

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

Актуальні проблеми забезпечення теплогідравлічної надійності перспективних ядерних реакторів з надкритичними параметрами

Ключові слова:

ядерний реактор з легководним теплоносієм, надкритичні параметри, погіршений теплообмін, псевдокипіння теплоносія, турбулентні вихори, термоакустичні коливання, псевдоплівкове кипіння.

Відзначено суттєвий дефіцит достовірної інформації про фізичні особливості перебігу теплогідравлічних процесів в аварійних режимах тепловіддачі під час охолодження поверхні ТВЕЛ легководним теплоносієм із надкритичними термодинамічними параметрами, зокрема щодо фізики перебігу процесів теплообміну та гідродинаміки в навколокритичній області. Показано, що в цих умовах існує фізична невизначеність причин виникнення погіршеної тепловіддачі, що обмежує можливості створення ефективних розрахункових методик для надійного визначення верхньої межі безпечного форсування процесу тепловіддачі в активній зоні. Приділено увагу можливому виникненню на цій поверхні макромолькулярних ансамблів у вигляді псевдопарових утворень, що здатні спричинити аварійний режим псевдоплівкового кипіння. На основі наведених експериментальних даних різних авторів доведено існування достатньо глибокої фізичної аналогії між процесами теплообміну в надкритичній термодинамічній системі та недогрітого кипіння за докритичних параметрів теплоносія.

Вступ

Однією з актуальних проблем розвитку ядерних енергетичних технологій є необхідність суттєвого підвищення наукового рівня концептуальних проєктів ядерних реакторів (ЯР) наступного покоління з надкритичними параметрами (НКП) легководного теплоносія, зокрема розробка фізично обґрунтованої методології теплогідравлічного розрахунку активних зон (АкЗ) цих реакторних установок (РУ). Успішне вирішення широкого кола експериментальних і теоретичних завдань, безпосередньо пов'язаних з реалізацією цієї комплексної проблеми, треба розглядати як визначальний напрям наукового забезпечення експлуатаційної надійності майбутніх РУ з НКП.

З огляду на фундаментальну роль цих досліджень, які є основою для забезпечення експлуатаційної безпеки перспективних РУ з НКП, у першу чергу мають бути попередньо окреслені головні фізичні аспекти цієї комплексної проблеми.

Як відомо [1], суть головної безпекової вимоги, якій мають задовольняти всі без винятку системи охолодження АкЗ ЯР, полягає в забезпеченні цими системами ефективної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ у штатних та аварійних режимах експлуатації РУ. З цього фундаментального постулату експлуатаційної безпеки ядерних енергоустановок (ЯЕУ) випливає пріоритетна роль всебічного наукового обґрунтування комплексу теплогідравлічних розрахунків каналів для руху теплоносія в АкЗ як критичних елементів

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

конструкції в кожному з розроблюваних проектів РУ. В основному це стосується наявності в інженерів-розробників відповідного типу ЯЕУ науково обґрунтованих даних про характер та особливості перебігу процесів теплообміну на поверхні ТВЕЛ та пов'язаних з ними гідродинамічних характеристик робочих каналів АкЗ ЯР. Саме ця визначальна науково-технічна інформація має стати фундаментальною основою для реалізації фізично обґрунтованого теплогідрравлічного розрахунку АкЗ перспективних ЯР з НКП.

У той же час створення такої наукової основи в останні роки стикається зі значною кількістю невирішених проблемних питань. Особливо це стосується самого факту використання легководного теплоносія з НКП, що, як відомо [1], відзначається низкою специфічних теплофізичних властивостей. Серед них, зокрема, не тільки нелінійна, але навіть екстремальна залежність теплофізичних властивостей води від температури, що проявляє себе в зоні її навколомкритичних термодинамічних параметрів. З огляду на таку визначальну фізичну особливість води в області НКП треба звернути увагу також на наявність суттєвих інформаційних прогалин у сучасних наукових знаннях про перебіг теплових та гідродинамічних процесів у каналах теплообмінних пристроїв у навколомкритичній області. Необхідно відзначити, що існуючий значний дефіцит достовірної інформації про фізичні особливості перебігу теплогідрравлічних процесів (ТГП) у нерегламентних режимах тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ в умовах НКП не дає змоги перейти до розробки ефективної розрахункової методики аварійних режимів експлуатації АкЗ перспективних РУ четвертого покоління. При цьому зазначений дефіцит наукових знань стосується не лише характерних фізичних проявів виникнення початкових фаз розвитку нерегламентних режимів тепловіддачі на рівні теплогідрравлічних макроефектів, що виникають за умов виникнення та розвитку нерегламентних ТГП. Насамперед це стосується також суттєвої обмеженості достовірних наукових даних щодо фізики молекулярних явищ, що супроводжують теплообмін та гідромеханіку теплоносія в навколомкритичній області.

Таким чином, з огляду на вищезазначений стан сучасних методологічних розробок теплогідрравлічного розрахунку ЯР з НКП можна стверджувати, що актуальними науковими завданнями зазначеної проблематики наразі є: 1) системний аналіз макрофізичних ефектів, що супроводжують виникнення нерегламентних режимів тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ в умовах

НКП; 2) міждисциплінарна систематизація невідомих широкому науковому та інженерному загалу мікроефектів, які реалізуються на молекулярному рівні в робочих каналах АкЗ і проявляють себе в навколомкритичній області. Вирішенню цих науково-інженерних завдань і присвячено представлену публікацію.

Теплофізичні особливості виникнення погіршеної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ в області НКП на макрорівні

Як зазначено вище, системний аналіз макрофізичних ефектів, що проявляють себе за умов розвитку штатних, а також нерегламентних режимів тепловіддачі в навколомкритичній області у пристінковому шарі поверхні тепловіддачі ТВЕЛ, треба розглядати як функціональну основу подальшої розробки ефективної методики надійного визначення температурних режимів ТВЕЛ в АкЗ ЯР з НКП, а також як необхідну передумову фізично обґрунтованого розрахунку гідродинамічних характеристик цих РУ, включаючи визначення гідрравлічного опору їхніх тепловидільних збірок (ТВЗ). Зважаючи на комплексний характер такого наукового завдання, його вихідною складовою частиною, у першу чергу, має бути розгляд наявних розрахункових підходів до оцінки інтенсивності тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, а також аналіз методик визначення гідродинамічних характеристик робочих каналів ЯР з НКП. Результати систематизації відомих наукових даних щодо перебігу ТГП в умовах НКП представлено далі.

Так, наприклад, авторами монографій [1–3] було систематизовано головні результати теоретичних та експериментальних досліджень, які було виконано за останні роки для виявлення визначальних фізичних особливостей перебігу процесів теплообміну та гідродинаміки в умовах течії легководного теплоносія з НКП у каналах циліндричної та кільцевої геометрії. Враховуючи цей науковий доробок та, особливо, деякі фундаментальні результати комплексного аналізу розглянутих в [1–3] робіт, треба звернути увагу на їхні принципові аспекти.

1. Найбільш дослідженою на теперішній час є низка характерних макрофізичних проявів перебігу ТГП за умов НКП (аксіальних розподілів температури стінки поверхні тепловіддачі, динаміки зміни гідрравлічного опору відповідного каналу, трансформації величини коефіцієнтів тепловіддачі в ньому та ін.), але лише в досліджених авторами найпростіших геометріях поверхні тепловіддачі.

2. Надійних експериментальних даних щодо перебігу ТГП за умов НКП у каналах зі складною формою поверхні тепловіддачі, яка відповідає геометрії ТВЗ, на сьогодні немає.

3. Переважна більшість теоретичних та експериментальних досліджень ТГП за підйомного та опускного рухів легководного теплоносія в каналах циліндричної та кільцевої геометрії стосуються лише «нормального» режиму тепловіддачі, характер якого визначається виключно локальними теплогідрравлічними параметрами та відповідає умовам змішаної турбулентної конвекції перегрітого до «газового» стану теплоносія в режимі його інерційно-в'язкісної течії.

4. На відміну від «нормальної» тепловіддачі в «газовому» стані теплоносія, коли аксіальні температурні профілі каналу є здебільшого близькими до лінійних, в умовах виникнення погіршеної тепловіддачі температурні розподіли по довжині каналу стають нелінійними, а температура стінки робочого каналу набуває екстремальних значень, що звичайно перевищують допустимі для конструктивних матеріалів ТВЕЛ межі.

5. Фізична природа виникнення погіршеної тепловіддачі в каналах теплообмінних пристроїв в умовах НКП залишається практично нез'ясованою, причому методика надійного розрахункового прогнозування цих аварійних режимів на сьогодні відсутня.

6. Наявні результати комп'ютерного моделювання перебігу ТГП у характерних частинах ТВЗ із використанням суттєво спрощеного стільникового підходу та за відсутності на теперішній час реальних експериментальних даних із динаміки поперекового тепломасообміну між окремими теплогідрравлічними стільниками стрижньової збірки в небагатьох відомих роботах відповідають лише режиму «нормальної» тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, яка безальтернативно та без необхідного теплофізичного обґрунтування використовується авторами розглянутих у [1–3] робіт.

7. У разі значного погіршення інтенсивності тепловіддачі за умов НКП на процес виникнення вздовж аксіальної координати каналу потенційно небезпечних температурних максимумів визначальним чином впливає характер передісторії потоку, а також геометричні характеристики та інтенсивність тепловіддачі на вихідній ділянці каналу.

8. Доведеним є суттєвий фізичний вплив амплітудно-частотних характеристик коливальної нестійкості теплоносія з НКП на аксіальні температурні розподіли за довжиною поверхні тепловіддачі, зокрема на величину та локалізацію екстремальних температурних піків.

На додаток до вищенаведеного переліку проблемних питань та з урахуванням існуючого сьогодні дефіциту адекватних фізичних моделей щодо виникнення умов погіршення тепловіддачі в каналах теплообмінних пристроїв в умовах НКП треба підкреслити таке. По-перше, фізична невизначеність причин виникнення режимів погіршеної тепловіддачі накладає суттєві обмеження на розробку адекватних методик надійного розрахунку верхньої межі безпечного форсування процесу тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ у робочих каналах АкЗ ЯР з НКП. По-друге, у проектних розробках ЯР з НКП передбачається, що ефективне охолодження поверхні ТВЕЛ має бути забезпечене на основі використання теплоносія, якому в навколокритичній області притаманні достатньо специфічні теплофізичні властивості. Як відомо [1], головною ознакою цих властивостей у зоні навколокритичних параметрів є суттєва та в більшості випадків нелінійна залежність від рівня досягнутої температури значень, зокрема ізобарної теплоємності, в'язкості, теплопровідності, об'ємної густини, критерію Прандтля та ін. Прямим наслідком такої складної температурної залежності теплофізичних властивостей легководного теплоносія в зоні НКП є створення передумов для виникнення низки таких характерних теплогідрравлічних режимів у вертикальних каналах теплообмінних пристроїв, які не мають аналогів у докритичній області. Ними, зокрема, є режими інерційно-в'язкісної та гравітаційно-в'язкісної течії теплоносія, що здатні ініціювати виникнення аномальних та аварійних режимів тепловіддачі, як це підкреслюється в [1, 2]. Відповідно до сучасних уявлень про причини виникнення таких нерегламентних теплогідрравлічних режимів в умовах НКП поки можна лише стверджувати, що ці режими є результатом суперпозиції та взаємного впливу декількох фізичних чинників.

Так, відповідно до даних аналізу з роботи [3] аварійні режими тепловіддачі в більшості випадків зумовлені фактом виникнення деякого характерного співвідношення сил вільної та вимушеної конвекції, що діють за підйомного руху теплоносія з НКП у вертикальному каналі. У цих умовах аварійний за тепловіддачею стан поверхні проявляє себе двома різними температурними аномаліями: а) появою одного окремого локального температурного максимуму; б) виникненням глобального підвищення температури стінки впродовж всієї довжини теплообмінної поверхні. На думку авторів робіт [4, 5], подібні аварійні режими тепловіддачі в умовах НКП

зумовлені, у першу чергу, локальними збуреннями теплофізичних властивостей теплоносія, що виявляються саме в навіолокритичній області. Особливо це стосується збурень температуропровідності, що відбуваються у пристінковому шарі під час досягнення ним псевдокритичної температури. Навпаки, за даними інших досліджень [6–8], суттєве погіршення тепловіддачі за НКП зумовлене, насамперед, процесом ламінаризації течії теплоносія в умовах його суттєвого термічного прискорення у вертикальному каналі.

Треба звернути увагу на те, що вищезазначені фізичні моделі [3–8], які з теплофізичної точки зору обґрунтовують процес виникнення погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в умовах НКП, свого часу було покладено в основу відповідних емпіричних розрахункових залежностей. Останні було системно проаналізовано в роботах [1, 2]. Проте в нещодавній роботі [9], що є типовою для сучасних розрахункових досліджень теплообміну та гідродинаміки в зоні НКП, наявний науковий доробок вищезазначених системних досліджень із робіт [1–8] фактично не було прийнято до уваги. Показово, що в розрахунковому аналізі з роботи [9] розглянуто методичний підхід до реалізації теплогідравлічного розрахунку перспективного російського реактора ВВЕР-НКП. При цьому застосований у [9] підхід має очевидні принципові недоліки: а) розглядається виключно «нормальна» тепловіддача, що, як відомо [1], реалізується в робочих каналах АкЗ лише за умов формування в них квазістаціонарної турбулентної течії теплоносія; б) можливість виникнення погіршеної тепловіддачі відповідно до теплогідравлічних умов, що аналізуються в роботах [3–8], загалом не розглядається; в) доказову базу отриманих результатів (тобто теплофізичне обґрунтування результатів розрахунку теплообміну та гідродинаміки в АкЗ ЯР з НКП) авторами не наведено. Таким чином, розглянуті в роботі [9] умови «нормальної» тепловіддачі становлять лише один, причому найбільш сприятливий для забезпечення ефективного охолодження поверхні ТВЕЛ, випадок можливого розвитку процесу тепловіддачі в області НКП. А втім фізичні макроефекти, що зумовлюють можливість суттєвого погіршення тепловіддачі в АкЗ (тобто режими «погіршеної» тепловіддачі відповідно до загальноприйнятої класифікації [1]), об'єктивно також можуть мати місце. З огляду на цей факт далі доцільно розглянути деякі маловідомі теплофізичні аспекти перебігу ТПП у навіолокритичній області вже на молекулярному мікрорівні.

Теплофізика псевдокипіння та інтенсифікація тепловіддачі за надкритичного тиску

Відповідно до даних роботи [5] в умовах термодинамічної рівноваги за надкритичного тиску фазових перетворень «рідина — пара» немає. Очевидно, що в цих умовах при заданих рівнях тиску та температури дві фази співіснувати не можуть і питання про поверхневий натяг не має сенсу. За відсутності термодинамічної рівноваги в умовах надкритичного тиску в разі інтенсивного теплообміну в заданому просторовому об'ємі одночасно може перебувати і рідина, і газова фаза. Показовою з цього боку є тепловіддача до турбулентного потоку теплоносія в циліндричному каналі за високих значень густини теплового потоку, коли ядро рідини знаходиться при відносно низькій температурі, набагато нижчій, ніж температура псевдофазових перетворень $T_{\text{макс}}$, і, таким чином, має властивості холодної рідини. У цих умовах у пристінковому шарі знаходиться «гарячий» газ за температури, що перевищує $T_{\text{макс}}$.

З огляду на такий вихідний стан поверхні тепловіддачі в умовах НКП важливим є розгляд динаміки зміни сил поверхневого натягу, що діють на межі між «рідкими» і «газоподібними» об'ємами теплоносія за надкритичного тиску. Як відомо [10], поверхневий натяг виникає завдяки тому, що на поверхні розділу фаз з боку рідини молекули відповідної речовини притягуються одна до одної сильніше, ніж з боку газу чи пари. Це зумовлено тим, що об'ємна густина рідини набагато більша від густини легкої фази. Завдяки цьому ефекту виникають сили, що прагнуть асоціювати молекули речовини в об'ємі з більшою густиною й мінімізувати тим самим поверхню розділу фаз. При цьому межею між фазами є перехідний шар, в якому всі властивості монотонно змінюються від рідини до легкої фази. Показово, що товщина перехідного шару ніяких обмежень на величину поверхневого натягу не накладає. Поверхневий натяг, за Ван-дер-Ваальсом, визначається як інтеграл, узятий за зазначеним перехідним шаром. У цих умовах поверхневий натяг існує не тільки між рідиною та її легкою фазою, але також і між окремими рідинами, що не змішуються. За високих тисків такі ефекти мають місце також і між газами. Зважаючи на цей зв'язок між тяжінням молекул та об'ємною щільністю, Ван-дер-Ваальсом було з'ясовано залежність поверхневого натягу від різниці щільності рідини та її легкої фази. Ця різниця звичайно описується формулою

$$\sigma = k (\rho_p - \rho_r)^4,$$

де ρ_p , ρ_r — значення густини рідини та легкої фази; k — коефіцієнт пропорційності.

Таким чином, з фізичної точки зору можна стверджувати, що поверхневий натяг виникає і в однофазній речовині, тобто в рідині або газі, якщо в її об'ємі зміни температурних градієнтів є такими великими, що можуть спричинити значні зміни густини. При цьому також треба враховувати, що за надкритичних тисків в області псевдокритичних перетворень густина речовини суттєво залежить від температури. Цей ефект створює передумови, за яких у невеликому об'ємі рідини (наприклад, під час тепловіддачі у вузьких каналах) контактують окремі об'єми теплоносія із суттєво різною густиною, причому на їхніх межах виникає відповідний поверхневий натяг.

Таку фізичну модель з роботи [5] підтверджують наведені далі відомі експериментальні дані, що характеризують особливості теплообміну в умовах НКП. Необхідно підкреслити, що за останні п'ять десятиліть було опубліковано певну кількість результатів фотореєстрації процесу тепловіддачі до рідини за надкритичних тисків. На цих фотографіях чітко видно існування деяких міжфазових об'ємів, подібних до пароутворень. Ці фазові об'єми у спеціалістів [11–14] отримали назву «псевдопарові утворення». Так, на рис. 1 наведено одну з фотографій псевдокипіння, що ілюструє процес тепловіддачі до діоксиду вуглецю за його надкритичного тиску з роботи [11]. Показово, що наявність подібних фазових об'ємів наочно підтверджує факт існування в рідині поверхневого натягу в умовах НКП. З огляду на цей неспростований факт, що наочно підтверджує існування процесу псевдокипіння (так його було вперше названо в роботі [11]), теплоносієм треба розглядати як подібну до двофазної систему, яка існує в надкритичній області. Підтвердженням такої своєрідної двофазності може бути фізична подібність характеристик процесу та структури основних режимів тепловіддачі до рідини в умовах кипіння з недогрівом за докритичних значень тиску та теплової динаміки процесу тепловіддачі в умовах надкритичних його значень за наявності псевдокипіння.

Як відомо [10, 12], кипіння з недогрівом у докритичній області виникає тоді, коли температура стінки поверхні тепловіддачі $T_{ст}$ стає вищою, ніж температура насичення $T_{н}$, а температура рідини T_p є нижчою за величину $T_{н}$. У цих умовах парові об'єми, що утворюються в перегрітому щодо $T_{н}$ пристінковому шарі рідини, потрапляють у холодне ядро потоку, де



Рис. 1. Дані фотореєстрації процесу псевдокипіння за тепловіддачі до діоксиду вуглецю від горизонтальної поверхні (стрижень діаметром 0,025 мм) у замкненому об'ємі в умовах надкритичного тиску $P/P_{кр} = 1,21$ з роботи [11]

деградують і конденсуються. Характерним є те, що процес пароутворення призводить до значної інтенсифікації тепловіддачі, а також до зростання гідравлічного опору парогенеруючого каналу. Крім того, має місце зниження швидкості звуку в теплоносії і (за певних умов) виникнення термоакустичних автоколивань (ТАК) тиску, як це обґрунтовано в роботі [12]. Наведений вище перелік низки характерних макрофізичних ознак початку генерації парової фази при поверхневому кипінні теплоносія в умовах його примусової циркуляції має бути доповнений також наступною макрокінетичною умовою процесу активації потенційних центрів пароутворення. Як відомо [10], ці центри є джерелами парової фази на поверхні тепловіддачі й активуються в разі зростання її теплового навантаження. Треба зазначити також, що область локалізації цих джерел є випадковою структурою мікрозаглиблень на поверхні тепловіддачі, яка утворює діючий статистичний ансамбль дискретних центрів пароутворення. При цьому необхідним для активації кожного з таких центрів пароутворення є виконання в ньому певного комплексу мікрокінетичних термодинамічних та фізико-хімічних умов.

На відміну від поверхневої та статистично усталеної топології діючого ансамблю центрів пароутворення в режимі пухиркового кипіння область локалізації джерел псевдокипіння в умовах НКП має об'ємну топологію і не є статистичною 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 [13], псевдопарові утворення виникають не у сталих мікрозаглибленнях поверхні тепловіддачі,

як це відбувається при кипінні рідини, а генеруються рухомими осердями турбулентних вихорів у пристінковому шарі надкритичного теплоносія. Маємо 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_{max} (тобто температуру максимуму теплоємності потоку теплоносія), а T_p є набагато нижчою за T_{max} . Іншими словами, коли в пристінковому шарі теплоносія знаходиться «гарячий» газ, а в ядрі потоку присутня «холодна» рідина. Аналізуючи розглянуті фізичні умови виникнення процесів генерації парової фази та псевдокипіння, можна з упевненістю стверджувати: існує достатньо глибока фізична аналогія між надкритичною термодинамічною системою в області НКП та процесом недогрітого кипіння в області докритичних параметрів.

Під час пошуку подальших аналогій між процесами генерації парової фази та псевдокипінням вищезазначений порівняльний аналіз треба доповнити розглядом процесів виникнення верхніх фізичних меж розвитку цих штатних режимів тепловіддачі, кожен з яких може розвинути у відповідний аварійний режим. При цьому з огляду на подібні температурні прояви цих режимів треба звернути увагу на таке. Експериментально підтверджений рядом робіт [13–15 та ін.], включаючи дані швидкісної кінозйомки процесу тепловіддачі до турбулентного потоку надкритичного н-гептану в циліндричних каналах [14], факт існування режиму псевдопливкового кипіння води та деяких інших теплоносіїв в області навколокритичних параметрів дав змогу фізично обґрунтувати можливість трансформації режиму псевдопузиркового кипіння в його псевдопливковий різновид. Зважаючи на визначальні результати зазначених експериментальних робіт, видається правомірною гіпотеза процесу виникнення режиму «погіршеної» тепловіддачі в умовах НКП. Її суть 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 [10].

З огляду на розглянуту фізичну аналогію та відповідно до модельних уявлень з роботи [14] в умовах НКП у разі збільшення теплового потоку і відповідного підвищення T_{ct} турбулентні вихори набувають дедалі чіткіших обрисів і їхня форма наближається до сферичної. При $T_{ct} > T_{max} > T_p$ вся поверхня тепловіддачі вкривається псевдопаровими утвореннями розміром

0,10–0,01 мм, що рухаються разом з потоком рідини. Унаслідок виникнення псевдопарових утворень мають місце такі фізичні явища. По-перше, турбулентні вихори, відриваючись із пристінкового шару, який має властивості «гарячого» газу ($T_{ct} = 800 \dots 900$ 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 щільності), набувають форми сфери або наближаються до неї. Таким чином, 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, при дотику турбулентних вихорів з холодного ядра потоку до гарячої стінки псевдорідинні об'єми розширюються і стають подібними до парових асоціацій. Накопичення їх у пристінковому шарі у разі збільшення теплового навантаження поверхні тепловіддачі призводить до виникнення псевдопарових утворень, що є подібним до умов виникнення кризи тепловіддачі за докритичних параметрів, яка супроводжується різким зростанням температури поверхні тепловіддачі.

Як відомо [10], в умовах кипіння з недогрівом різниця температур $T_{ct} - T_p$ 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 за різниці $T_{ct} - T_p$ близько сотень градусів. З огляду на це треба звернути також увагу на наступний фізичний аспект процесу генерації пари в умовах докритичних термодинамічних параметрів. Так, насамперед, добре відомо [10], що визначальні характеристики кипіння, зокрема з недогрівом, залежать від тиску: чим вище тиск, тим прояви кипіння з недогрівом слабші. Зважаючи на це, можна стверджувати, що аналогія кипіння з недогрівом у порівнянні з псевдокипінням тим глибша, чим менша різниця тисків, за яких порівнюються ці процеси.

Специфічні гідродинамічні ефекти процесу тепловіддачі в області НКП

На основі розглянутих вище особливостей генерації легкої фази в областях до- та надкритичних параметрів доцільним є також порівняння основних характеристик теплообміну, гідравлічного опору, параметрів ТАК та швидкості звуку під час кипіння з недогрівом в умовах $p < p_{кр}$ та під час псевдокипіння в умовах $p > p_{кр}$.

Так, стосовно фізики процесу кипіння відомо [10], що на початку генерації парової фази в умовах недогріву відбувається значна інтенсифікація процесу теплообміну, яка зумовлена додатковою турбулізацією пристінкового шару потоку рідини внаслідок вибухоподібного зростання парових утворень та їхньої подальшої конденсації в холодному ядрі потоку. У цих умовах функціональна залежність температури стінки від теплового потоку $T_{ст} = \varphi(q)$ зазнає характерної зміни, що якісно проявляється завдяки виникненню перегину температурної залежності, який свідчить про початок процесу кипіння. Утім дослідженнями [8, 13–17], розпочатими ще кілька десятиліть тому, було доведено, що вищезазначений температурний перегин графіка залежності $T_{ст} = \varphi(q)$ відбувається і в разі тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ в умовах надкритичних тисків, коли виникає псевдокипіння. На рис. 2 за даними роботи [14] наведено такі експериментальні дані, які ілюструють характер процесу тепловіддачі до ракетного палива дізопропілциклогексан (ДЦГ) в умовах НКП. Аналіз структури цих експериментальних залежностей, що відповідають областям до- та надкритичних термодинамічних параметрів, дає змогу стверджувати, що очевидною є подібність порівнюваних процесів. У цьому зв'язку в роботі [15] виконано аналіз експериментальних даних щодо тепловіддачі із псевдокипінням і наочно доведено, що ці дані принципово можуть бути описані емпіричними залежностями, отриманими під час дослідження теплообміну в потоці однофазної рідини за НКП. Іншими словами, наявність псевдокипіння за НКП робить неадекватним розгляд надкритичного теплоносія як однофазної системи. Останнє унеможливорює застосування під час теплогідрравлічного розрахунку ЯР з НКП емпіричних залежностей для «гарячого» газу для всієї області експлуатаційних параметрів цих перспективних РУ.

Як відомо [10], теплообмін під час кипіння з недогрівом у турбулентному потоці рідини супроводжується збільшенням гідравлічного опору. Схожа динаміка гідравлічного опору спостерігається також і під час тепловіддачі в умовах НКП за наявності псевдокипіння. Наочно підтверджують цю аналогію дані, наведені на рис. 3 і 4 відповідно до результатів роботи [16] для кипіння з недогрівом води і дані [14] для псевдокипіння ДЦГ.

Про фізику виникнення ТАК у каналах теплообмінних пристроїв в умовах НКП необхідно зазначити таке. Як відомо [17], процес зростання та деградації парових асоціацій при кипінні з недогрівом супроводжується генерацією імпульсів тиску, що поширю-

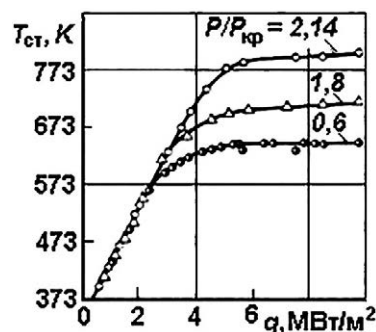


Рис. 2. Характер залежності температури стінки від теплового потоку при тепловіддачі до ДЦГ при до- та надкритичних тисках. Параметри теплоносія: швидкість $W = 12,5$ м/с; $T_p = 300 \dots 320$ К. Геометрія циліндричного каналу: $d = 1,6$ мм; довжина обігріву $l = 30$ мм за даними роботи [14]

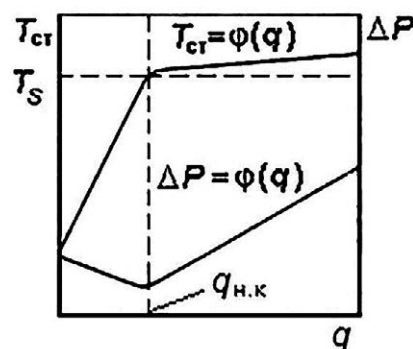


Рис. 3. Типовий характер залежності температури поверхні тепловіддачі і перепаду тиску на парогенеруючому каналі під час тепловіддачі до води в умовах кипіння з недогрівом; $q_{н.к}$ — тепловий потік початку поверхневого кипіння відповідно до даних [16]

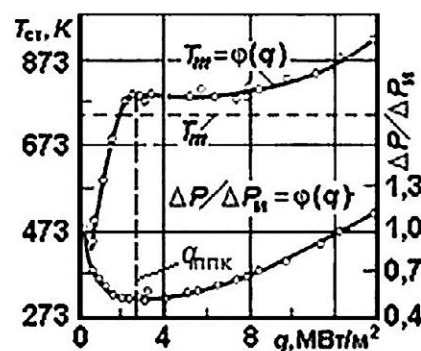


Рис. 4. Типова залежність температури стінки і перепаду тиску в циліндричному каналі під час тепловіддачі до ракетного палива ДЦГ в умовах НКП за псевдокипіння. Параметри експерименту: $p/p_{кр} = 1,6$; $W = 6$ м/с; $T_p = 300 \dots 380$ К; $d = 3$ мм; $l = 60$ мм. $q_{ннк}$ — початок псевдокипіння, $\Delta P/\Delta P_{кр}$, $\Delta P_{кр}$ — перепад тиску при ізотермічній течії за даними [14]

ються вздовж потоку рідини зі швидкістю звуку і за певних акустичних умов можуть спричиняти виникнення акустичних резонансів, тобто стоячих хвиль тиску зі значною амплітудою. За інших рівних умов амплітуда ТАК збільшується зі зростанням тиску і теплового потоку згідно з даними роботи [18]. На рис. 5 відповідно до результатів досліджень [18] показано залежність максимальної амплітуди ТАК, отриманої в досліді із ДЦГ. З цих даних випливає, що характер наведеної залежності не змінюється з переходом від докритичних значень тиску до надкритичних параметрів. Зважаючи на це, можна зробити такий висновок: механізми виникнення ТАК у докритичній області та за надкритичних термодинамічних параметрів є подібними.

Проте з огляду на подані вище аналітичні дані та результати систематизації сучасного стану досліджень широкого кола взаємопов'язаних макро- та мікрофізичних ефектів, що супроводжують процеси теплообміну та гідродинаміки в області НКП, необхідно підкреслити:

а) сучасний рівень фізичних знань та модельних уявлень про специфічні особливості перебігу ТПП у надкритичній області на сьогоднішній день недостатній для надійного розрахунку процесів теплообміну та гідродинаміки в каналах теплообмінних пристроїв з НКП;

б) суттєва обмеженість існуючої розрахункової бази щодо теплових та гідродинамічних процесів в області НКП унеможлиблює реалізацію надійного теплогідрравлічного розрахунку АкЗ перспективних ЯР з НКП;

в) нагальні вимоги розробки новітніх ядерних технологій, що передбачають створення пілотних зразків ЯР з НКП, зумовлюють необхідність виконання широкого фронту комплексних теплофізичних досліджень процесів теплообміну та гідродинаміки відповідно до умов реалізації їх не лише в каналах простої геометрії (циліндричні та кільцеві канали), але й під час використання складної форми поверхні тепловіддачі у стрижньових збірках ТВЕЛ;

г) висока складність та 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 надкритичних термодинамічних параметрів доцільно про-

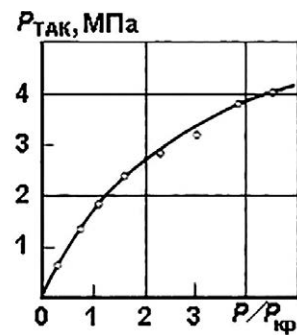


Рис. 5. Експериментальна залежність максимальної амплітуди ТАК від приведенного тиску в умовах тепловіддачі до ДЦГ за даними [18].
Параметри експерименту: $W = 10 \text{ м/с}$; $T_p = 290\text{--}230 \text{ К}$; $d = 1,6 \text{ мм}$; $l = 30 \text{ мм}$. Частота ТАК $f = 6,8 \text{ кГц}$

аналізувати структуру сигналів динамічного тиску в режимі ТАК в умовах НКП за течії легководного теплоносія в циліндричному експериментальному каналі відповідно до даних роботи [17]. У цьому контексті треба також відзначити, що наведені нижче експериментальні результати можуть бути додатковим підтвердженням адекватності фізичної моделі виникнення ТАК, зокрема при НКП, яку свого часу було запропоновано в роботі [18]. Відповідно до цієї моделі наявність парових об'ємів у рідині різко зменшує швидкість звуку. У роботі [19] експериментально досліджено вплив теплообміну в н-гептані під час кипіння його з недогрівом ($p < p_{кр}$), а також в умовах псевдокипіння ($p > p_{кр}$) на швидкість звуку у вузькому циліндричному каналі. На рис. 6 проілюстровано результати цих досліджень, представлені у вигляді залежності швидкості звуку від тиску в момент виникнення ТАК за кипіння в докритичній області з недогрівом, а також за псевдокипіння в умовах НКП. Відсутність помітної зміни цієї залежності під час переходу тиску в надкритичну область додатково

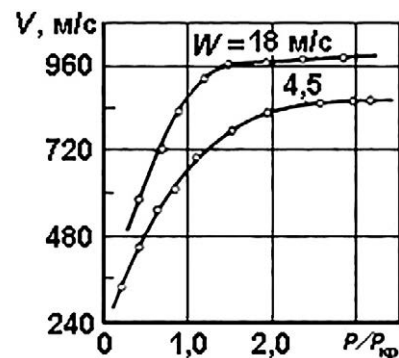


Рис. 6. Залежність швидкості звуку в н-гептані від приведенного тиску в момент виникнення ТАК за даними [19]

свідчить про наявність реальної фізичної аналогії між процесами генерації парової фази в докритичній області та псевдокипінням в умовах НКП.

Таким чином, 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 різних фаз, тобто між процесом кипіння та псевдокипінням в умовах НКП. Ілюстрацією цього твердження може бути динаміка спектральної структури ТАК в умовах НКП за течії легководного теплоносія в циліндричному каналі діаметром 6,3 мм з роботи [17]. Наведена на рис. 7 спектрограма відповідає таким умовам експерименту: масова швидкість $\rho w = 500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, густина теплового потоку $q = 1,47 \text{ МВт}/\text{м}^2$, вхідна температура $T_{\text{вх}} = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, довжина обігріву $l = 0,6 \text{ м}$, величина тиску теплоносія $p = 23,5 \text{ МПа}$. У ході аналізу цієї спектральної структури звертає на себе увагу факт виникнення в експериментальному каналі потужного полігармонічного коливання з домінантними частотами $f_1 = 0,5 \text{ кГц}$ та

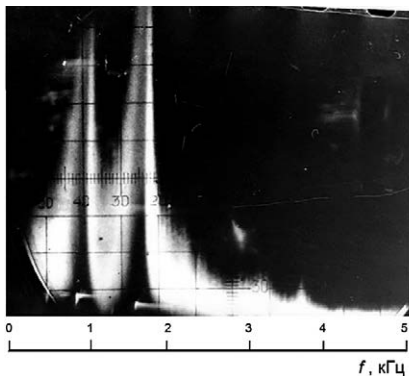


Рис. 7. Спектральна структура ТАК в області НКП за даними роботи [17]

$$P = 0,392 \text{ МПа}; \rho w = 1000 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}); \Delta T_{\text{нед}}^{\text{вх}} = 97^\circ\text{C}$$

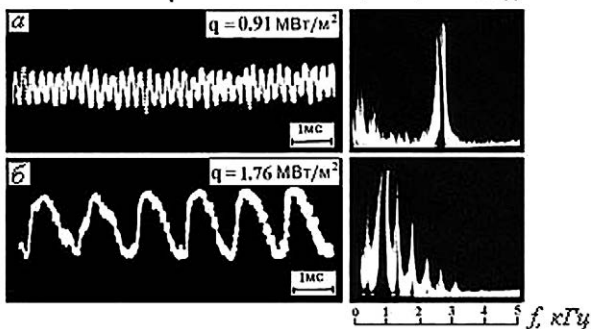


Рис. 8. Осцилограми та спектральні щільності акустичного шуму у двох головних фазах розвитку ТАК: а) прямого збудження; б) резонансного підсилення в докритичній області за даними [17]

$f_2 = 1,5 \text{ кГц}$. Показово, що в кожному з них амплітуда відповідної моди знаходилася на достатньо високому рівні й становила близько 2,0 МПа. Результати подібних досліджень також з роботи [17], але виконаних уже за докритичних тисків, представлено на рис. 8.

Відповідно до результатів циклу досліджень, виконаних у роботі [17], можна, зокрема, стверджувати, що особливості руйнації парогенеруючого каналу в умовах виникнення ТАК за докритичних тисків зумовлюються характером спектральної структури цих резонансних коливань теплоносія, виникнення яких ініціює такі фізичні процеси. По-перше, відбувається термічне циклування поверхні генерації парової фази в пучностях ТАК. По-друге, існує періодичне локальне зменшення в пучностях ТАК рівня критичного теплового потоку за докритичних параметрів на поверхні кипіння в результаті циклічного відхилення рівня тиску між вузлами цієї стоячої хвилі з частотою домінуючої спектральної моди акустичного резонансного коливання. На рис. 8 відповідно до даних роботи [17] наведено типові осцилограми коливань тиску в докритичній області в умовах ТАК, а також відповідні спектрограми цих коливальних процесів. Детальний опис цих експериментів та їхні режимні параметри наведено в монографії [12]. З позицій аналізу даних, наведених на рис. 8, треба зазначити, що кожна з домінантних мод коливань, представлених на рис. 8, є загалом подібною до представленої на рис. 7 структури ТАК в умовах НКП. Це порівняння додатково підтверджує факт існування єдиного фізичного механізму збудження ТАК як в умовах докритичних, так і надкритичних параметрів теплоносія. Очевидно, що останнє можливе лише за наявності процесу псевдокипіння при НКП. Показово, що розглянутий у роботі [12] характер руйнування поверхні тепловіддачі в умовах до- та надкритичних параметрів теплоносія є також об'єктивним підтвердженням не тільки резонансної моделі [18] впливу ТАК на процес теплообміну, але й самого факту існування псевдокипіння за НКП.

Загалом наведені вище експериментальні дані про спектральну структуру ТАК в умовах докритичних параметрів теплообміну та в зоні НКП треба розглядати як ще одне свідчення реальності фізичної аналогії між процесами кипіння та псевдокипіння.

Висновки

1. Розробка фізично обґрунтованої методології теплогідрравлічного розрахунку АкЗ перспективних

ЯР з НКП є фундаментальною основою наукового забезпечення експлуатаційної надійності майбутніх РУ цього типу.

2. Суттєвий дефіцит достовірної наукової інформації про визначальні фізичні особливості перебігу ТГП в нерегламентних режимах тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ в умовах НКП не дає змоги перейти до розробки ефективної розрахункової методики надійного прогнозування аварійних режимів експлуатації ЯР з НКП.

3. Переважна більшість теоретичних та експериментальних досліджень ТГП в каналах найпростішої геометрії (циліндричні та кільцеві канали) стосується лише «нормального» режиму тепловіддачі, що відповідає умовам змішаної турбулентної конвекції перегрітого до «газового» стану легководного теплоносія в режимі його інерційно-в'язкісної течії.

4. Наявні результати комп'ютерного моделювання перебігу ТГП в характерних частинах ТВЗ із використанням суттєво спрощеного стільникового підходу та за відсутності реальних експериментальних даних з динаміки поперекового тепломасообміну між окремими теплогідрравлічними стільниками ТВЗ у небагатьох відомих дослідженнях відповідають лише режиму «нормальної» (тобто «газової») тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, яка без необхідного теплофізичного обґрунтування безальтернативно приймається авторами переважної більшості всіх виконаних розрахункових досліджень.

5. Існуюча фізична невизначеність щодо причин виникнення погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в умовах НКП накладає суттєві обмеження на розробку ефективних методик надійного розрахунку верхньої межі безпечного форсування процесу тепловіддачі в АкЗ ЯР з НКП.

6. Експериментально доведений факт існування псевдопарових утворень в області НКП, що генеруються рухомими осередками турбулентних вихорів у пристінковому шарі надкритичного теплоносія, треба розглядати як фізичну передумову для наступної трансформації псевдопузиркового режиму в його псевдоплівковий різновид, що безпосередньо зумовлює процес виникнення аварійного режиму погіршеної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ.

7. Факт існування процесу псевдокипіння в умовах надкритичних термодинамічних параметрів унеможливорює застосування під час теплогідрравлічного розрахунку АкЗ ЯР з НКП емпіричних залежностей для «гарячого» газу для всієї області експлуатаційних параметрів цих РУ.

8. Сучасна розрахункова база, яка використовується під час реалізації теплогідрравлічного розрахунку АкЗ ЯР з НКП, потребує суттєвого перегляду та доповнення, що вимагає реалізації комплексних теплофізичних досліджень і є можливим лише за умови широкого міжнародного співробітництва.

Список використаної літератури

1. Теплообмен в ядерных энергетических установках: учеб. пособие для ВУЗов / Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалев; под ред. Б. С. Петухова. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва: Энергоатомиздат, 1986. — 472 с.
2. Piore I. L. Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications / I. L. Piore, R. B. Duffey. — New York: ASME Press, 2007. — 334 p.
3. Петухов Б. С. Теплообмен при смешанной турбулентной конвекции / Б. С. Петухов, А. Ф. Поляков. — Москва: Наука, 1986. — 192 с.
4. Ветров В. И. Термодинамическая неустойчивость в каналах судовых энергетических установок при сверхкритических давлениях теплоносителя: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В. И. Ветров — Севастополь, 1983. — 25 с.
5. Кафенгауз Н. Л. О некоторых особенностях поведения жидкости при сверхкритическом давлении в условиях интенсивного теплообмена / Н. Л. Кафенгауз // Промышленная теплотехника. — 1986. — Т. 8, № 5. — С. 8–10.
6. Экспериментальное исследование полей скорости и температуры при нагревании турбулентного потока двуокиси углерода сверхкритического давления / Б. С. Петухов и др. — Ч. 1 (Отчет ИВТ АН СССР). — Москва, 1983. — Инв. № 0–284–004–46–03. — 181 с.
7. Попов В. Н. Разработка метода расчета теплообмена и сопротивления при турбулентном течении жидкости с переменными свойствами: автореф. дис. ... докт. техн. наук / В. Н. Попов — Москва, 1986. — 40 с.
8. Разумовский В. Г. Теплоотдача и локальные геометрические характеристики гладких каналов при турбулентном течении воды сверхкритического давления / В. Г. Разумовский, А. П. Орнатский, Е. М. Маевский // Двухфазные потоки. Теплообмен и гидродинамика. — Ленинград: Наука, 1987. — С. 117–128.
9. Карташов К. В. Проведение теплогидравлических расчетов активной зоны реактора ВВЭР-СКД для разных схем течения теплоносителя при проектных режимах работы / К. В. Карташов, Г. П. Богословская // Вопросы атомной науки и техники. — Сер. Обеспечение безопасности АЭС. — 2012. — № 31. — С. 71–78.
10. Толубинский В. И. Теплообмен при кипении / В. И. Толубинский. — Киев: Наук. думка, 1980. — 316 с.

11. Knapp K. Free convection heat transfer to carbone dioxide near critical Point / K. Knapp, R. Sabersky // *Int. Heat and Mass Transfer*. — 1965. — Vol. 9, No. 1. — P. 41–51.
12. Теплофизика поврежденных реакторных установок: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Н. И. Шараевская. — Черновобиль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2013. — 528 с.
13. Экспериментальное исследование механизма псевдокипения в н-гептане / И. Т. Аладьев, В. Д. Васьянов, Н. Л. Кафенгауз и др. // *Инж.-физ. журн.* — 1976. — Т. 31, № 3. — С. 389–395.
14. Кафенгауз Н. Л. О механизме псевдокипения / Н. Л. Кафенгауз // *Исследования по механике и теплообмену двухфазных сред*. — Москва : Изд. ЭНИН, 1974. — С. 229–235.
15. 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.
16. Орнатский А. П. Исследование закономерностей кризиса теплообмена и гидравлического сопротивления при поверхностном кипении воды в условиях вынужденного движения: автореф. дис. ... докт. техн. наук / Орнатский А. П. — Киев, 1968. — 50 с.
17. Шараевський І. Г. Розпізнавання передаварійних теплогідравлічних процесів у водоохолоджуваних ядерних енергетичних реакторах: автореф. дис. ... докт. техн. наук. — Київ : ИПБ АЕС НАН України, 2010. — 48 с.
18. Кафенгауз Н. Л. Обзор экспериментальных данных по исследованию термоакустических колебаний при теплоотдаче к турбулентному потоку жидкости в трубах / Н. Л. Кафенгауз // *Вопросы теплопереноса в энергетических установках*. — Москва : Изд. ЭНИН, 1974. — С. 106–130.
19. Аладьев И. Т. Влияние теплообмена на скорость звука в турбулентном потоке жидкости / И. Т. Аладьев, И. Н. Дышель, Н. Л. Кафенгауз // *Теплофизика высоких температур*. — 1981. — Т. 19, № 5. — С. 1108–1111.

There is a significant lack of reliable information on the physical characteristics of thermohydraulic processes in emergency heat transfer modes when cooling the surface of fuel rods with light water coolant with supercritical thermodynamic parameters, in particular, on the physics of heat transfer processes and hydromechanics in the critical area. It is shown that in these conditions there is physical uncertainty about the causes of deteriorating heat transfer, which limits the possibility of creating effective calculation techniques for reliable determination of the upper limit of safe forcing of the heat transfer process in the core. At present, the vast majority of theoretical and experimental studies of thermohydraulic processes in the near-critical area have been performed only for the so-called “normal” heat transfer, which corresponds to the heat removal conditions with mixed turbulent convection of superheated to “gas” state of light water coolant in its inertial mode. Attention is paid to the possible appearance of macromolecular ensembles on this surface in the form of pseudo-vapor formations, which are capable of causing an emergency mode of pseudo-film boiling. On the basis of the given experimental data of various authors existence of rather deep physical analogy between processes of heat exchange in supercritical thermodynamic system and unheated boiling at subcritical parameters of the heat carrier is proved. Existence of the pseudo-boiling process in the conditions of supercritical thermodynamic parameters makes it impossible to use in the thermohydraulic calculation the empirical dependences for “hot” gas for the range of active zones operational parameters.

Keywords: nuclear reactor with light water coolant, supercritical parameters, impaired heat transfer, pseudo-boiling of coolant, turbulent vortices, thermoacoustic oscillations, pseudo-film boiling.

Referenses

1. Petukhov B. S., Genin L. G., Kovaliov S. A.; Petukhov B. S. (ed.) (1986). *Teploobmen v yadernykh energeticheskikh ustanovkakh* [Heat transfer in nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 472 p. (in Russ.)
2. Pioro I. L., Duffey R. B. (2007). *Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications*. New York: ASME Press, 334 p.
3. Petukhov B. S., Polyakov A. F. (1986). *Teploobmen pri smeshanoj turbulentnoj konvekcii* [Mixed turbulent convection heat transfer]. Moscow: Nauka, 192 p. (in Russ.)
4. Vetrov V. I. (1983). *Termodinamicheskaya neustoiichivost' v kanalakh sudovykh energeticheskikh ustanovok pri sverkh-*

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

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

**Actual Problems of the Thermal Hydraulic Reliability
Ensuring of Prospective Nuclear Reactors with
Supercritical Parameters**

- kriticheskikh davleniyakh teplonositelya* [Thermodynamic instability in the channels of ship power plants at supercritical coolant pressures]. (PhD Thesis). Sevastopol, 25 p. (in Russ.)
5. Kafengauz N. L. (1986). [On some features of the behavior of a liquid at supercritical pressure under conditions of intense heat transfer]. *Promyshlennaya Teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], vol. 8, no. 5, pp. 8–10. (in Russ.)
 6. Petukhov B. S., Kurganov V. A., et al. (1983). *An experimental study of the velocity and temperature fields during heating of a turbulent flow of carbon dioxide of supercritical pressure*. Part 1. Report of the IWT of the USSR Academy of Sciences. Moscow, 181 p. (in Russ.)
 7. Popov V. N. (1986). *Razrabotka metoda rascheta teploobmena i soprotivleniya pri turbulentnom techenii zhidkosti* [Development of a method for calculating heat transfer and resistance in a turbulent fluid flow]. (PhD Thesis). Moscow, 40 p. (in Russ.)
 8. Razumovsky V. G., Ornatsky A. P., Maevsky E. M. (1987). *Teplootdacha i lokal'nye geometricheskie kharakteristiki gladkikh kanalov pri tubulentnom techenii vody sverkhkriticheskogo davleniya* [Heat transfer and local geometric characteristics of smooth channels in a turbulent flow of supercritical water]. In: [Two phase flows. Heat transfer and hydrodynamics]. Leningrad: Nauka, pp. 117–128. (in Russ.)
 9. Kartashov K. V., Bogoslovskaya G. P. (2012). [Conducting thermohydraulic calculations of the VVER-SKD reactor core for different coolant flow patterns under design operating conditions]. *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki* [Atomic Science and Technology Issues], vol. 31, pp. 71–78. (in Russ.)
 10. Tolubinsky V. I. (1980). *Teploobmen pri kipenii* [Boiling heat transfer]. Kyiv: Naukova dumka, 316 p. (in Russ.)
 11. Knapp K., Sabersky R. (1965). Free convection heat transfer to carbone dioxide near critical point. *Int. Heat and Mass Transfer*, vol. 9, no. 1, pp. 41–51.
 12. Kliuchnykov A. A., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevskaya N. I. (2013). *Teplofizika povrezhdenij reaktornykh ustanovok* [Thermophysics of nuclear reactor damages]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 528 p. (in Russ.)
 13. Alad'ev 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.)
 14. Kafengauz N. L. (1974). *O mekhanizme psevdokipeniya* [About the pseudo-boiling mechanism]. In: *Issledovaniya po mekhanike i teploobmenu dvukhfaznykh sred* [Studies on the mechanics and heat transfer of two-phase media]. Moscow: ENIN, pp. 229–235. (in Russ.)
 15. 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.)
 16. Ornatsky A. P. (1968). *Issledovaniye zakonmernostey krizisa teploobmena i gidravlicheskogo soprotivleniya pri poverkhnostnom kipenii vody v usloviyakh vynuzhdenного dvizheniya* [Study of the laws of heat transfer crisis and hydraulic resistance during surface boiling of water in conditions of forced movement]. (PhD Thesis). Kyiv, 50 p. (in Russ.)
 17. Sharaevsky I. G. (2010). *Rozpiznavannya peredavariynykh teplohidravlitchnykh protsesiv u vodoohlodzhuvanykh 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.)
 18. Kafengauz N. L. (1974). *Obzor eksperimental'nykh daniykh po issledovaniyu termoakusticheskikh kolebanii pri teplootdache k turbulentnomu potoku zhidkosti v trubakh* [Review of experimental data on the study of thermoacoustic oscillations during heat transfer to a turbulent fluid flow in pipes]. In: *Voprosy teplomas-soperenosa v energeticheskikh ustanovkakh* [Heat and mass transfer issues in power plants]. Moscow: ENIN, pp. 106–130. (in Russ.)
 19. Alad'ev I. T., Dyshel' I. N., Kafengauz N. L. (1981). [The effect of heat transfer on the speed of sound in a turbulent fluid flow]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [Thermal physics of high temperatures], vol. 19, no. 5, pp. 1108–1111. (in Russ.)

Надійшла 06.07.2020

Received 06.07.2020