

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

Проблемні питання теплогідрравлічного розрахунку активних зон перспективних водоохолоджуваних реакторів з надкритичними параметрами

Ключові слова:

легководний ядерний реактор, надкритичні параметри, тепловидільна збірка, погіршений теплообмін, температура стінки каналу, теплове навантаження.

Розглянуто фундаментальні теплофізичні особливості процесу теплообміну між нагрітою стінкою вертикального каналу та легководним теплоносієм надкритичних параметрів стосовно умов тепловіддачі у стрижньових збірках тепловидільних елементів (ТВЕЛ) в активних зонах перспективних енергетичних ядерних реакторів. Проаналізовано наявні методи та рекомендації з теплогідрравлічного розрахунку ядерних реакторів цього типу. Обґрунтовано можливості виникнення в зазначених умовах потенційно небезпечного режиму погіршеного теплообміну, що призводить до різкого зростання температури оболонки ТВЕЛ та загрожує руйнацією поверхні тепловіддачі. Виявлено недостатність наявних даних для створення надійних розрахункових методів забезпечення надійної експлуатації цих перспективних реакторів та визначено основний напрям необхідних подальших досліджень.

Вступ

Розглянуті в наших попередніх публікаціях [1, 2] результати інженерного опрацювання концептуальних проектів дослідно-промислових зразків ядерних реакторів (ЯР) із надкритичними параметрами (НКП) легководного теплоносія, яке було виконано за останні роки в Росії та в деяких інших країнах світу, свідчать про нагальну потребу в реалізації системного аналізу особливостей фізичного впливу нелінійної динаміки зміни теплофізичних властивостей води відповідно до рівня досягнутої температури, що має місце в навіолокритичній області, на процес формування специфічних профілів розподілу визначальних теплофізичних параметрів та динаміки теплогідрравлічних процесів (ТГП) теплоносія в робочих каналах активної зони (АкЗ). У контексті цього актуального

завдання, що зумовлено пріоритетом ефективного вирішення комплексу проблемних питань зі створення ЯР з НКП теплоносія, систематизації та аналізу на етапі розробки методології теплогідрравлічного розрахунку таких реакторних установок (РУ) підлягають результати досліджень характерних фізичних ефектів, що супроводжують динаміку трансформації просторової структури розподілу параметрів ТГП у робочих каналах АкЗ цих реакторів. Зважаючи на специфіку перебігу ТГП у навіолокритичній області в майбутніх прототипах ЯР з НКП, має бути забезпечена ефективна та безпечна тепловіддача з поверхні тепловидільних елементів (ТВЕЛ) у штатних режимах експлуатації РУ, що мають бути фізично обґрунтовані. Крім того, мають бути проаналізовані та визначені умови виникнення аномальних та аварійних режимів експлуатації АкЗ ЯР з НКП та розро-

© І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський,
Л. Б. Зімін, Т. С. Власенко, Г. І. Шараєвський, 2020

блені ефективні методики визначення та розрахунку цих режимів. З урахуванням вищезазначеної проблематики об'єктами системного розгляду в цій роботі є такі фізичні аспекти:

1) вплив нелінійної температурної залежності теплофізичних властивостей легководного теплоносія на динаміку зміни інтенсивності тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, а також на трансформацію гідродинамічних характеристик реакторних каналів в області НКП;

2) процес розвитку сил термогравітації та термічного прискорення в робочих каналах АкЗ з НКП уздовж аксіальної та радіальної координат;

3) характер динаміки ТГП у штатних, аномальних та аварійних режимах експлуатації ЯР з НКП;

4) особливості сучасних підходів до теплогідрравлічного розрахунку ЯР з НКП та обмеження наявних методик.

Особливості теплообміну та гідродинаміки в області навколокритичних параметрів

Як відомо [3], головна особливість однофазних теплоносіїв з теплогідрравлічними параметрами, близькими до критичних, полягає в тому, що їхні теплофізичні властивості різко та немонотонно змінюються залежно від досягнутого рівня температури та, крім того, суттєво залежать від величини тиску в теплообмінному пристрої. Особливо зміна цих властивостей має місце поблизу зони псевдокритичної температури теплоносія T_p , яка за визначенням відповідає максимуму його теплоємності. Так, зокрема, для води ця зона знаходиться в інтервалі ентальпій, що приблизно охоплює діапазон $\Delta i = i_1 \dots i_2 = 1\,600 \dots 3\,000$ кДж/кг. При цьому на нижній межі цього інтервалу $i_1 < 1\,600$ кДж/кг з фізичної точки зору теплоносій перебуває в стані крапельної рідини, а на його верхній межі $i_2 > 3\,000$ кДж/кг робоче тіло стає газом. З урахуванням цих особливостей зміни теплофізичних властивостей теплоносія в області НКП розрахунок інтенсивності тепловіддачі, який реалізується у вищезазначених зонах нижнього та верхнього інтервалів ентальпії теплоносія з НКП, має виконуватись на основі відомих залежностей, що описують тепловіддачу відповідно для крапельної рідини та газу. Проте в умовах, коли діапазон зміни ТГП теплоносія перебуває поза вищезазначеними інтервалами й охоплює область НКП частково або цілком, застосування вищезазначених емпіричних залежностей, згідно з даними уза-

гальнюючої роботи [3], стає неможливим, оскільки ці підходи перестають враховувати специфічні особливості теплообміну та гідродинаміки в навколокритичній області.

З огляду на вищезазначений нелінійний характер зміни теплофізичних властивостей теплоносія в навколокритичній області, якісний характер перебігу ТГП у радіальному напрямку найпростішого циліндричного каналу зі стінкою, яка обігривається, відповідно до даних [3], виглядає таким чином. В умовах, коли псевдокритична температура теплоносія T_p знаходиться в інтервалі між середньою температурою потоку \bar{T} та температурою стінки $T_{ст}$ цього каналу, тобто $\bar{T} < T_p < T_{ст}$, динаміка зміни ізобарної теплоємності теплоносія c_p має такі характерні особливості. По-перше, у радіальному напрямку від стінки каналу до центру його поперечного перерізу величина c_p швидко зростає, досягає максимуму, після чого проявляє тенденцію до зменшення. У тому ж радіальному напрямку змінюється також і щільність теплоносія ρ , яка досягає максимуму на осі каналу. У результаті подібних змін теплофізичних властивостей теплоносія в радіальному напрямку, а також уздовж геометричної осі каналу має місце суттєвий вплив їхньої динаміки на осереднений та пульсаційний рух теплоносія. По-друге, вищезазначені теплогідрравлічні ефекти безпосередньо впливають на інтенсивність процесу тепловіддачі, оскільки вона визначається рухом теплоносія. По-третє, цей просторовий рух визначальним чином впливає також і на характеристики гідрравлічного опору каналу теплообмінного пристрою, де циркулює теплоносій з НКП. Крім того, слід підкреслити, що суттєва, унаслідок вищезазначених теплогідрравлічних ефектів, неоднорідність розподілу щільності теплоносія призводить до виникнення в подібних складних умовах додаткових термогравітаційних ефектів, що зумовлюють формування імпульсів термічного прискорення. Останні в свою чергу суттєво впливають на рух теплоносія з НКП в каналі теплообмінного пристрою. Таким чином, з огляду на вищенаведений якісний опис перебігу ТГП в найпростішому каналі циліндричної геометрії в умовах НКП, стає очевидним, що всі розглянуті вище фізичні ефекти є взаємопов'язаними. Проте домінантна роль досягнутого в каналі рівня температури є особливою, оскільки цей параметр безпосередньо визначає об'ємну щільність теплоносія, що змінюється визначальним чином також і вздовж аксіальної координати робочого каналу. У результаті взаємного впливу низки фізично

пов'язаних між собою та взаємозалежних ТГП відбуваються характерні зміни в перебігу процесу турбулентного переносу та інтенсивності переносу тепла. З урахуванням вищезазначеного та відповідно до існуючих уявлень [3], якісну фізичну модель перебігу ТГП в циліндричному каналі в області НКП, слід відзначити таке. Насамперед, відповідно до проблематики розробки перспективних ЯР із навіолокритичними параметрами теплоносія, тобто в умовах використання в робочих каналах АкЗ розвиненої форми поверхні тепловіддачі, а саме стрижньових тепловидільних збірок (ТВЗ) ТВЕЛ, складність перебігу вищезазначених ТГП суттєво зростає. Крім того, слід мати на увазі також і той факт, що набутий свого часу в тепловій енергетиці технологічний досвід використання зони НКП водного теплоносія не в повній мірі може бути безпосередньо застосований у розроблюваних перспективних ЯР з НКП. Таке твердження потребує поглибленої аргументації в цій роботі на основі системного теплофізичного аналізу зони НКП відповідно до актуальної проблематики теплогідравлічного розрахунку АкЗ ЯР з НКП. Зважаючи на це, слід відзначити наступне.

Виконаний у наших попередніх роботах [1, 2] аналіз свідчить, що поряд з традиційною для сучасних легководних енергетичних ЯР однозахідною схемою руху теплоносія в АкЗ в розроблюваних на теперішній час концептуальних проектах ЯР з НКП розглядається також двозахідна схема руху теплоносія. З огляду на це, слід відзначити той факт, що процеси теплообміну та гідродинаміки в каналах АкЗ ЯР відповідно до кожної з цих теплогідравлічних схем є суттєво відмінними й мають специфічні особливості. Очевидно, що ігнорування цих особливостей у методиках теплогідравлічних розрахунків АкЗ з НКП може призвести до створення недостатньо надійних та навіть потенційно небезпечних конструкцій. Так, в умовах підйомного руху теплоносія його щільність зменшується знизу догори, причому цей розподіл має стійкий характер. У цих умовах кінетична енергія пульсаційного руху теплоносія витрачається на роботу проти термогравітаційних сил, які при цьому виникають, що призводить до затухання турбулентного переносу. Навпаки, в умовах опускного руху теплоносія в каналі, що обігрівається, його щільність зростає знизу догори, причому має місце нестійкий характер такого розподілу. У цих умовах робота, що виконується термогравітаційними силами, за наявності пульсацій щільності витрачається на збільшення кінетичної енергії пульсаційного руху,

яке призводить до посилення турбулентного переносу. При цьому в результаті термічного прискорення потоку відбувається також ламінаризація плин теплоносія, тобто зменшення турбулентного переносу у пристінковій області.

Особливості фізичного впливу комплексу вищезазначених теплогідравлічних чинників на критичний параметр експлуатаційної безпеки, що визначається інтенсивністю процесу тепловіддачі в АкЗ ЯР з НКП теплоносія, а саме температуру поверхні тепловіддачі вертикального циліндричного каналу, який охолоджується плинном модельного теплоносія (діоксиду вуглецю), можуть бути проілюстровані на рис. 1 з роботи [3]. На рисунку представлено експериментальну залежність температури стінки вертикального каналу, що обігрівається, вздовж його аксіальної координати від величини параметра $q_r/\rho w$ (відношення граничного теплового потоку на поверхні тепловіддачі до масової швидкості потоку теплоносія), яким зазвичай характеризують інтенсивність тепловіддачі.

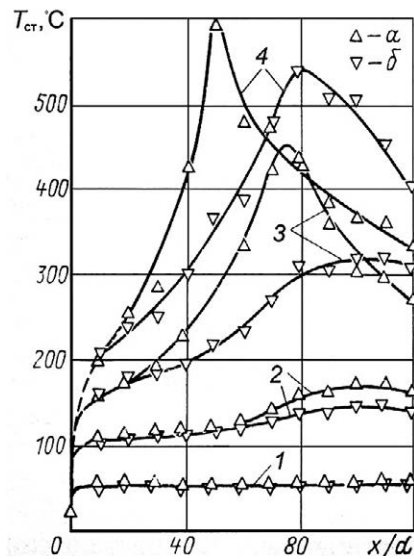


Рис. 1. Характер зміни температури стінки циліндричного вертикального каналу, що обігрівається, залежно від відносної довжини каналу x/d в режимах нормального (1) та погіршеного (2–4) теплообміну за підйомного (а) та опускного (б) руху двооксиду вуглецю в зоні НКП. Умови експерименту: $P = 7,7$ МПа; $\rho w = 2120$ кг/(м²·с); $T_{вх} = 20$ °С; значення параметра $q_r/\rho w$: а: 1 – 0,092, 2 – 0,182, 3 – 0,261, 4 – 0,308; б: 1 – 0,096, 2 – 0,190, 3 – 0,265, 4 – 0,323 (за даними [3])

Аналізуючи експериментальні результати, наведені на рис. 1, треба мати на увазі, що їх було отримано під час використання модельної рідини —

діоксиду вуглецю — як теплоносія з НКП. Проте такі температурні розподіли є характерними також і для легководного теплоносія в навколокритичній області, а також для інших робочих тіл. Під час систематизації цих експериментальних даних звертають на себе увагу принципи фізичні факти: а) тепловіддача з поверхні тепловіддачі в навколокритичній області реалізується у двох основних теплофізичних режимах тепловіддачі — нормальному та погіршеному; б) в умовах нормальної тепловіддачі температура поверхні залишається незмінною або монотонно змінюється при зростанні щільності теплового потоку; в) у разі погіршеної тепловіддачі за умов зростання щільності теплового потоку температура поверхні тепловіддачі різко та непередбачувано зростає, перевищуючи при цьому допустиму для конструкційного матеріалу теплообмінного пристрою температурну межу. Зважаючи на вищезазначене та відповідно до сучасних уявлень [3] про теплофізичні особливості перебігу режимів тепловіддачі в умовах НКП, слід звернути увагу на таке.

1. На думку спеціалістів [3–5], нормальна тепловіддача з поверхні тепловіддачі при плинні теплоносія з НКП у робочому каналі теплообмінного пристрою відбувається в умовах незначного впливу термогравітації та термічного прискорення. При цьому зазвичай відзначається несуттєва та монотонна зміна температури стінки каналу.

2. На відміну від нормальної тепловіддачі погіршення умов тепловіддачі відбувається під впливом значного термічного прискорення та наявності термогравітаційних сил. У разі домінування цих теплофізичних чинників мають місце локальні зниження коефіцієнта тепловіддачі, унаслідок чого виникають один або декілька температурних максимумів по довжині каналу.

3. За наявності в'язкісно-гравітаційного плинного гравітаційні сили визначальним чином впливають на характер руху теплоносія в каналі. У цих умовах режими погіршеної тепловіддачі виявляються як за підйомного, так і опускного руху теплоносія.

4. У випадку підйомного руху теплоносія в каналі, що обігрівається, звичайно розвиваються режими погіршеної тепловіддачі двох різновидів. Перший виникає в умовах, коли прискорення потоку домінує над термогравітацією і максимальний температурний сплеск відзначається в області псевдофазового переходу. Другий різновид погіршеної тепловіддачі відзначається в умовах домінування термогравітаційних сил над термоприскоренням, у результаті чого

температурний максимум виникає на термічній початковій ділянці каналу. У разі зменшення масової швидкості температурний максимум переміщується до початку зони обігріву. При цьому виникнення температурного максимуму не є безпосередньо пов'язаним із впливом зони псевдофазового переходу.

5. За умов опускної течії теплоносія з НКП у вертикальному каналі у разі домінуючого впливу термогравітації та нестійкого розподілу щільності теплоносія відзначається тенденція до посилення генерації турбулентності та підвищення інтенсивності передачі теплоти. При цьому режими з погіршеною тепловіддачею зазвичай не виникають.

6. На сьогодні питання про фізичні межі переважного впливу на рух теплоносія з НКП термогравітаційних сил та термічного прискорення, що фактично визначають умови переходу від нормальної тепловіддачі до погіршеного режиму тепловіддачі, недостатньо досліджене. Проте за умов плинного теплоносія у вертикальному каналі, що обігрівається, початок суттєвого впливу термогравітації (тобто перехід до погіршеної тепловіддачі) звичайно прийнято визначати на основі відповідної емпіричної залежності для води: $Gr \geq 5\Phi$, де $\Phi = 8 \cdot 10^{-5} Re^{2.8} Pr$ [3].

Свого часу в Інституті високих температур АН СРСР під керівництвом академіка Б. С. Петухова було розроблено методику чисельного розрахунку інтенсивності теплообміну та гідравлічного опору у вертикальних циліндричних каналах з обігрівом в умовах плинного в них води з НКП. За результатами циклу цих досліджень для режимів нормальної тепловіддачі в роботі [6] було запропоновано емпіричне рівняння, що описує експериментальні дані з похибкою $\pm 15\%$. У тому ж циклі експериментів для розрахунку погіршеної тепловіддачі у вертикальних каналах було також отримано відповідну емпіричну розрахункову залежність [7]. Однак для умов охолодження легководним теплоносієм з НКП стрижньової збірки ТВЕЛ складної форми поверхні тепловіддачі, що відповідає її конструктиву, відповідні формули на сьогодні відсутні.

З огляду на розглянуті вище температурні особливості аварійного режиму погіршеної тепловіддачі (див. рис. 1), що здатний спричинити непередбачувану руйнацію робочих каналів АкЗ ЯР з НКП, слід відзначити:

а) фізичний механізм виникнення режиму погіршеної тепловіддачі на теперішній час є практично недослідженим;

б) надійні методи розрахункового визначення граничних меж існування режиму погіршеної те-

пловіддачі в каналах теплообмінних пристроїв, особливо в ТВЗ, зі складною формою поверхні тепловіддачі на сьогодні відсутні;

в) методологія визначення інтенсивності тепловіддачі та гідралічного опору ТВЗ у режимі погіршеної тепловіддачі донині ще не створена.

Теплофізика робочих каналів АкЗ реакторів із НКП теплоносія

Як зазначено вище, однією з фундаментальних проблем забезпечення експлуатаційної надійності АкЗ перспективних ЯР з НКП є розробка фізично адекватної та ефективної методології теплогідралічного розрахунку робочих каналів цих реакторів. Однак на сьогодні слід констатувати, що дотепер немає загальноприйнятних фізичних моделей перебігу процесів теплообміну та гідродинаміки теплоносія в умовах НКП. За відсутності таких моделей, як це відзначається, зокрема, у роботах [4, 8], не вирішується також завдання системного врахування низки характерних особливостей теплообміну та гідродинаміки робочого каналу АкЗ в навколокритичній області. При цьому наведені нижче результати досліджень [8–12], що виконані за останні роки, об'єктивно свідчать: а) нелінійна зміна теплофізичних властивостей теплоносія в навколокритичній зоні значною мірою зумовлює характер перебігу режимів нормальної та погіршеної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ; б) на молекулярному рівні фізична сутність виникнення та розвитку нормальної та погіршеної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ далеко не повністю з'ясована.

З огляду на вищезазначені об'єктивні чинники слід підкреслити:

1) на теперішній час режими погіршеної тепловіддачі не можуть бути надійно передбачені та розраховані;

2) нелінійна або екстремальна залежність низки визначальних теплофізичних властивостей теплоносія в області НКП обумовлює складну фізику виникнення та розвитку неодномірних градієнтних течій теплоносія;

3) наявність просторових плинів теплоносія в робочому каналі суттєво ускладнює перебіг турбулентних процесів, що разом з теплопровідністю та в'язкісними ефектами визначають характер тепловіддачі та рівень гідралічного опору відповідного каналу;

4) таким чином, для умов ТВЗ на тепер немає фізично обґрунтованого та загальноприйнятого теплогідралічного критерію, що є здатним надійно

визначити межу між режимами нормальної та погіршеної тепловіддачі;

5) існуючі емпіричні залежності для визначення граничних меж окремих режимів тепловіддачі є адаптованими лише до конкретних теплогідралічних умов, що досліджувались у конкретному теплофізичному експерименті.

Експериментальні дослідження режимів погіршеної тепловіддачі в циліндричних каналах за умов НКП засвідчили, що зменшення щільності рідини під час наближення до критичної температури викликає термічне прискорення потоку, що обумовлює зменшення турбулентності та виникнення в плинні теплоносія архімедових сил. Було з'ясовано, що спільний вплив цих фізичних чинників деформує профіль швидкості, який набуває характерної М-подібної форми з максимумом поблизу стінки, де величина дотичного напруження має наближатися до нуля. У результаті в зоні поблизу стінки утворюється пристінковий шар, що замикає перенесення теплоти і спричиняє підвищення температури стінки.

Єдиного погляду дослідників щодо причин виникнення граничного значення щільності теплового потоку q_r , перевищення якого призводить до виникнення небезпечних режимів з погіршеною тепловіддачею, на сьогодні немає. Немає також і загально визнаної залежності q_r від режимних і геометричних параметрів теплообміну. За даними робіт [9, 10] величина $q_r/\rho w = 0,6$ кДж/кг може бути прийнята за умовну нижню межу виникнення режимів погіршеного теплообміну під час плинну води з НКП в циліндричних каналах. Однак цей критерій не має універсального характеру, оскільки був отриманий лише в достатньо вузькому діапазоні теплогідралічних параметрів, як про це свідчать дані [3], а також інших робіт.

У нечисленних експериментах [4, 5] з дослідження процесу тепловіддачі у стрижньових збірках ТВЕЛ, що охолоджуються плинном легководного теплоносія з НКП, з'ясовано деякі додаткові фізичні особливості виникнення режиму погіршеної тепловіддачі. Так, насамперед, автори повідомляють, що цей режим виникає при підвищених рівнях параметра $q_r/\rho w$ в порівнянні з трубами. Зокрема, у роботі [4] наведено дані, що характеризують межі режимів погіршеної тепловіддачі в каналі з опускним та підйомним рухом теплоносія. Ці експерименти проводилися з ТВЗ, що була утворена 8-трубчастими ($\varnothing 12 \times 0,8$ мм) імітаторами ТВЕЛ з електрообігрівом. Дослідження виконано в умовах тисків 23,6–29,4 МПа та в діапазоні змін

масової швидкості $400 \div 4800 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, температури теплоносія на вході $80 \div 320 \text{ }^\circ\text{C}$ та на рівні щільності теплового потоку, що сягав $1,6 \text{ МВт}/\text{м}^2$. Зокрема, у цих експериментах було визначено, що в перерізі каналу, де середня температура теплоносія наближається до псевдокритичної T_p , мало місце різке підвищення температурного рівня стінки теплового імітатора ТВЕЛ, тобто погіршення тепловіддачі. Під час подальшого збільшення теплового потоку відзначалося зміщення піка температури назустріч потоку з одночасним його зростанням. У роботі [8] ці експериментальні дані було узагальнено і представлено у вигляді емпіричної залежності параметра $q_r/\rho w$ від масової швидкості для різних величин тиску водного теплоносія. Типові профілі розподілу інтенсивності тепловіддачі в цих експериментах залежно від масової швидкості теплоносія наведено на рис. 2.

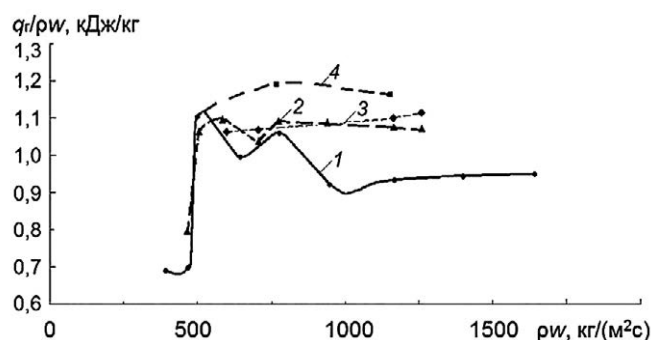


Рис. 2. Характер зміни параметра $q_r/\rho w$ залежно від величин масової швидкості та тиску: 1 — 23,6 МПа; 2 — 24,6 МПа; 3 — 26,5 МПа; 4 — 29,4 МПа (за даними [8])

Показово, що під час аналізу результатів досліджень у роботі [8] виявлено три характерні області з різним впливом масової швидкості на межі виникнення режиму погіршеної тепловіддачі, що реєструвалися в дослідженій модельній стрижньовій збірці теплових імітаторів ТВЕЛ. Так, зокрема, в області малих масових швидкостей ($\rho w < 500 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$) було виявлено істотне зростання параметра $q_r/\rho w$ в діапазоні значень від 0,67 до 1,08 кДж/кг. При збільшенні масової швидкості та її переході до області $500 < \rho w \leq 800 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ досягалося його максимальне значення, що підвищувалося до рівня діапазону 1,08–1,2 кДж/кг. Навпаки, навіть при підвищених рівнях масової швидкості, тобто в області $\rho w > 800 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, спостерігалася стійка тенденція до зменшення цього параметра. Загалом у проведених авторами експериментах діапазон зміни значень інтенсивності тепловіддачі відповідав достатньо широкому інтервалу — від 0,67 до 1,2 кДж/кг.

Проте тенденції до його істотного збільшення в експериментальній ТВЗ у порівнянні з циліндричними каналами так і не було виявлено. Слід відзначити, що методика експериментів, що її було реалізовано в роботі [8], не дала змоги з'ясувати фізичну природу режимів з погіршеною тепловіддачею. Це унеможливило розробку універсальних фізичних залежностей для адекватного визначення граничних меж режиму погіршеної тепловіддачі в ТВЗ. Очевидно, що без цих даних реалізація надійного теплогідрравлічного розрахунку АкЗ легководних ЯР з НКП сьогодні неможлива.

Проблеми теплогідрравлічного розрахунку АкЗ реакторів з НКП

Результати комп'ютерного моделювання ТГП в робочих каналах ЯР з НКП, що були отримані за останні роки, дозволили з'ясувати деякі особливості перебігу ТГП у ТВЗ цих реакторів. Так, зокрема, дані цих обчислювальних експериментів засвідчили, що геометричні характеристики ТВЗ мають істотний вплив на межі виникнення режимів погіршеної тепловіддачі. Такі чисельні дослідження у стрижньових збірках із трикутною та квадратною геометріями решіток із використанням поканальної методики і тривимірного моделювання було виконано в роботах [11, 12]. Так, у роботі [11] за допомогою відомого комп'ютерного коду FLUENT було виконано моделювання теплообміну в ТВЗ каналного реактора типу CANDU-X, охолоджуваного легководним теплоносієм з НКП. Для зазначеного типу реактора ТВЗ з характерною для нього геометрією, а саме довжиною 5,77 м, теплообмін досліджувався відповідно до умов діапазону режимних параметрів ТГП: щільність теплового потоку до $670 \text{ кВт}/\text{м}^2$, тиск легководного теплоносія до 25 МПа, масова швидкість теплоносія до $860 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. За результатами комп'ютерного моделювання виявлено, зокрема, що режим погіршеного теплообміну виникає в області високої азимутальної нерівномірності температури оболонок ТВЕЛ — величини параметра $\Delta T_{\text{фmax}}$. При цьому максимальне значення такої температурної розбіжності, що характеризується цим параметром $\Delta T_{\text{фmax}}$, становило $306 \text{ }^\circ\text{C}$ і спостерігалася в теплогідрравлічних стільниках центрального ряду цієї стрижньової збірки ТВЕЛ. Навпаки, мінімальне значення зазначеного параметра досягалося у стільниках зовнішніх рядів ТВЗ. Показово, що в цих умовах максимальна температура поверхні ТВЕЛ сягала $729 \text{ }^\circ\text{C}$ і при цьому

досягалася в зоні центрального ряду на висоті 1,44 м від входу в канал, де середня температура теплоносія наближалася до рівня 385 °С. Очевидно, що отримана в цих розрахунках температура ТВЕЛ є неприпустимо високою, причому навіть для нових перспективних матеріалів їхніх оболонок.

У роботі [12] наведено результати комп'ютерного моделювання процесу теплообміну та гідромеханіки руху теплоносія в ТВЗ із квадратною решіткою ТВЕЛ (діаметр 8 мм, довжина 4 м), що охолоджується водою з НКП. Режимні параметри цих досліджень відповідали теплогідрравлічним умовам АкЗ китайського реактора SCWR з НКП та тепловою потужністю 3 020 МВт. Обчислювальні експерименти відповідали теплогідрравлічному режиму з такими рівнями режимних параметрів: температура води на вході/виході 280/510 °С, масова швидкість 1 540 кг/(м² · с), тиск 25 МПа. Як об'єкт моделювання досліджувався стандартний внутрішній чотирикутний теплогідрравлічний стільник, який утворено простором між ТВЕЛ і стінкою кожуха ТВЗ. Крім того, додатково моделювався ще й кутовий теплогідрравлічний стільник. Розрахунки виконувалися відповідно до фіксованої щільності теплового потоку 600 кВт/м² в умовах змінного геометричного кроку упаковки стрижнів s/d , що знаходився в діапазоні від 1,2 до 1,6. У цих обчислювальних експериментах було з'ясовано, що в кутових теплогідрравлічних стільниках режим погіршеної тепловіддачі виникав саме в області псевдокритичної температури теплоносія. При цьому у внутрішніх стільниках ТВЗ режим погіршеного теплообміну виникав при значеннях геометричного параметра $s/d \geq 1,4$, а також в діапазоні $q_r/\rho w \geq 0,6$ кДж/кг. У цих умовах максимум коефіцієнта тепловіддачі досягався в області псевдокритичної температури теплоносія, після чого фіксувалося його різке зменшення, яке супроводжувалось різким зростанням температури стінки ТВЕЛ. Показово, що в стільниках між ТВЕЛ і стінкою кожуха ТВЗ режим погіршеного теплообміну виникав у зазорі між стрижнем і стінкою, причому в тому перерізі, де температура теплоносія досягала критичного значення, а азимутальна нерівномірність температури стінки становила 90 °С.

Підводячи підсумок головних результатів наведених вище досліджень, що значною мірою відображають сучасний рівень знань у теплофізиці ЯР з НКП, зокрема наявних методичних підходів з притаманними їм фізичними обмеженнями, слід відзначити: 1) фізичний механізм виникнення та розвитку

режиму погіршеної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ на сьогодні залишається нез'ясованим; 2) наявні підходи до реалізації теплогідрравлічного розрахунку робочих каналів АкЗ, особливо в частині визначення температури поверхні ТВЕЛ, необґрунтовані; 3) наявні розрахункові підходи суттєво обмежені, оскільки використовують лише емпіричні розрахункові залежності, що відповідають виключно області нормальної тепловіддачі; 4) фізична можливість виникнення режимів погіршеної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ наявними розрахунковими методиками теплогідрравлічного розрахунку ТВЗ не враховується.

З огляду на вищезазначені розрахункові обмеження, притаманні сучасним методичним підходам до теплогідрравлічної оцінки АкЗ ЯР з НКП, доцільно проаналізувати типову методику таких обчислень відповідно до перспективного російського реактора ВВЭР-СКД та виконати аналіз отриманих авторами результатів з роботи [13]. У цьому дослідженні в рамках поканального методу теплогідрравлічного розрахунку розв'язувалася система диференціальних рівнянь збереження маси, імпульсу та енергії, що були сформовані для елементарних теплогідрравлічних стільників, на які розбивається поперековий переріз ТВЗ. Вхідними параметрами для цього розрахунку були геометричні характеристики ТВЗ і ТВЕЛ, розподіл енерговиділення по довжині й радіусу, а також витрати теплоносія. У зазначеній роботі було використано програму поканального теплогідрравлічного розрахунку МІФ-СКД, яка є модифікованою версією коду МІФ, що був розроблений в Росії [14] для визначення полів швидкості та температури в ТВЗ з рідкометалевим теплоносієм. Ця програма дає змогу визначити температуру теплоносія в будь-якій аксіальній координаті в кожному з основних типів теплогідрравлічних стільників ТВЗ, а також обчислити температуру оболонки ТВЕЛ та визначити температуру чохла ТВЗ. При цьому враховується залежність теплофізичних властивостей теплоносія від температури по довжині ТВЗ, змінність швидкості теплоносія, нерівномірність розподілу енерговиділення по аксіальній координаті та радіальному перерізу ТВЗ. У реалізованих авторами [14] обчисленнях використано систему замикаючих співвідношень, які фізично обґрунтовані в циклі спеціальних досліджень.

Зокрема, для визначення поточних значень коефіцієнта гідрравлічного опору в неізотермічному режимі з урахуванням змін теплофізичних властивостей по довжині каналу використано емпіричну залежність з роботи [15]

$$\xi = \left[\frac{0,55}{\lg \frac{Re_x}{8}} \right]^2 \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right)_x^{0,2} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{in}} \right)_x^{0,2} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{in}} \right)_x^{0,1} \pm 20\%.$$

У результаті коефіцієнти тепловіддачі з точністю $\pm 20\%$ визначались за емпіричною залежністю саме роботи [15], яка була запропонована авторами на основі обробки результатів експериментального дослідження ТГП у 7-стрижньовій ТВЗ зі спірально оребреними стрижнями за тиску 24,5 МПа:

$$Nu = 0,021 Re_x^{0,8} Pr_x^{0,7} \left(\frac{\rho_w}{\rho_f} \right)^{0,45} \left(\frac{\mu_f}{\mu_{in}} \right)^{0,2} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{in}} \right)^{0,1} \left(1 + \frac{2,5}{x/d_3} \right),$$

де Re_x та Pr_x — числа Рейнольдса та Прандтля у відповідному перерізі ТВЗ; ρ_{in} , ρ_w і ρ_f — щільність теплоносія на вході в ТВЗ, біля стінки ТВЕЛ та в стільнику відповідно; μ_{in} і μ_f — динамічна в'язкість теплоносія на вході та в стільнику; x — геометрична відстань від входу до розрахункового перерізу ТВЗ; d_r — гідравлічний діаметр відповідного стільника.

Структурою програмного пакета МФ-СКД передбачено на кожному розрахунковому кроці коригування теплофізичних властивостей теплоносія, для чого було використано «Систему рівнянь IAPWS-IF97 для обчислення термодинамічних властивостей води і водяної пари» з роботи [16]. Верифікація цього програмного комплексу виконувалась за результатами двох серій експериментів: 1) дослідів в умовах плинину води з НКП у циліндричному каналі діаметром 10 мм та довжиною відповідно 1 і 4 м, які було виконано на стенді СКД ГНЦ РФ ФЕІ [10]; 2) дослідів в умовах плинину модельної рідини фреон-12 з НКП у 7-стрижньовій ТВЗ з тепловими імітаторами циліндричних ТВЕЛ діаметром 9,5 мм, кроком трикутної решітки 11,3 мм і довжиною обігріву 1 000 мм [17]. Як вихідні геометричні параметри були використані обрані розробниками проектні характеристики АкЗ і ТВЗ зі створюваного в Росії пілотного швидкокорезонансного реактора ВВЭР-СКД потужністю 1 700 МВт, наведені в роботах [18–20].

У теплогідравлічних розрахунках ЯР з НКП в розглянутій роботі [13] проаналізовано дві схеми циркуляції теплоносія в АкЗ: одно- і двозахідна. Однозахідна схема, що традиційно реалізується в реакторобудуванні, є типовою як для реакторів з водою під тиском, так і для киплячого типу РУ. Двозахідна схема є менш дослідженою, однак саме її російськими розробниками визнано перспективною для

створення ЯР з НКП. Показово, що за використання цієї схеми корпус реактора АкЗ ділиться на дві робочі зони — центральну і периферійну. У периферійній частині здійснюється опускний рух теплоносія, а в центральній частині — підйомний. При цьому в нижній камері змішування має бути забезпечено перехід температури теплоносія через псевдокритичну зону.

Згідно з даними роботи [18], під час реалізації однозахідної схеми розрахункові значення температури теплоносія на виході з АкЗ для різних ТВЗ суттєво відрізняються внаслідок нерівномірного розподілу їхньої потужності по радіусу АкЗ. Проведені в цій роботі за наявними методиками розрахунки показали, що в деяких випадках температурні розбіжності на виході з різних ТВЗ можуть сягати 1 000 °С, що було визнано неприйнятним. З огляду на такі результати автори вважають за необхідне реалізацію додаткових досліджень та пошук нових матеріалів для оболонок ТВЕЛ. Як ілюстрацію на рис. 3 наведено отриманий у роботі [13] розрахунковий розподіл середньої температури теплоносія по висоті однієї з ТВЗ. Із цих даних випливає, що зі збільшенням витрат теплоносія у два рази температура теплоносія на виході ТВЗ знижується до технічно прийнятної рівня.

Проте значний інтерес становлять результати розрахунку, що наведені на рис. 4 і характеризують можливість виникнення режимів погіршеної тепловіддачі безпосередньо в робочих каналах АкЗ перспективного російського реактора з НКП. Межею консервативної оцінки можливості виникнення режимів експлуатації з погіршеною тепловіддачею в цій роботі було обрано значення відношення $q_r/\rho w = 0,6$. Разом з тим із даних, наведених на рисунку, випливає той факт, що суттєве збільшення витрат теплоносія через АкЗ (навіть у два рази) не запобігає виникненню небажаного з точки зору безпеки режиму погіршеної тепловіддачі.

Як відзначено вище, перехід через псевдокритичну точку супроводжується різкою зміною теплофізичних властивостей легководного теплоносія та можливим суттєвим погіршенням тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ. Зважаючи на таку негативну зміну умов теплообміну, розробники вважають за доцільне локалізувати перехід через псевдокритичну точку саме в області нижньої камери ЯР, де плин теплоносія змінює свій напрямок руху на протилежний. З огляду на таке технологічне рішення, виконані в роботі [18] оцінки показали, що максимальне співвідношення потужностей ТВЗ у зоні підйомного

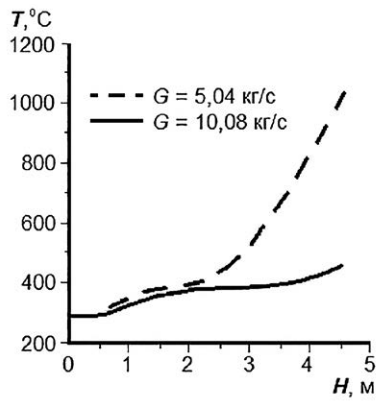


Рис. 3. Характер розподілу середньої температури теплоносія по висоті ТВЗ залежно від витрат теплоносія за даними [18]

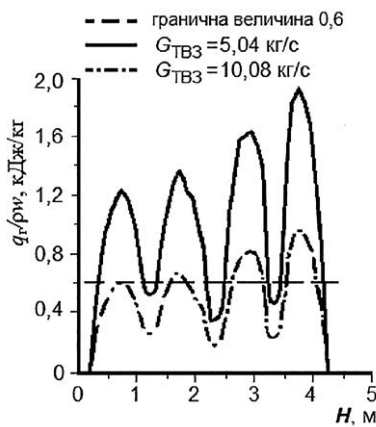


Рис. 4. Результати порівняння критичних відношень теплових потоків до масової швидкості по висоті Ак3 при різних витратах теплоносія за даними [18]

руху теплоносія, де реалізується його перегрів понад псевдокритичну температуру, не перевищує значення 1,67. Іншими словами, виявлена відносно невелика нерівномірність температури на виході з Ак3, причому максимальний рівень цієї температури близько 724 °С. Проте на периферії Ак3 в області опускного руху теплоносія співвідношення максимальної теплової потужності ТВЗ до її мінімального значення суттєво погіршується і досягло величини 4,17. Однак незважаючи на це, максимальна температура теплоносія на виході з опускної ділянки за результатами підрахунків не має перевищувати температурного рівня у 604 °С. Таким чином, на основі виконаного в роботі [18] комп'ютерного моделювання розробниками конструкції перспективного російського реактора ВВЭР-СКД [19, 20] було обґрунтовано такі конструктивні рішення: або забезпечити профілювання вхідного патрубку в кор-

пусі ЯР, або зменшити потужності ТВЗ, що встановлені в центральній частині Ак3. Типові результати теплогідравлічного розрахунку температурних режимів для однієї з найбільш енергонапружених ТВЗ у цьому ЯР представлено на рис. 5 і 6.

На думку розробників ЯР, виконані авторами розрахункові оцінки свідчать, що в умовах використання двозахідної схеми циркуляції збільшення витрат легководного теплоносія на 30% дозволяє досягти прийнятної з матеріалознавчої точки зору температури на виході з ТВЗ. Іншими словами, температура оболонки ТВЕЛ не має перевищити допустимого для сучасних матеріалів рівня. Крім того, рис. 6 ілюструє, що подібне збільшення витрат теплоносія є, загалом, достатнім, щоб запобігти виникненню режимів погіршеної тепловіддачі. З огляду на дані роботи [18] можна стверджувати, що двозахідна

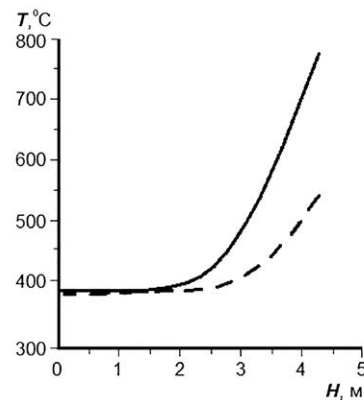


Рис. 5. Характер розподілу середньої температури теплоносія по висоті ТВЗ залежно від витрат теплоносія (суцільна лінія — витрата 15,7 кг/с, пунктирна — 20,9 кг/с) за даними [18]

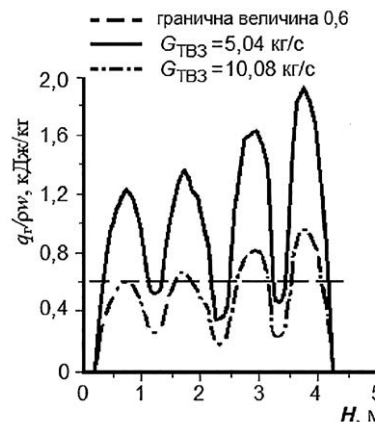


Рис. 6. Результати порівняння співвідношень теплових потоків до масової швидкості по висоті Ак3 в умовах різних витрат теплоносія (суцільна лінія — витрата 15,7 кг/с, пунктирна — 20,9 кг/с) за даними [18]

схема циркуляції теплоносія з точки зору експлуатаційної безпеки має суттєві переваги перед однозакладною схемою. Проте автори цього розрахункового дослідження відповідно до висновків розробників ВВЭР-СКД [19, 20] вважають за необхідне констатувати: наявною в конструкції цього ЯР є значна нерівномірність розподілу теплових потужностей ТВЗ, що вимагає додаткових експериментальних та теоретичних досліджень. Очевидно, що ці дослідження є необхідними також і для обґрунтування схеми гідравлічного профілювання АкЗ.

Висновки

1. Процеси теплообміну та гідродинаміки в каналах АкЗ перспективних ЯР з НКП відзначаються високою складністю, недостатньою дослідженістю та високою ймовірністю виникнення в зоні поблизу псевдокритичної температури теплоносія аварійних режимів погіршеної тепловіддачі.

2. Фізична природа виникнення режимів погіршеної тепловіддачі на сьогодні залишається нез'ясованою, а наявні підходи до реалізації теплогідравлічного розрахунку ЯР з НКП не є достатньо фізично обґрунтованими.

3. Запропоновані в деяких роботах рекомендації щодо визначення нижньої допустимої граничної межі інтенсивності тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ граничною величиною інтегрального параметра $q_r/\rho w$ на рівні 0,6 кДж/кг не можуть вважатися фізично обґрунтованими та надійними для ТВЗ перспективних ЯР.

4. З урахуванням складного характеру міжстільникового тепломасообміну в структурі ТВЗ та локалізації в ній окремих теплогідравлічних стільників зі зниженими рівнями інтенсивності тепловіддачі слід вважати, що визначення області погіршеної тепловіддачі в каналах АкЗ ЯР з НКП на основі нерівності $q_r/\rho w \leq 0,6$ є суттєво спрощеним.

5. Комплексні теплофізичні дослідження з розробки надійних методів визначення безпечної області теплових навантажень ТВЗ слід розглядати як фундаментальну наукову задачу, без вирішення якої створення діючого прототипу ЯР з НКП слід вважати неможливим.

6. Системне теплофізичне обґрунтування створюваної методології теплогідравлічного розрахунку перспективних ЯР з НКП потребує реалізації широкого фронту експериментальних, розрахункових та теоретичних досліджень у рамках міжнародної на-

укової співпраці, що суттєво віддаляє терміни створення діючих прототипів реакторів цього типу.

7. Отримані свого часу різними авторами експериментальні дані підтверджують наявність розглянутої актуальної проблеми щодо необхідності гарантованого забезпечення перспективних ЯР з НКП легководного теплоносія та свідчать про високий рівень потенційної небезпеки виникнення в АкЗ цих одноконтурних реакторів режимів погіршеної тепловіддачі, нехтування якими може спричинити аварії з тяжкими наслідками.

Список використаної літератури

1. Світові тенденції розвитку конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараєвський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін [та ін.] // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 2 (17). — С. 3–15. doi.org/10.31717/2311–8253.20.2.1.
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. doi.org/10.31717/2311–8253.20.3.4.
3. Петухов Б. С. Теплообмен в ядерных энергетических установках / Б. С. Петухов, Л. Г. Генин, С. А. Ковалев. — Москва : Энергоатомиздат, 1986. — 472 с.
4. Габараев Б. А. Перспективное направление развития водоохлаждаемых реакторов АЭС в XXI в. — использование сверхкритических параметров теплоносителя / Б. А., Габараев В. Н. Смолин, С. Л. Соловьев // Теплоэнергетика. — 2006. — № 9. — С. 33–40.
5. Исследование теплообмена и гидравлического сопротивления при течении воды сверхкритических параметров применительно к реакторным установкам / В. А. Силян, Ю. М. Семченков, П. П. Алексеев, В. В. Митькин // Атомная энергия. — 2010. — Т. 108, № 6. — С. 340–347.
6. Петухов Б. С. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трубах при турбулентном течении жидкости околокритических параметров состояния / Б. С. Петухов, В. А. Курганов, В. Б. Анкудинов // Теплофизика высоких температур. — 1983. — Т. 21, № 1. — С. 92–111.
7. Петухов Б. С. Новый подход к расчету теплообмена при сверхкритических давлениях теплоносителя / Б. С. Петухов, А. С. Поляков, С. В. Росновский // Теплофизика высоких температур. — 1976. — Т. 15, № 6. — С. 1326–1334.

8. Режимы ухудшенного теплообмена при течении воды сверхкритического давления в каналах с пучками стержней / М. М. Ковецкая, Е. А., Кондратьева, Ю. Ю. Ковецкая [и др.] // Ядерная энергетика та докiлля. — 2016. — № 1 (7). — С. 26–32.
9. Грабежная В. А. Теплообмен при сверхкритических давлениях и границы ухудшения теплообмена / В. А. Грабежная, П. Л. Кириллов // Теплоэнергетика. — 2006. — № 4. — С. 46–51.
10. Кириллов П. Л. Исследование границ ухудшенных режимов в каналах при сверхкритических давлениях / П. Л. Кириллов, В. В. Ложкин, А. М. Смирнов // Препринт ФЭИ-2988. — Москва, 2003.
11. Применение CFD-кода к расчету теплообмена в реакторе со сверхкритическими параметрами / В. П. Смирнов, М. В. Папандин, А. Я. Лонинов [и др.] // Атомная энергия. — 2011. — Т. 111, № 4. — С. 196–201.
12. Numerical study on flow and heat transfer characteristics in the rod bundle channels under super critical pressure condition / X. Yang, G. H. Su, W. Tian, J. Wang, S. Qiu // Annals of Nuclear Energy. — 2010. — Vol. 37. — P. 1723–1734.
13. Карташев К. В. Проведение теплогидравлических расчетов активной зоны реактора ВВЭР–СКД для разных схем течения теплоносителя при проектных режимах работы / К. В. Карташев, Г. П. Богословская // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. — 2012, № 31. — С. 71–77.
14. Грабежная В. А. О расчетах теплообмена в трубах и пучках стержней при течении воды сверхкритического давления: Обзор ФЭИ-0297 / В. А. Грабежная, П. Л. Кириллов, — Москва : ЦНИАтоминформ, 2003.
15. Дядякин Б. В. Теплоотдача и гидравлическое сопротивление тесного семистержневого пучка, охлаждаемого потоком воды при закритических параметрах состояния / Б. В. Дядякин, А. С. Попов // Тр. Всесоюз. Теплотехнического НИИ. — 1977. — № 11. — С. 244–253.
16. Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Справочник / А. А. Александров, Б. А. Григорьев / ГСССД Р-776–98. — Москва : Изд-во МЭИ, 1999.
17. Экспериментальное исследование теплообмена в пучке из семи стержней при сверхкритических параметрах фреона-12 / А. С. Шелегов, С. Т. Лескин, И. А. Чусов, В. И. Слободчук // Препринт ИАТЭ-001–2010. — Обнинск, 2010.
18. Реактор, охлаждаемый водой сверхкритического давления, ВВЭР–СКД — основной претендент в «Супер-ВВЭР» / П. Л. Кириллов, Ю. Д. Баранаев, А. П. Глебов, А. В. Клушин // Материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». — ОАО «ОКБ ГИДРОПРЕСС», 2011.
19. Концепция активных зон ВВЭР СКД: условия эксплуатации твэлов, конструкция ТВС и кандидатные материалы / В. М. Махин, И. Н. Васильченко, В. В. Вялицын [и др.] // Там же.
20. Чуркин А. Н. Теплогидравлика однозаходной активной зоны ВВЭР–СКД. Гидропрофилирование и устойчивость / А. Н. Чуркин, П. В. Ягов. О. В. Мохова // Там же.

**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*

Problem Issues of Cores Thermal-Hydraulic Calculation for Prospective Water-Cooled Reactors with Supercritical Parameters

The fundamental thermophysical features of the heat exchange process between the heated wall of a vertical channel and the light-water coolant of supercritical parameters concerning the conditions of heat-generating assemblies channels and cores of perspective energy nuclear reactors are considered. The available methods and recommendations for determining the limits of thermal load are analyzed. It is a guarantee the absence of the characteristic dangerous mode possibility of deteriorated heat exchange in these conditions and corresponding sharp rise in the channels wall temperature, which threatens their destruction. The physical nature of the occurrence of degraded heat transfer regimes remains unclear, and the existing approaches to the implementation of thermohydraulic calculation in such conditions are not sufficiently justified. The complex nature of intercellular heat and mass transfer in the fuel assembly and the presence of individual thermohydraulic cells with reduced levels of heat transfer intensity indicate that the existing method of determining the area of degraded heat transfer in the reactor core channels with supercritical parameters of the coolant is significantly simplified. Insufficient data and research results have been revealed to create adequate methods of heat-hydraulic calculation, suitable for taking into account the peculiarities of the heat transfer process complex flow under conditions of supercritical parameters of the coolant. The application of such methods should be

the basis for ensuring the safe operation of prospective reactors and minimizing potential losses of a different nature from accidents caused by the destruction of cores through unacceptable heat transfer modes. To this end, the main direction of further research is identified.

Keywords: light-water nuclear reactor, supercritical parameters, fuel assembly, 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. Petukhov B. S., Genin L. G., Kovalev S. A. (1986). *Teploobmen v yadernykh energeticheskikh ustanovkakh* [Heat exchange in NPP]. Moscow: Energoatomizdat, 472 p. (In Russ)
4. Gabaraev B. A., Smolin V. N., Solov'ev S. L. (2006) [A promising direction for the development of water-cooled nuclear power reactors in the 21st century — use of supercritical fluid parameters]. *Teploenergetika* [Heat power engineering], vol. 9, pp. 33–40. (in Russ.)
5. Silin V. A., Semchekov Yu. M., Alekseev P. P., Mit'kin V. V. (2010). [Investigation of heat transfer and hydraulic resistance during supercritical water flow as applied to reactor facilities]. *Atomaya energiya* [Atomic energy], vol. 108, no. 6, pp. 340–347. (in Russ.)
6. Petukhov B. S., Kurganov V. A., Ankudinov V. B. (1983). [Heat transfer and hydraulic resistance in pipes with turbulent fluid flow near-critical state parameters]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [Thermal physics of high temperatures], vol. 21, no. 1, pp. 92–111. (in Russ.)
7. Petukhov B. S., Polyakov A. S., Rosnovsky S. V. (1976). [A new approach to calculating heat transfer at supercritical coolant pressures]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [Thermal physics of high temperatures], vol.15, no. 6, pp. 1326–1334. (in Russ.)
8. 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 dovkillia* [Nuclear power and the environment], vol. 7, no. 1, pp. 26–32. (in Russ.)
9. Grabezhnaya V. A., Kirillov P. L. (2006). [Heat transfer at supercritical pressures and the limits of heat transfer degradation]. *Teploenergetika* [Heat power engineering], vol. 4, pp. 46–51. (in Russ.)
10. Kirillov P. L., Lozhkin V. V., Smirnov A. M. (2003). The study of the degraded modes boundaries in the channels at supercritical pressures [*Issledovanie granits ukhudshennykh rezhimov v kanalakh pri sverkhkriticheskikh davleniyakh*]. Preprint FEI-2988. (in Russ.)
11. Smirnov V. P., Papandin M. V., Loninov A. Ya., Vanyukova G. V., Afonin S. Yu. (2011). [Application of CFD — code to the calculation of heat transfer in a reactor with supercritical parameters]. *Atomaya energiya* [Atomic energy], vol. 111, no. 4, pp. 196–201. (in Russ.)
12. Yang X., Su G. H., Tian W., Wang J., Qiu S. (2010). Numerical study on flow and heat transfer characteristics in the rod bundle channels under super critical pressure condition. *Annals of Nuclear Energy*, vol. 37, pp. 1723–1734.
13. Kartashev K. V., Bogolovskaya G. P. (2012). [Conducting thermohydraulic calculations of the VVER–SKD reactor core for different coolant flow patterns under design operating conditions]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. [Problems of atomic science and technology], vol. 31, pp. 71–77. (in Russ.)
14. Grabezhnaya V. A., Kirillov P. L. (2003). *O raschetakh teploobmena v trubakh i puchkakh sterzhney pri tehnologii vody sverkhkriticheskogo davleniya* [On heat transfer calculations in pipes and bundles of rods in supercritical pressure water flow]. FEI review 0297. Atominform. (in Russ.)
15. Dadyakin B. V., Popov A. S. (1977). [Heat transfer and hydraulic resistance of a close seven-rod bundle cooled by a stream of water at supercritical state parameters]. *Proc. VTI*, vol. 11, pp. 244–253. (in Russ.)
16. Aleksandrov A. A., Grigor'ev B. A. (1999). *Tablitsy termodinamicheskikh svoystv vody i vodianogo para* [Tables of thermophysical properties of water and water vapor]. Handbook. Gos. Sluzhby standartnykh spravochnykh dannykh. GCCCД P-776–98. Moscow: MEI Publ. (in Russ.)
17. Shelegov A. S., Leskin S. T., Chusov I. A., Slobodchuk V. I. (2010). *Eksperimental'noe issledovanie teploobmena v puchke iz semi sterzhney pri sverkhkriticheskikh parametrokh freona-12* [An experimental study of heat transfer in a beam of seven rods with supercritical parameters of Freon-12]. Preprint SATE-001–2010. Obninsk. (in Russ.)

18. Kirillov P. L., Baranaev Yu. D., Glebov A. P., Klushin A. V. (2011). *Reaktor, okhlazhdaemyj vodoy sverkhkriticheskogo davleniya, VVER-SKD — osnynnoj pretendent v “Super-VVER”* [The reactor cooled by supercritical water, VVER-SKD is the main contender in Super-VVER]. Proceedings of the 7th Int. Conf. “Ensuring the safety of NPPs with WWER” (Podolsk, Russia). Podolsk: Gidropress. (in Russ.)
19. Makhin V. M., Vasil’chenko I. N., V’yalitsyn V. V., Kushmanov S. A., Kurakin K., Churkin A. N., Lapin A. V., Semiglazov S. V. (2011). *Koncepcia aktivnykh zon VVER-SKD: usloviya ekspluatsiyi tvelov, konstrukciya TVS i kandidatnye materialy* [VVER SKD active zones concept: fuel rod operating conditions, fuel assembly design and candidate materials]. Proceedings of the 7th Int. Conf. “Ensuring the safety of NPPs with WWER” (Podolsk, Russia). Podolsk: Gidropress. (in Russ.)
20. Churkin A. N., Yagov P. V., Mokhova O. V. (2011). *Teplogiravlika odnozakhodnoy aktivnoy zony VVER-SKD. Gidroprofilirovnie i ustoichivost’* [Thermohydraulics of a single-run core of VVER-SKD. Hydroprofiling and stability.]. Proceedings of the 7th Int. Conf. “Ensuring the safety of NPPs with WWER” (Podolsk, Russia). Podolsk: Gidropress. (in Russ.)

Надійшла 23.06.2020

Received 23.06.2020