на це слід відзначити, що запропонована в [14] фізична аналогія між плівковим докритичним режимом кипіння і надкритичною погіршеною тепловіддачею має розглядатися як продуктивна гіпотеза щодо псевдофазової фізичної природи аварійного режиму в умовах НКП.

У цьому зв'язку слід відзначити, що сам термін «режим погіршеної тепловіддачі» був уперше запропонований академіком АН СРСР М. А. Стирковичем у роботі [15] для визначення специфічної інерційної динаміки виникнення температурної аномалії в цьому аварійному надкритичному режимі. Показово, що динаміка його виникнення, як було відзначено вже в перших дослідженнях, якісно відрізняється від швидкоплинного розвитку аварійної ситуації в умовах виникнення кризових явищ 1-го та 2-го роду за докритичних параметрів, коли тривалість температурного сплеску на аварійній поверхні звичайно не перевищує декількох секунд. У деяких дослідженнях, зокрема в [16], виникнення режимів погіршеної тепловіддачі пов'язують із впливом архімедових сил, що зумовлюють природну конвекцію теплоносія. У роботі [3] фізичний вплив цього та інших чинників на погіршення тепловіддачі в умовах НКП відповідно до сучасних даних розглянуто більш детально. Навпаки, свого часу в роботі [17] вплив термогравітації на процес теплообміну в умовах НКП практично заперечувався.

Інші сучасні аспекти теплогідравліки аварійних режимів надкритичного теплоносія відповідно до специфічних умов Ак3 перспективних ЯР з НКП розглянуто в роботі [3]. Показово, що порівняльний аналіз сучасного стану теплофізичних досліджень процесів теплообміну і гідродинаміки надкритичного теплоносія, інформативно представлений у роботах [3, 7–9], у порівнянні з представницькою ретроспективою досліджень початкового періоду з роботи [18] свідчить про достатньо помірний прогрес у розумінні фізичних засад ТГП в умовах НКП. Так, зокрема, у роботі [19] було відзначено, що вплив

термогравітації на процес теплообміну в умовах НКП не є однозначним і, залежно від співвідношення об'ємних та інерційних сил (величина останніх характеризується співвідношенням Gr/Re^2), може бути як позитивним, так і негативним.

Поглиблення досліджень у цьому напрямі в роботі [20] дозволило з'ясувати, що за умов підйомного руху надкритичного теплоносія в діапазоні значень параметра $Gr/Re^2 = 0,01 \dots 0,6$ вільна конвекція однозначно погіршує тепловіддачу, особливо в околі співвідношення $Gr/Re^2 = 0,1$. У той же час, відповідно до сучасних уявлень [7, 8], при підйомному русі надкритичного теплоносія у вертикальному каналі його густина зменшується вздовж аксіальної координати знизу догори і набуває усталеного розподілу. У цих умовах енергія пульсаційного руху теплоносія витрачається на подолання сил термогравітації, що призводить до затухання турбулентного переносу й наступної ламінаризації плинину. У результаті ламінаризований пристінковий шар з підвищеним температурним опором спричиняє підвищення температури стінки каналу за умов суттєвого термічного прискорення потоку. Очевидно, що застосування спрощених моделей розрахункової гідродинаміки із використанням сучасних комп'ютерних кодів, розглянутих у роботі [9], фізично не може врахувати вищеразглянуті ускладнені фізичні ефекти й обмежується реалізацією виключно моделей турбулентності, які фізично не враховують розглянуті вище складні та взаємопов'язані теплофізичні ефекти.

Таким чином, за результатами більш ніж півстолітніх досліджень ТПП в умовах НКП є підстави констатувати, що незважаючи на суттєвий прогрес у розумінні фізики характеру впливу низки визначальних теплофізичних чинників на процеси теплообміну та гідродинаміки надкритичного теплоносія в каналах найпростіших геометрій (циліндричні, кільцеві) дотепер фактично не було отримано змістовних відповідей на деякі ключові питання. Показово, що головне з них стосується, насамперед, фізичної природи режиму погіршеної тепловіддачі.

Певний прогрес у цьому питанні було досягнуто під час дослідження умов виникнення в каналах теплообмінних пристроїв при НКП термоакустичних коливань (ТАК). Фізична природа, умови виникнення та динамічні особливості цих автоколивальних процесів розглянуто в роботах [4–6]. Характер тепловіддачі при НКП за наявності ТАК унаслідок якісної схожості з температурними режимами стінок парогенеруючих каналів за умов недогрітого кипіння

в них теплоносія в роботі [21] отримав назву «псевдокипіння». Слід зазначити, що найбільш фізично обґрунтована модель виникнення цього автоколивального процесу була запропонована в роботі [22]. Відповідно до цієї моделі інтенсифікація теплообміну при НКП у режимі покращеної тепловіддачі пов'язана з втратою гідродинамічної стійкості пристінкового шару надкритичного теплоносія і його подальшою руйнацією подібно до термодинамічної моделі кризи тепловіддачі, що була свого часу запропонована В. П. Скриповим і проаналізована в роботі [5]. Ця модель розглядає кризу кипіння 1-го роду суто як термодинамічний процес. Відповідно до цієї моделі головним фізичним чинником, що зумовлює виникнення кризи 1-го роду, є граничний перегрів пристінкового рідинного шару. При досягненні відповідного рівня цього перегріву пухляка структура у пристінковому шарі є термодинамічно невідповідною досягнутому рівню температурного потенціалу поверхні тепловіддачі. Саме з огляду на таку невідповідність пухляковий режим кипіння миттєво трансформується в плівковий режим. Таким чином, подібно до гідродинамічної моделі кризи тепловіддачі, яка була запропонована академіком АН СРСР С. С. Кутателадзе і також розглянута в роботі [5], термодинамічний підхід В. П. Скрипова цілковито виключає можливість попередньої структурної перебудови двофазного пристінкового шару, що суперечить даним останніх досліджень, а також отриманим за останні роки експериментальним результатам. Цим, незважаючи на суттєво відмінні фундаментальні фізичні засади, визначається деяка спорідненість термодинамічної та гідродинамічної моделей — адже в кожній з них, по суті, мова йде про миттєву фізичну перебудову структури пристінкового шару та переходу до якісно нового стану процесу тепловіддачі.

Подібна перебудова пристінкового шару, відповідно до гіпотези [22], має місце також у разі втрати термо- та гідродинамічної стійкості надкритичного теплоносія в околі режиму погіршеної тепловіддачі. Важливо, що руйнація перегрітого надкритичного пристінкового шару біля поверхні ТВЕЛ призводить до інтенсивних викидів перегрітого «гарячого газу» з цієї області в ядро надкритичного потоку з меншою температурою. У цих умовах об'єми «гарячого газу» інтенсивно деградують, що призводить до випромінювання хвиль тиску, тобто акустичних імпульсів. У роботі [4] із використанням результатів експериментів, які було проведено в областях до- та надкритичних параметрів, доведе-

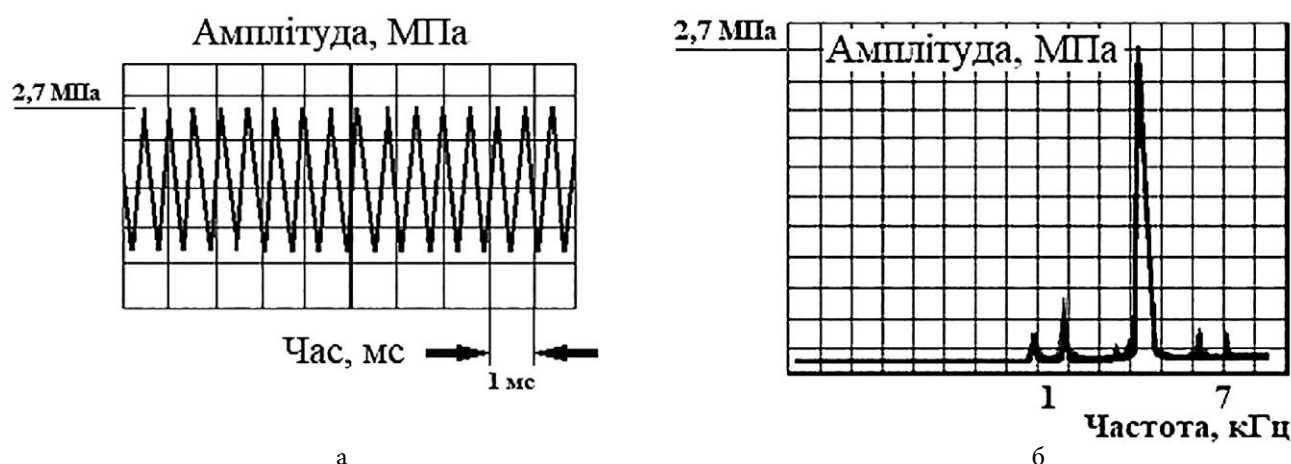


Рис. 2. Коливальні процеси в умовах НКП: а — осцилограма коливань тиску надкритичного ракетного палива, що зумовлені процесом теплообміну при НКП; б — частотний спектр попередньої осцилограми, що спостерігався в досліді з ТАК

но, що суперпозиція акустичних імпульсів у каналі теплообмінного пристрою генерує широкодіапазонний акустичний шум, у якому цей канал як резонатор виділяє та підсилює власні резонансні частоти, які проявляють себе саме як ТАК. Наведені на рис. 2 коливальні характеристики цих акустичних резонансів, що були отримані в роботі [23], у каналах ракетного двигуна з надкритичним паливом ілюструють спектральні та амплітудні характеристики цих небезпечних для конструкції автоколивань високої інтенсивності. Фізичні особливості та динамічні характеристики цих резонансних процесів свого часу було досліджено в циклі експериментів [4–6]. Визначальним у цих дослідженнях слід вважати нижчезазначений фізичний аспект. Підтвердження факту існування в умовах НКП своєїрідної «двофазності» дозволяє провести обґрунтовану аналогію між режимом плівкового кипіння за докритичних параметрів теплоносія та «псевдоплівковим» кипінням при НКП. Останній за своїми ознаками та температурною динамікою поверхні — це ніщо інше як режим погіршеної тепловіддачі.

Ґрунтовним підтвердженням цієї наукової гіпотези можуть бути експериментальні дослідження з роботи [24]. Подібність закономірностей аксіальних температурних розподілів, виявлених у цьому дослідженні циліндричних каналів в умовах надкритичних параметрів та в умовах різних режимів тепловіддачі, включаючи плівкове кипіння в докритичній області, дозволила автору зробити обґрунтований висновок про існування аналогічного фізичного механізму в цих фізично різних режимах

тепловіддачі. При цьому в процесі експериментів були виявлені такі фізичні особливості псевдокипіння в умовах НКП: 1) за відповідних значень тиску, масової швидкості, теплового потоку та геометричних характеристик каналу псевдоплівкове кипіння виникає, коли температура ядра потоку є нижчою за псевдокритичну температуру у пристінковому шарі; 2) зменшення діаметра каналу дає змогу підвищити густину теплового потоку, що відповідає псевдоплівковому кипінню; 3) при фіксованій масовій швидкості збільшення робочого тиску в області НКП дозволяє підвищити величину густини теплового потоку, що відповідає виникненню режиму псевдоплівкового кипіння.

На рис. 3 з роботи [24] представлено типові аксіальні температурні розподіли в циліндричному каналі з легководним теплоносієм в області НКП відповідно до умов виникнення в цьому каналі режиму псевдоплівкового кипіння. Показово, що характер температурного максимуму в режимі псевдоплівкового кипіння на цьому рисунку загалом подібний до аварійного стану поверхні теплообміну в режимі погіршеної тепловіддачі на рис. 1.

З огляду на вищезазначене слід підкреслити: а) режим погіршеної тепловіддачі має характерні ознаки псевдоплівкового кипіння в умовах НКП; б) превентивна діагностика цього аварійного режиму принципово може бути реалізована на основі раннього виявлення режиму початку псевдокипіння. Цей режим попередньо було проаналізовано в роботі [4] з точки зору фізики міжмолекулярної взаємодії. Далі умови його появи розглянуто докладніше.

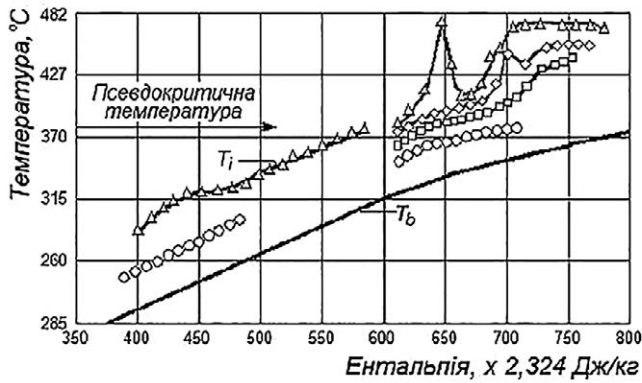


Рис. 3. Розподіл температури по довжині циліндричного каналу діаметром 18,5 мм: масова швидкість 408 кг/(м²с); тиск 25,3 МПа; густина теплового потоку, кВт/м²:
○ — 158; ◻ — 285; ◻ — 253; ◻ — 316

Теплофізика псевдокипіння надкритичного теплоносія

На відміну від поверхневої та статично усталеної топології ансамблю центрів пароутворення в режимі пазиркового кипіння область локалізації витоків псевдокипіння в умовах НКП має об'ємну топологію і не є статично сталою. Ця відмінність пов'язана з тим, що активація витоків псевдопарових утворень відбувається не на твердій поверхні, а реалізується в об'ємі пристінкового шару надкритичного теплоносія. Відповідно до фізичної моделі цього процесу, що була запропонована в роботі [25], псевдопарові утворення виникають не на сталих мікрозаглибленнях поверхні тепловіддачі, як під час кипіння рідини, а генеруються рухомими осердями турбулентних вихорів у пристінковому шарі надкритичного теплоносія. Слід зазначити, що необхідною передумовою початку псевдокипіння, подібно до процесу генерації парової фази за докритичних параметрів, є досягнення такого термодинамічного стану надкритичної системи, коли T_{ct} перевищує T_t (тобто температуру максимуму теплоємності потоку теплоносія), а температура рідини T_p є набагато нижчою від T_t . Іншими словами, коли в пристінковому шарі теплоносія знаходиться «гарячий газ», а в ядрі потоку присутня «холодна рідина». Аналізуючи, таким чином, фізичні умови виникнення процесів генерації парової фази та псевдокипіння, можна зі значним ступенем впевненості стверджувати: існує достатньо глибока фізична аналогія між надкритичною термодинамічною системою в області НКП та процесом недогрітого кипіння в області докритичних параметрів.

У пошуку подальших аналогій між процесом генерації парової фази та псевдокипінням вищенаведе-

ний порівняльний аналіз слід доповнити розглядом процесів виникнення верхніх фізичних меж розвитку штатних режимів тепловіддачі, кожен з яких може розвинути у відповідний аварійний режим. При цьому слід звернути увагу на те, що експериментально підтверджений низкою робіт [22, 25, 26] (включаючи дані швидкісної кінозйомки процесу тепловіддачі до турбулентного потоку надкритичного Н-гептану в циліндричних каналах [22]) факт існування режиму псевдоплівкового кипіння води та деяких інших теплоносіїв в області навколокритичних параметрів дозволяє фізично обґрунтувати можливість трансформації режиму псевдопузиркового кипіння в його псевдоплівковий різновид.

З урахуванням основних результатів вищезгаданих експериментальних робіт видається правомірним формулювання гіпотези процесу виникнення «погіршеної» тепловіддачі в умовах НКП, суть якої полягає в тому, що раптове зменшення інтенсивності тепловіддачі внаслідок теплоізолюючої дії накопичених у пристінковому шарі псевдопарових утворень є, загалом, подібним до виникнення та розвитку кризи тепловіддачі в докритичній області [27].

З огляду на розглянуту фізичну аналогію та відповідно до модельних уявлень [22] в умовах НКП при збільшенні теплового потоку і відповідному підвищенні T_{ct} турбулентні вихори набувають дедалі чіткіших обрисів і форма їх наближається до сферичної. При $T_{ct} > T_t > T_p$ вся поверхня тепловіддачі покривається псевдопаровими утвореннями розміром 0,1–0,01 мм, що рухаються разом з потоком рідини. Унаслідок їхнього виникнення відбуваються такі фізичні ефекти. По-перше, турбулентні вихори, відриваючись з пристінкового шару, що являє собою «гарячий газ» ($T_{ct} = 800 \dots 900$ К), і потрапляючи в холодне ядро потоку рідини ($T_p = 300$ К), під впливом сил, подібних до сил поверхневого натягу (вони виникають через великі градієнти густини), приймають форму сфери або близьку до неї. У результаті псевдопарові об'єми генеруються осердями випадково розподілених у пристінковому шарі турбулентних вихорів. По-друге, у холодному ядрі потоку псевдопарові утворення охолоджуються і, деградуючи, стискаються. Навпаки, у разі дотику турбулентних вихорів з холодного ядра потоку до гарячої стінки псевдорідинні об'єми розширюються і стають подібними до парових асоціацій. Їхнє накопичення у пристінковому шарі зі збільшенням теплового навантаження поверхні тепловіддачі призводить до виникнення псевдоплівкових утворень, що є подібним

до умов виникнення кризи тепловіддачі за докритичних параметрів, яка звичайно супроводжується різким зростанням температури поверхні тепловіддачі.

Як відомо [27], в умовах кипіння з недогрівом різниця температур $T_{ст} - T_p$ порівняно невелика (від кількох до десятків градусів), тобто температурні градієнти у пристінковому шарі відносно невеликі. На відміну від цих, достатньо помірних величин температурних напорів, псевдокипіння починає себе проявляти лише у разі різниці $T_{ст} - T_p$ близько сотень градусів. З огляду на це слід звернути також увагу на фізичний аспект процесу в умовах докритичних термодинамічних параметрів. Так, насамперед, добре відомо [27], що всі визначальні характеристики кипіння, зокрема з недогрівом, залежать від тиску: чим вище тиск, тим прояви кипіння з недогрівом слабші. З огляду на це можна стверджувати, що аналогія кипіння з недогрівом у порівнянні із псевдокипінням є тим глибшою, чим менша різниця тисків, за яких порівнюються процеси. Таким чином, наявність псевдокипіння при НКП робить неадекватним розгляд надкритичного теплоносія як однофазної системи. Останнє унеможливає застосування при теплогідравлічному розрахунку ЯР з НКП емпіричних залежностей для «гарячого газу» як універсальних для всієї області експлуатаційних параметрів перспективних РУ.

Наведені вище аналітичні дані та експериментальні результати, що об'єктивно відображають сучасний стан досліджень взаємопов'язаного комплексу макро- та мікрофізичних ефектів, які супроводжують ТПП в області НКП, дають підстави стверджувати: 1) суттєва обмеженість існуючої розрахункової бази стосовно теплових та гідродинамічних процесів в області НКП унеможливає реалізацію надійного теплогідравлічного розрахунку АкЗ перспективних ЯР з НКП; 2) сучасний рівень фізичних знань та модельних уявлень щодо специфічних особливостей перебігу ТПП в надкритичній області недостатній для надійного розрахунку процесів теплообміну та гідродинаміки в каналах ЯР з надкритичними термодинамічними параметрами; 3) висока складність і ймовірнісний характер макро- та мікроефектів, що супроводжують перебіг ТПП в умовах НКП, зумовлюють необхідність розробки якісно нових методів теплофізичних досліджень цих складних процесів на основі новітніх технологій.

Як приклад практичного застосування одного з нових теплофізичних методів дослідження макро- та мікрофізичних ефектів в області НКП доцільно про-

аналізувати структуру сигналів динамічного тиску, а також ТАК у цих умовах у разі плинну легководного теплоносія в циліндричному експериментальному каналі відповідно до даних роботи [28]. Слід зазначити, що наведені нижче експериментальні результати можуть бути додатковим підтвердженням адекватності фізичної моделі виникнення псевдокипіння, а також подальшого розвитку цього режиму в ТАК відповідно до фізичної гіпотези щодо виникнення цих автоколивань, яка була вперше сформульована в роботі [22]. На рис. 4 за даними роботи [28] наведено типові спектрограми акустичного шуму в експериментальному циліндричному каналі з внутрішнім діаметром 6,3 мм і довжиною обігріву 0,6 м за умов тиску 23,5 МПа та різних рівнів густини теплового потоку q , різних масових швидкостей надкритичного теплоносія ρw та його різних вхідних температур.

При цьому перша спектрограма на рис. 4, а відповідає початку псевдокипіння, другий амплітудно-частотний спектр (б) характеризує розвинене псевдокипіння, а третя спектральна структура (в) зареєстрована в експериментальному каналі в режимі виникнення в ньому ТАК, що проявляють себе як резонансні автоколивання тиску. Подальше підвищення густини теплового потоку на поверхні тепловіддачі в розглянутому експерименті призвело до виникнення на ній аварійного режиму погіршеної тепловіддачі. Таким чином, з огляду на вищезазначене, можна вважати, що між процесом кипіння з недогрівом та псевдокипінням в умовах НКП існує достатньо глибока аналогія щодо впливу фізики поверхневих ефектів на формування поверхонь розділу фаз. Насамперед ця аналогія стосується режиму початку псевдокипіння, спектральна структура акустичної емісії якого представлена на рисунку (а). Як випливає з вищезазначених результатів, ця спектральна структура адекватно характеризує теплофізичні процеси, що, відповідно до даних роботи [4], реалізуються на молекулярному рівні в пристінковому шарі поверхні тепловіддачі в області НКП. Саме ці початкові теплофізичні ефекти, що реалізуються в надкритичному теплоносії і безпосередньо пов'язані з активацією в ньому перших псевдопарових утворень при подальшому зростанні теплового навантаження поверхні тепловіддачі, відіграють визначальну роль у виникненні та розвитку аварійної динаміки режиму погіршеної тепловіддачі. Цей фізичний зв'язок створює необхідні передумови для реалізації превентивної діагностики початку переходу ТПП у надкритичному пристінковому шарі поверхні

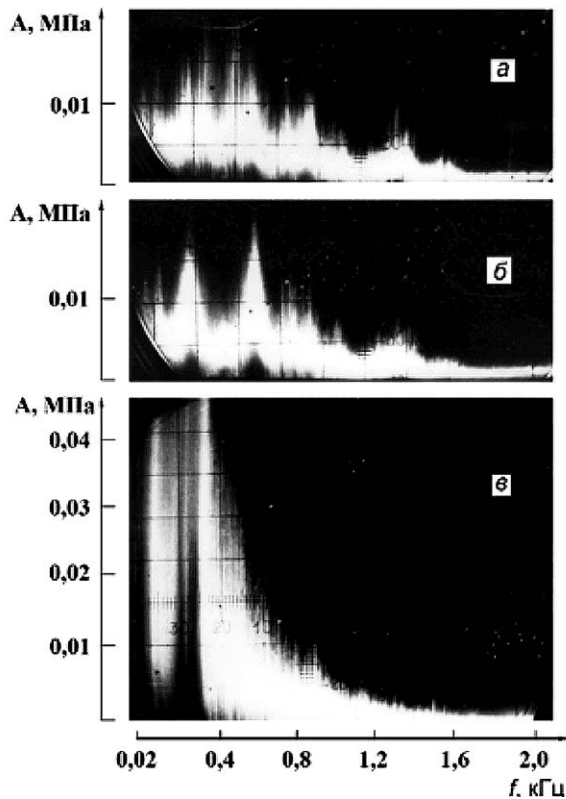


Рис. 4. Спектральна структура сигналів акустичного шуму в режимах: а — початку псевдокипіння (масова швидкість $\rho w = 250 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, густина теплового потоку $q = 0,325 \text{ МВт}/\text{м}^2$, вхідна температура легководного теплоносія $T_{\text{вх}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$); б — розвинутого псевдокипіння ($\rho w = 500 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, $q = 1,35 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $T_{\text{вх}} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$); в — ТАК ($\rho w = 500 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{с})$, густина теплового потоку $q = 1,47 \text{ МВт}/\text{м}^2$, $T_{\text{вх}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$)

тепловіддачі до наступного аварійного режиму, що спричиняє перегрів і руйнацію ТВЕЛ.

Висновки

1. Виникнення перших псевдопарових утворень в області НКП, що генеруються рухомими осередками турбулентних вихорів у пристінковому шарі надкритичного теплоносія, є необхідною фізичною передумовою для подальшого переходу цього початкового режиму псевдопузиркового кипіння до його аварійного псевдоплівкового різновиду.

2. Наявність режиму псевдоплівкового кипіння є фізичною першопричиною формування аварійного режиму погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в умовах НКП.

3. Експериментально підтвержене існування процесу псевдофазового переходу в надкритичному теплоносії, яке фізично зумовлює втрату ним суціль-

ності середовища, унеможливорює (або робить неадекватним) застосування сучасних комп'ютерних кодів на основі кінцевоелементних методів обчислювальної гідродинаміки, що останнім часом почали широко використовуватися для визначення умов виникнення режиму погіршеної тепловіддачі в каналах перспективних реакторів з надкритичними параметрами.

4. Між процесом кипіння з недогрівом за докритичних термодинамічних параметрів та псевдофазовим переходом у надкритичній області існує достатньо глибока аналогія щодо впливу фізики поверхневих ефектів на формування поверхонь розділу фаз.

5. Спектральна структура акустичної емісії процесу псевдофазового переходу в навколокритичній області адекватно характеризує визначальні фізичні особливості псевдокипіння.

6. Висока складність і ймовірнісний характер фізичних процесів, що супроводжують псевдофазовий перехід у навколокритичній області, зумовлюють необхідність розробки якісно нових методів превентивної діагностики аварійного режиму погіршеної тепловіддачі на початку виникнення псевдопарових утворень на поверхні ТВЕЛ.

7. Існування процесу псевдофазового переходу унеможливорює застосування для теплогідрравлічного розрахунку перспективних ЯР з НКП емпіричних залежностей для «гарячого газу», які застосовують для всього діапазону теплових навантажень каналів АкЗ.

8. Суттєвий дефіцит засадничих теплофізичних даних, що мають забезпечити надійний розрахунок процесу тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ у ТВЗ, а також визначення гідродинамічних характеристик реакторних каналів у навколокритичній області унеможливорює реалізацію надійного теплогідрравлічного розрахунку ЯР з НКП.

9. Відсутність необхідної теплофізичної розрахункової бази для визначення засадничих теплогідрравлічних параметрів АкЗ з НКП відтермінує практичну реалізацію існуючих концепцій створення ЯР з НКП.

Список використаної літератури

1. Світові тенденції розвитку конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараєвський, Фіалко Н. М., Зімін Л. Б. [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 теплогідрравлічного 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 теплогідрравлічної 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. Теплофизика безопасности атомных электростанций / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко [и др.]. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. — 484 с.
 6. Теплофизика надежности активных зон / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко [и др.]. — Чернобыль: ИПБ АЭС НАН Украины, 2015. — 772 с.
 7. Петухов Б. С. Вопросы теплообмена. Избранные труды / Б. С. Петухов. — Москва : Наука, 1987. — 278 с.
 8. Pioro I. L. Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications / I. L. Pioro, R. V. Duffey. — New York, NY, USA : ASME Press, 2007. — 334 p.
 9. Режимы ухудшенного теплообмена при течении воды сверхкритического давления в каналах с пучками стержней / М. М. Ковецкая, Е. А. Кондратьева, Ю. Ю. Ковецкая [и др.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2016. — № 1(7). — С. 26–32.
 10. Петухов Б. С. Теплообмен в однофазной среде при околокритических параметрах состояния / Б. С. Петухов // ТВТ. — 1968. — № 4. — С. 732–745.
 11. Соотношение для коэффициента теплоотдачи к водороду при кипении и сверхкритическом давлении / Хендрикс Р. С. [и др.] // Ракетная техника. — 1962. — Т. 2. — С. 77–87.
 12. Шицман М. Е. Ухудшение режима теплоотдачи при закритическом давлении / М. Е. Шицман // ТВТ. — 1963. — Т. 1, № 2. — С. 267–278.
 13. Орнатский А. П. Теплообмен при подъемном движении воды в трубах малого диаметра при сверхкритических давлениях / А. П. Орнатский, Л. Ф. Глущенко, С. И. Калачев // Теплоэнергетика. — 1971. — № 5. — С. 91–93.
 14. Hsu Y. Y. Intern Developments in Heat Transfer / Y. Y. Hsu. — ASME, 1963. — pD-188.
 15. Стырикович М. А. Некоторые данные по температурному режиму вертикальной кипяточной трубы при околокритических давлениях / М. А. Стырикович, М. Е. Шицман, З. Л. Миропольский // Теплоэнергетика, — 1955. — № 12. — С. 32–36.
 16. Hall W. B. Heat transfer near the critical point / W. B. Hall // Advances in Heat Transfer. — 1971. — Vol. 7. — P. 1–76.
 17. Лабунцов Д. А. Некоторые вопросы конвективного теплообмена в сверхкритической области / Д. А. Лабунцов // Теплоэнергетика. — 1972. — № 3. — С. 69–74.
 18. Разумовский В. Г. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление гладких каналов при турбулентном течении воды сверхкритического давления: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. Г. Разумовский. — Киев, 1984. — 24 с.
 19. Глущенко Л. Ф. Определение условий существования ухудшенных режимов теплоотдачи при сверхкритических давлениях среды / Л. Ф. Глущенко, С. И. Калачев, О. Ф. Гандзюк // Теплоэнергетика. — 1972. — № 2. — С. 69–72.
 20. Икрянников Н. П. К вопросу теплоотдачи в однофазной околокритической области при вязкостно-инерционно-гравитационном течении / Н. П. Икрянников, Б. С. Петухов, В. С. Протопопов // ТВТ. — 1973. — Т. 11, № 5. — С. 1068–1075.
 21. Goldman K. Heat transfer to supercritical water at 500 psi flowing at high mass flow rates through round tubes / K. Goldman // Int. Development in Heat Transfer, part III. — 1961. — P. 561–568.
 22. Кафенгауз Н. Л. О механизме псевдокипения / Н. Л. Кафенгауз // Тр. ЭНИН / Государственный научно-исследовательский энергетический институт им. Г. М. Кржижановского. — 1974. — Вып. 25. — С. 229–235.
 23. Хайнес В. Пульсации давления при теплоотдаче к жидким углеводородам при сверхкритических давлениях и температурах / В. Хайнес, Х. Вольф // Ракетная техника. — 1962. — № 3.
 24. Аккерман К. Теплоотдача при псевдокипании воды в закритической области в гладких и оребренных трубах / К. Аккерман // Тр. амер. об-ва инженеров-механиков (Trans. of the ASME). — 1970. — Сер. С. — Т. 92, № 3.
 25. Экспериментальное исследование механизма псевдокипения в Н-гептане / И. Т. Аладьев, В. Д. Васянов, Н. Л. Кафенгауз [и др.] // Инж.-физ. журн. — 1976. — Т. 31, № 3. — С. 389–395.
 26. Кафенгауз Н. Л. Теплоотдача к турбулентному потоку жидкости в трубах при сверхкритических давлениях / Н. Л. Кафенгауз // Инж.-физ. журн. — 1983. — Т. 44, № 1. — С. 14–19.
 27. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении / В. И. Толубинский. — Киев : Наук. думка, 1980. — 316 с.
 28. Шараєвський І. Г. Розпізнавання передаварійних теплогідрравлічних процесів у водоохолоджуваних ядерних

енергетичних реакторах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / І. Г. Шараєвський. — Київ : ІПБ АЕС НАН України, 2010. — 48 с.

**I. G. Sharaevsky, N. M. Fialko, A. V. Nosovskyi,
L. B. Zimin, T. S. Vlasenko, G. I. Sharaevsky**

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

Problems of Abnormal Dynamics of Thermal Hydraulic Processes in Prospective Reactors with Supercritical Parameters of Light Water Coolant

A complex of scientific and technical problems directly related to the priority of ensuring the operational safety and reliability of the cores of promising power nuclear reactors with supercritical thermodynamic parameters of a light-water coolant is systematized. The problems of implementation of effective heat removal from the surface of fuel elements and ensuring reliable calculation of thermal and hydrodynamic processes in turbulent flows of a supercritical coolant are considered. The main attention in the consideration of thermohydraulic processes in the near-critical region is paid to the conditionality of the physical nature of these processes by the regularities of transformation of the thermophysical properties of the coolant with changes in its temperature. It is noted that these phenomena have not been sufficiently studied and that modern designers of nuclear reactors with supercritical parameters practically do not have physically substantiated adequate ideas about the physical nature of an emergency mode of deteriorated heat transfer, which can arise unpredictably on the surface of a fuel element even if it is continuously cooled by a coolant with supercritical parameters. It is only known that the main physical sign of the occurrence of this emergency mode is a significant deterioration in heat transfer, which becomes abnormally low, but the physical reasons for such a dangerous anomaly are currently unknown. Based on the analysis of the molecular kinetics data of the near-wall coolant layer, it was proposed to consider such facts of an emergency decrease in the heat transfer intensity due to the appearance of an unknown pseudo-film boiling regime on the fuel element surface. In this context, it is shown that under the conditions under study, macromolecular assemblies in the form of pseudo-vapor formations can appear on the heat exchange surface, as a result of which the heat

transfer on the fuel element surface is disturbed. Using experimental data, it is shown that there is a rather deep physical analogy between heat transfer in a supercritical thermodynamic system and the subcooled boiling process at subcritical parameters of the coolant. The dynamics of changes in the characteristics of the experimental spectra of acoustic emission of pseudo-boiling with a sequential increase in the thermal load is analyzed and it is shown that these phenomena can, in principle, be used in promising systems for diagnostic monitoring of reactors with supercritical parameters for early detection of the initial phases of pseudo-boiling and prompt prevention of the occurrence of emergency modes of deteriorated heat transfer.

Keywords: light-water nuclear reactor, supercritical parameters of the coolant, deteriorated heat exchange, channel wall temperature, heat load.

References

1. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2020). [World trends of construction development of water-cooled supercritical pressure reactors]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia [Nuclear power and the environment]*, vol. 17, no. 2, pp. 3–15. doi.org/10.31717/2311–8253.20.2.1. (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]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia [Nuclear power and the environment]*, vol. 18, no. 3, pp. 34–41. doi.org/10.31717/2311–8253.20.3.4. (in Ukr.)
3. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Nosovskyi A. V., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2020). [Problematic issues of thermohydraulic calculation of core zones of promising water-cooled reactors with supercritical parameters]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia [Nuclear power and the environment]*, vol. 19, no. 4, pp. 3–15. doi.org/10.31717/2311–8253.20.4.1. (in Ukr.)
4. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Nosovskyi A. V., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2021) [Actual problems of the thermal hydraulic reliability ensuring of prospective nuclear reactors with supercritical parameters]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia [Nuclear power and the environment]*, vol. 20, no. 1, pp. 27–38. doi.org/10.31717/2311–8253.21.1.2. (in Ukr.)
5. Kliuchnikov A. A., Sharaevskyi I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevskyi G. I. (2010). *Teplofizika bezopasnosti atomnykh elektrostancii [Thermophysics of NPP safety]*. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 484 p. (in Russ.)

6. Kliuchnikov A. A., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevsky G. I. (2015). *Teplofizika nadezhnosti aktivnykh zon* [Thermal physics of active zones reliability]. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 772 p. (in Russ.)
7. Petukhov B. S. (1987). *Voprosy teploobmena. Izbrannye trudy* [Heat transfer issues. Selected Works]. Moscow: Nauka, 278 p. (in Russ.)
8. Pioro I. L., Duffey R. B. (2007). *Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications*. New York, NY, USA: ASME Press, 334 p.
9. Kovetskaya M. M., Kondrat'eva E. A., Kovetskaya Yu. Yu., Kravchuk A. V., Skitsko A. I., Sorokina T. V. (2016). [Modes of degraded heat transfer during supercritical pressure water flow in channels with rod bundles]. *Yaderna enerhetyka ta dovykillia* [Nuclear power and the environment], vol. 7, no. 1, pp. 26–32. (in Russ.)
10. Petukhov B. S. (1968). [Heat transfer in a single-phase medium at near-critical state parameters]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [Thermal physics of high temperatures], vol.6, no. 4, pp. 732–745. (in Russ.)
11. Hendricks R. C., Graham R. W., Hsu Y. Y., Medeiros A. A. (1962). [Correlation of hydrogen heat transfer in boiling and supercritical pressure states]. *Raketnaya tekhnika* [Rocket technology], vol. 2, pp. 77–87. (in Russ.)
12. Shitsman M. E. (1963). [Deterioration of the heat transfer regime at supercritical pressure] *Teplofizika vysokikh temperatur* [Thermal physics of high temperatures], vol. 1, no.2, pp. 267–278. (in Russ.)
13. Ornatsky A. P., Glushchenko L. F., Kalachev S. I. (1971). [Heat transfer during the lifting movement of water in small-diameter pipes at supercritical pressures]. *Teploenergetika* [Heat power engineering], vol. 5, pp. 91–93. (in Russ.)
14. Hsu Y. Y. (1963). *Intern developments in heat transfer*. ASME, pD-188.
15. Styrikovich M. A., Shitsman M. E., Miropolsky Z. L. (1955). [Some data on the temperature regime of a vertical boiling pipe at near-critical pressures]. *Teploenergetika* [Heat power engineering], vol. 12, pp. 32–36. (in Russ.)
16. Hall W. B. (1971). Heat transfer near the critical point. *Advances in Heat Transfer*, vol. 7, pp. 1–76.
17. Labuntsov D. A. (1972). [Some questions of convective heat transfer in the supercritical region]. *Teploenergetika* [Heat power engineering], vol. 3, pp. 69–74. (in Russ.)
18. Razumovsky V. G. (1984). *Teplootdacha i gidravlicheskie sroyivleniya gladkykh kanalov pri turbulentnom techenii vody sverkhkriticheskogo davleniya* [Heat transfer and hydraulic resistance of smooth channels in a turbulent flow of supercritical water]. (PhD thesis). Kyiv: KPI, 24 p. (in Russ.)
19. Glushchenko L. F., Kalachev S. I., Gandziuk O. F. (1972). [Determination of the conditions for the existence of deteriorated heat transfer modes at supercritical pressures]. *Teploenergetika* [Heat power engineering], vol. 2, pp. 69–72. (in Russ.)
20. Ikriyannikov N. P., Petukhov B. S., Protopopov V. S. (1973). [On the issue of heat transfer in a single-phase near-critical region in a viscous-inertial-gravitational flow]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [Thermal physics of high temperatures], vol. 11, no. 5, pp. 1068–1075. (in Russ.)
21. Goldman K. (1961). Heat transfer to supercritical water at 500 psi flowing at high mass flow rates through round tubes. *Int. Development in Heat Transfer*, part III, pp. 561–568.
22. Kafengauz N. L. (1974). *O mekhanizme psevdokipeniya* [About the mechanism of pseudo-boiling]. Proceedings of the ENIN (G. M. Krzhizhanovsky State Energetics Institute, Moscow), vol. 25, pp. 229–235. (in Russ.)
23. Hiness V., Wolf H. (1962). [Pressure pulsations during heat transfer to liquid hydrocarbons at supercritical pressures and temperatures]. *Raketnaya tekhnika* [Rocket technology], vol. 3. (in Russ.)
24. Akkerman K. (1970). [Heat transfer during pseudo-boiling of water in the supercritical region in smooth and finned pipes]. *Trans. of the ASME, series C*, vol. 92, no. 3. (in Russ.)
25. Aladiev I. T., Vas'yanov V. D., Kafengauz N. L., Lebedeva A. G., Morozov Yu. N. (1976). [An experimental study of the mechanism of pseudo-boiling in h-heptan]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], vol. 31, no. 3, pp. 389–395. (in Russ.)
26. Kafengauz N. L. (1983). [Heat transfer to a turbulent fluid flow in pipes at supercritical pressures]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [Engineering Physics Journal], vol. 44, no. 1, pp. 14–19. (in Russ.)
27. Tolubinsky V. I. (1980). *Teploobmen pri kipenii* [Boiling heat transfer]. Kyiv: Naukova dumka, 316 p. (in Russ.)
28. Sharaevsky I. G. (2010). *Rozpiznavannya peredavariynykh teplohivnichnykh protsesiv u vodooholodzhuvanykh yadernykh enerhetychnykh reaktorakh* [Recognition of pre-emergency thermohydraulic processes in water-cooled nuclear power reactors]. (PhD thesis). Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 48 p. (in Ukr.)

Надійшла 12.04.2021

Received 12.04.2021