

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

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

Дослідження спектральних образів нейтронного шуму реакторів типу ВВЕР у нерегламентних теплогидравлічних режимах активних зон

Ключові слова:

реактори ВВЕР,
активна зона,
нейтронний шум,
спектральні характеристики
сигналів,
теплогидравлічні аномалії,
діагностика

Узагальнено відомості про особливості проявів потенційно небезпечних теплогидравлічних аномалій, що непрогнозовано виникають у процесі експлуатації активних зон реакторів типу ВВЕР. Значну увагу приділено загрозі неконтрольованого виникнення в тепловидільних збірках латентних передаварійних та аварійних експлуатаційних станів під час генерації парової фази на поверхні тепловидільного елемента, включаючи кризу тепловіддачі при подальшому кипінні теплоносія. Відзначено, що в цих умовах тепловіддача, яка має відбуватися виключно в конвективному режимі, характеризується також неконтрольованим виникненням процесу кипіння, від активації перших центрів пароутворення до формування розвиненої пазиркової структури теплоносія. Розглянуто обмежені можливості сучасних технічних засобів моніторингу технічного стану ВВЕР, які не забезпечують виявлення зазначених аномалій та передаварійних режимів тепловіддачі. З огляду на дані про флуктуації потоку нейтронів показано, що шумові складові на виході штатних електронно-емісійних вимірювачів нейтронного потоку несуть важливу діагностичну інформацію, яка наразі втрачається, щодо теплогидравлічних процесів в об'ємі активної зони. З урахуванням цього зроблено висновок про необхідність невідкладної розробки методології оперативної ідентифікації випадкових спектральних реалізацій нейтронного шуму, що реєструється на виходах нейтронних детекторів існуючих систем внутрішньореакторного контролю. Визначено характер необхідних надійних даних про спектральну структуру основних типів діагностичних образів (сигнатур або патернів) нейтронного шуму відповідно до основних типів теплогидравлічних аномалій. Наведено аналіз даних відомих, а також виконаних за участі авторів реакторних експериментів, на основі якого доведено, що спектральна структура авто- та когерентної густини сигналів на виході штатних детекторів нейтронного потоку містить вичерпну діагностичну інформацію стосовно типу та місця локалізації парорідинних структур в активній зоні реактора ВВЕР. З огляду на це проаналізовано інформаційні характеристики окремих спектральних діапазонів нейтронного шуму і зроблено висновки щодо безпосередньої відповідності їх до характерних теплогидравлічних процесів як об'єктів діагностики.

Вступ

Можна вважати доведеним [1, 2], що в процесі експлуатації основних типів конструкцій ядерних

енергоустановок (ЯЕУ) з водо-водяними реакторними установками (РУ) ВВЕР, які відповідно до проектних вимог у штатних експлуатаційних режимах мають забезпечувати в активній зоні (АкЗ) цього

© І. Г. Шараєвський, Т. С. Власенко, Л. Б. Зімін, А. В. Носовський,
Н. М. Фіалко, Г. І. Шараєвський, 2022

реактора підігрів легководного теплоносія виключно в конвективному режимі тепловіддачі з поверхні тепловидільного елемента (ТВЕЛ), можливим є не прогнозоване виникнення в їхніх тепловидільних збірках (ТВЗ) низки потенційно небезпечних теплогідравлічних аномалій. Показово, що визначальною термодинамічною особливістю цих експлуатаційних порушень теплогідравлічного характеру, що здатні неконтрольовано розвиватися в ТВЗ ядерних реакторів (ЯР) водо-водяного типу, є латентне виникнення нештатного процесу генерації парової фази на поверхні ТВЕЛ. З огляду на високий рівень потенційної загрози, яку являє собою для безпеки ЯР процес виникнення в ТВЗ ВВЕР експлуатаційних аномалій теплогідравлічного характеру, у першу чергу мають бути відзначені не тільки фізичні особливості неконтрольованого виникнення основних типів структурних форм процесу кипіння в АкЗ водо-водяних реакторів, але також розглянуті головні наслідки латентного розвитку цього нештатного режиму експлуатації для безпеки РУ. У цьому контексті також має бути врахована та потенційна загроза, яку несе неконтрольований розвиток процесу генерації парової фази в ТВЗ, верхньою межею трансформації якого, як відомо [3], є криза тепловіддачі та руйнація ТВЕЛ.

Відповідно до фундаментальних постулатів експлуатаційної безпеки РУ [1–3 та ін.], втрата герметичності оболонок ТВЕЛ через виникнення на поверхні їхньої тепловіддачі кризи кипіння теплоносія (або через інші причини) створює реальну загрозу функціонуванню водоохолоджуваних (ВО) ЯР. Водночас, спираючись на дані аналізу сучасного стану технічних засобів систем внутрішньореакторного контролю (СВРК) [4], треба звернути увагу на те, що ці засоби в структурі існуючих комп'ютерних комплексів моніторингу та діагностики технологічних параметрів сучасних ЯЕУ не забезпечують можливості оперативного виявлення та надійної ідентифікації в процесі експлуатації ЯР низки потенційно небезпечних аномальних та передаварійних теплогідравлічних процесів (ТГП) в ТВЗ РУ. Серед цих експлуатаційних порушень, насамперед, такі фазові перетворення, як початок генерації парової фази та подальший розвиток структурних форм двофазного потоку аж до виникнення кризи тепловіддачі під час кипіння. У той же час слід відзначити, що надійність діючих та створюваних РУ типу ВВЕР, включаючи перспективні ВО ЯР цього класу з надкритичними термодинамічними параметрами (НКП) легководного теплоносія, може

бути істотно підвищена, у першу чергу на основі розробки та створення інтегрованих до структури перспективних СВРК якісно нових засобів оперативної діагностики теплогідравлічних режимів ТВЗ. Визначальним при цьому є те, що зазначені діагностичні засоби нового покоління мають забезпечити надійний контроль ТГП в АкЗ ВВЕР, який наразі є відсутнім. З цих позицій як об'єкти оперативної діагностики (тобто, насамперед, раннього автоматичного виявлення) слід розглядати всі нерегламентні режими генерації парової фази на поверхні ТВЕЛ та структурні форми двофазного потоку, починаючи з такої вихідної теплогідравлічної аномалії, якою є режим активації перших центрів пароутворення. З огляду на це образи (тобто сигнатури або патерни) експлуатаційних порушень теплогідравлічного характеру в АкЗ реакторів типу ВВЕР підлягають дослідженню та систематизації як основа для розробки алгоритмів їхньої автоматичної ідентифікації. Використання в якості діагностичних ознак цих образів спектральних параметрів нейтронного шуму в АкЗ реакторів ВВЕР під час вирішення завдань оперативного контролю теплогідравлічного стану АкЗ ВО ЯР, як показано в роботі [4], не має альтернативи.

Показово, що вищезазначена безпекова концепція є загально визнаною і підлягає реалізації на основі розробки не тільки принципово нових підходів до автоматичної ідентифікації аномальних та передаварійних ТГП в АкЗ, але й нових фізичних принципів, що полягають у використанні прихованої діагностичної інформації, яка міститься в шумах технологічних параметрів РУ: флуктуацій нейтронного шуму, температури, тиску та ін. Особливо це стосується флуктуаційних складових сигналів нейтронного потоку в АкЗ ВВЕР, оскільки ці сигнали (тобто нейтронний шум) забезпечують можливість оперативного контролю всього об'єму АкЗ на основі вже існуючих СВРК. З огляду на дані досліджень [2–4 та ін.], пріоритетною науковою проблемою є розробка методології оперативної автоматичної діагностики АкЗ ВО ЯР, що включає створення спеціалізованого математичного та програмного забезпечення, а також реалізацію відповідних програмно-технічних засобів для забезпечення в реальному часі процедур автоматичної ідентифікації теплогідравлічних аномалій. Як відзначено вище, необхідну практичну основу для реалізації відповідних алгоритмів автоматичної шумової діагностики порушень теплогідравлічного характеру мають складати дані системного аналізу спектральної структури та інформаційної значущості

окремих ділянок спектра нейтронного шуму ВО ЯР. Розгляду й систематизації результатів експериментальних досліджень, що були виконані за останні роки в цьому актуальному науковому напрямі, і присвячено цю наукову публікацію.

Фізика теплогідролічних аномалій у реакторах із до- та надкритичними параметрами теплоносія. Матеріалознавчі аспекти пошкоджуваності ТВЕЛ

У контексті системного аналізу фізичних особливостей виникнення теплогідролічних аномалій у некиплячих реакторах типу ВВЕР, а також можливого впливу цих аномалій на безпеку РУ мають розглядатися два визначальні експлуатаційні діапазони термодинамічних параметрів АкЗ ВО ЯР: а) докритичний, що є робочим для всіх існуючих та розроблюваних типів РУ третього покоління з реакторами водо-водяного типу; б) надкритичний, який розглядається як перспективний при створенні пілотних зразків РУ четвертого покоління [5, 6]. З огляду на принципові фізичні відмінності перебігу процесів теплообміну в АкЗ РУ з до- та надкритичними параметрами теплоносія під час аналізу проблематики теплогідролічної надійності ЯР третього та четвертого покоління мають бути відзначені нижченаведені визначальні фізичні аспекти безпекової проблематики цих типів реакторів.

Як відомо [2, 3], процеси кипіння теплоносія в АкЗ реакторів типу ВВЕР з докритичними параметрами, що за певних умов (наприклад, при форсуванні теплової потужності ЯР) можуть виникати в їхніх ТВЗ, є фізично зумовленими неконтрольованою оперативним персоналом стохастичною динамікою виникнення та подальшого розвитку процесу фазового переходу. Нижньою межею цього процесу є фізично нечітка ймовірнісна область активації перших центрів пароутворення, що дає початок можливому прихованому розвитку парорідинних структур з підвищеним паровмістом у ТВЗ. Характерно, що ці латентні (для оперативного персоналу) структури можуть бути представлені не тільки пухляким режимом плинну двофазного теплоносія, але також снарядною, емульсійною, дисперсно-кільцевою його структурними формами, що відрізняються наявністю в них розвинених парових структур. При цьому верхньою межею такого динамічно сформованого в реакторному каналі по його висоті парорідинного конгломерата є короткотерміновий (терміном у декілька секунд)

аварійний теплогідролічний процес виникнення на поверхні ТВЕЛ стійких парових плівок (тобто кризи тепловіддачі 1-го роду), який призводить до незворотної руйнації відповідних конструкцій.

Таким чином, прихована перманентна генерація парової фази в ТВЗ реакторів ВВЕР з докритичними термодинамічними параметрами АкЗ обґрунтовано розглядається спеціалістами як потенційна загроза безпеці ВО ЯР. Показово, що цей парорідинний конгломерат, який формується по висоті ТВЗ, попередньо (на окремих ділянках реакторного каналу знизу догори за течією потоку) проявляє себе через виникнення таких характерних структурних форм двофазного потоку: 1) режим активації перших центрів пароутворення, що являє собою нижню межу процесу початку кипіння теплоносія; 2) структура розвиненого пухлякого кипіння з переходом до снарядного, емульсійного та кільцевого режимів плинну двофазного теплоносія в ТВЗ; 3) режим пухляково-плівкового кипіння з коагуляцією окремих центрів пароутворення в локальні нестабільні парові плівки (їхнє виникнення безпосередньо передуює розвитку аварійного режиму кризи тепловіддачі); 4) аварійний режим стійких парових утворень, формування яких безпосередньо ініціює розвиток кризи тепловіддачі та швидкоплинну руйнацію ТВЕЛ. З огляду на цю аварійну динаміку слід відзначити:

1) своєчасне виявлення на основі комплексу інформативних діагностичних ознак, зокрема таких, як параметри нейтронного шуму, перших двох із вищеперелічених початкових типів парових структур, відповідно до результатів циклу досліджень [4], слід розглядати як необхідну фізичну передумову для реалізації превентивної оперативної діагностики АкЗ ВВЕР із метою своєчасного запобігання руйнації ТВЕЛ унаслідок виникнення кризи тепловіддачі в ТВЗ;

2) до теперішнього часу спеціалісти з реакторної теплофізики вважали, що початок генерації парової фази на поверхні ТВЕЛ у ТВЗ реакторів ВВЕР не несе безпосередньої загрози штатній експлуатації ТВЕЛ, оскільки не може призводити до проникаючого пошкодження їхніх оболонок;

3) як показали окремі дослідження для ВО ЯР для виробництва плутонію, які використовують алюмінієві оболонки ТВЕЛ (ці роботи свого часу було започатковано експериментами [7–9]), виникнення теплогідролічних аномалій у ТВЗ у вигляді розвинених пухлякових структур є здатним ініціювати появу наскрізних проникаючих пошкоджень не тільки алюмінію, але також і цирконію;

4) експериментально було встановлено, що в області пузиркового кипіння на поверхні тепловіддачі під діючими центрами пароутворення виникають пульсації температури з частотою у декілька десятків герц та флуктуації температури поверхні тепловіддачі з амплітудою до трьох десятків градусів. При цьому зазначені параметри коливань залежать від густини теплового потоку, масової швидкості теплоносія, а також довжини ділянки обігріву ТВЕЛ;

5) як свідчать результати теплофізичного аналізу цієї проблеми, виконаного в монографії [2], визначальною причиною множинних наскрізних пошкоджень і пов'язаного з ними порушення герметичності ТВЕЛ у режимі поверхневого кипіння теплоносія на його поверхні можуть бути термічні напруги, що виникають у матеріалі оболонки за умов температурних пульсацій, пов'язаних зі швидкоплинним випарюванням мікрошару завтовшки в декілька мікрон, що формується в основі зростаючого парового пузиря.

Відповідно до результатів роботи [10], в якій розглянуто сучасну проблематику теплогідравлічної безпеки перспективних реакторів ВВЕР із НКП легководного теплоносія, можна стверджувати:

1) існує достатньо глибока фізична аналогія між процесом генерації парової фази в докритичних ВО ЯР та процесом псевдофазового переходу в перспективних реакторах ВВЕР із НКП;

2) наявність псевдокипіння в умовах НКП робить неадекватним розгляд надкритичного теплоносія як однофазної системи, в якій фазові перетворення є неможливими;

3) виникнення перших псевдопарових утворень в області НКП, що генеруються рухомими осердями турбулентних вихорів у пристінковому шарі надкритичного теплоносія, становить необхідну фізичну передумову для подальшого переходу цього початкового режиму псевдопузиркового кипіння до його аварійного псевдоплівкового різновиду;

4) виникнення режиму псевдоплівкового кипіння є фізичною першопричиною розвитку аварійного режиму погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в умовах НКП;

5) у цих умовах спектральна структура акустичної емісії процесу псевдофазового переходу в навколкритичній області адекватно характеризує визначальні фізичні особливості псевдокипіння, що реалізується на молекулярному рівні;

6) спектральні параметри акустичних (акусто-емісійних) та нейтронношумових діагностичних сигналів відзначаються певною подобою, що дає

принципову можливість використання нейтронношумових сигналів для оперативної діагностики процесу псевдофазового переходу в умовах НКП;

7) відсутність на теперішній час пілотних зразків перспективних реакторів ВВЕР із НКП унеможливує отримання реальної нейтронношумової діагностичної інформації стосовно потенційно небезпечних теплогідравлічних аномалій в АкЗ цих ЯР;

8) наявність реальних експериментальних даних зі спектральних параметрів нейтронного шуму в докритичних реакторах ВВЕР може розглядатися як необхідне фізичне підґрунтя та засаднича передумова для розробки діагностичних підходів та створення методології оперативної превентивної діагностики діючих та перспективних ВО ЯР.

З урахуванням конкретизованих вище діагностичних завдань, що підлягають реалізації в реакторах ВВЕР докритичного та надкритичного термодинамічних діапазонів АкЗ, доцільним є системний аналіз отриманих на теперішній час експериментальних результатів, а також систематизація інформаційних характеристик нейтронного шуму. Розгляд цих актуальних наукових питань наведено в наступних розділах цієї публікації.

Аналіз інформаційних характеристик спектральних параметрів одномірних сигналів нейтронного шуму

Відповідно до даних роботи [4] слід відзначити:

1. Визначальні ймовірнісні характеристики акустичного та нейтронного шуму в АкЗ енергетичних ВО ЯР відповідно до умов генерації парової фази на поверхні ТВЕЛ є подібними. Зокрема, це стосується стаціонарного характеру цих діагностичних сигналів в умовах сталості режимних параметрів процесу теплообміну, а також широкополосної структури та близької до рівномірної спектральної густини.

2. Частотний діапазон, а також особливості й характер спектрального складу автоспектральної густини (АСГ) нейтронного шуму як стаціонарного випадкового процесу в цілому є подібними до відповідних характеристик акустичних сигналів у киплячому теплоносії. Параметри функцій просторової когерентності акустичних і нейтронних двомірних шумових сигналів у ТВЗ містять важливу діагностичну інформацію щодо характеру фазового переходу на поверхні ТВЕЛ. Врахування даних фазового спектра двомірного діагностичного сигналу, що сформований відповідними парами одномірних сигналів де-

текторів прямого заряду (ДПЗ), що встановлені в каналах нейтронних вимірювань (КНВ) АкЗ реакторів ВВЕР, дає змогу забезпечити триангуляційну діагностику ТВЗ, тобто ідентифікувати тип теплогідрравлічної аномалії на відповідній ділянці нейтронного вимірювального каналу.

3. Ознаковий діагностичний простір, що сформований на основі параметрів когерентної спектральної густини (КСГ) двомірного акустичного або нейтронного сигналу, містить важливу діагностичну інформацію про структурні характеристики двофазного потоку на ділянці, що обмежена парами ДПЗ, які утворюють лінійну просторову структуру. Фізичний взаємозв'язок між параметрами КСГ, вимірними на відповідній ділянці КНВ, та режимом плин парорідного потоку в ТВЗ між цими парами нейтронних детекторів має ймовірнісний характер.

4. Наявність фізично зумовленого ймовірнісного взаємозв'язку між параметрами КСГ двомірних діагностичних сигналів у РУ водо-водяного типу створює принципову основу для можливості ідентифікації областей локалізації аномальних і аварійних режимів тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в об'ємі АкЗ реактора ВВЕР.

Враховуючи вищеперелічені фізико-математичні аспекти, що їх обґрунтовано в роботі [4], слід звернути увагу на відомі результати досліджень спектральної структури одно- та двомірних сигналів нейтронного потоку в АкЗ ВО ЯР. Показовою в цьому діагностичному контексті є, зокрема, робота [11], яка відображає типові підходи до якісної оцінки стану АкЗ ВО ЯР на основі попереднього моніторингу та подальшого евристичного аналізу результатів вимірювань. Типові результати цих досліджень наведено на рис. 1 з роботи [11].

Подібні якісні підходи використовували також інші автори наступних за хронологією досліджень, які також обмежувались якісним описом зміни спектральної структури АСГ і КСГ нейтронного шуму в умовах перебігу теплогідрравлічних режимів в експериментальній ТВЗ ЯР. Показово, що в кожній із цих робіт для аналізу спектральної структури діагностичних сигналів використовувався детермінований підхід, що передбачає граничні рівні спектральної інтенсивності в певних частотних діапазонах АСГ або КСГ. Безумовно, надійність діагностичних рішень на основі такого спрощеного підходу була неприйнятно низькою. Неefективність подібного детермінованого підходу до ідентифікації стохастичних діагностичних сигналів є очевидною для спеціалістів [12, 13 та ін.]. Проте, незважаючи на всебічне теоретичне обґрун-

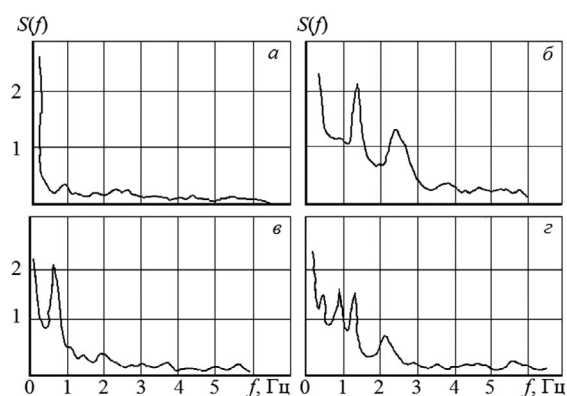


Рис. 1. Характер частотної структури АСГ нейтронного шуму в дослідницькому ЯР ВВР-СМ у різних теплогідрравлічних режимах АкЗ: режим конвективної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ в умовах вільної (а) та примусової (б) циркуляції теплоносія; режим поверхневого кипіння у ТВЗ в умовах вільної (в) та примусової (г) циркуляції [11]

тування неспроможності детермінованих вирішальних правил для вирішення завдань автоматичної класифікації випадкових об'єктів, спроби застосування цих правил не припинялися й у наступні роки (відповідна бібліографія наведена в [4]). Так, наприклад, у роботі [14] відзначається, що «при значному збільшенні середньоквадратичних флуктуацій температури і збереженні високої когерентності між сигналами нейтронного потоку на вході й виході з АкЗ можна стверджувати про наявність кипіння з недогрівом». Суб'єктивізм та низька ефективність таких якісних описів у проектній документації для перспективної діагностичної системи АкЗ ВВЕР є очевидною.

Неадекватність таких суттєво спрощених (фактично детермінованих) вирішальних правил, у яких використовуються граничні рівні дисперсії діагностичного сигналу або рівні інтенсивності певної множини його спектральних ознак, як це реалізовано, наприклад, у [15], є характерною рисою для більшості наступних досліджень. Висновок авторів [14] про те, що «збереження високої когерентності між сигналами нейтронного потоку на вході й виході з АкЗ свідчать про наявність кипіння з недогрівом» також не можна визнати обґрунтованим, оскільки це твердження суперечить висновкам відомих робіт, наприклад, [16]. Так, із використанням моделі ідентифікації режимів кипіння на основі «спостереження за частотою акустичних стоячих хвиль» на основі підходів, запропонованих раніше в роботі [17], авторами [14] було зроблено невдалу спробу практичної реалізації цієї моделі. Такий результат слід вважати очікуваним,

оскільки в роботі [1] уже була обґрунтована фізична неадекватність такого підходу до класифікації теплогідравлічних режимів парогенеруючого каналу.

У контексті аналізу інформативності спектральних характеристик нейтронного шуму в АкЗ, тобто параметрів АСГ і КСГ, що мають розглядатися як діагностичні ознаки, треба звернути увагу на наступний методичний недолік, який притаманний переважній більшості досліджень в області нейтронношумової діагностики теплогідравлічних режимів ЯР. У цьому разі мова йде, у першу чергу, про відсутність у відомих роботах температурного контролю ТВЗ ЯР, що в більшості випадків практично не дало можливості класифікувати зареєстровані в експериментах АСГ і КСГ нейтронного шуму відповідно до характерних ділянок температурних режимів поверхні тепловіддачі ТВЕЛ у процесі підвищення потужності АкЗ. Такий методичний недолік зумовлює значну невизначеність фактичних меж теплогідравлічних режимів в експериментальному каналі. Так, зокрема, у переважній більшості досліджень перехід до режиму початку кипіння в ТВЗ дослідницьких ЯР визначався за непрямими ознаками, через що експертна оцінка моменту переходу до початку генерації парової фази в АкЗ була суто суб'єктивною. З огляду на ці методичні вимоги слід зазначити таке. Імовірнісний, тобто фізично нечіткий характер меж, що існують між теплогідравлічними режимами в реакторному каналі, а також суб'єктивний характер експертних оцінок під час визначення спектральних образів кожного з типів теплогідравлічних аномалій унеможливають застосування не тільки детермінованих підходів до класифікації теплогідравлічних режимів, але також суттєво знецінюють суб'єктивну оцінку розташування фізичних меж між цими режимами. З урахуванням очевидних технічних труднощів, що є притаманними всім фізичним експериментам з термометрією поверхні реальних ТВЕЛ в АкЗ ЯР, надійні експериментальні дані щодо термометрії цих поверхонь в експериментальній ТВЗ реактора ВВЕР-440 було отримано тільки в роботі [18].

Показово, що аналіз частотної структури АСГ у режимі конвективної тепловіддачі та при пузирковому кипінні теплоносія за даними [11, 18] свідчать про високу інформативність спектральних ознак нейтронного шуму, також про принципову можливість розпізнавання пузиркового режиму плинну двофазного потоку у ТВЗ ЯР по параметрах АСГ сигналів ДПЗ. У той же час ніяких конкретних рекомендацій щодо розробки алгоритмів автоматичної класифіка-

ції теплогідравлічних режимів ТВЗ за параметрами нейтронного шуму у ВО ЯР автори наявних у відкритому доступі публікацій не надають. Проте на основі наявних експериментальних даних можна зробити важливий практичний висновок. Зміна частотної структури сигналів ДПЗ реактора ВВЕР, що реєструється під час переходу відповідної ділянки ТВЗ від конвективної тепловіддачі до процесу генерації парової фази, має у своїй основі зумовлене фазовим переходом локальне збурення термалізаційних властивостей уповільнювача, яке безпосередньо обумовлює зміну спектра енергії нейтронів, що дифундують у цьому об'ємі АкЗ. Наведені далі результати досліджень спектральних параметрів КСГ підтверджують цей висновок.

Аналіз інформаційних характеристик спектральних параметрів двомірних сигналів нейтронного шуму

На відміну від режимних параметрів процесу тепловіддачі (тиску, масової швидкості та недогріву теплоносія) істотно більший вплив на спектральні характеристики нейтронного шуму має місце розташування детектора нейтронного потоку: усередині АкЗ або поза нею. Ілюстрацією цієї тези може бути рис. 2, наведений за даними роботи [11], на якому подано результати синхронної реєстрації АСГ флуктуацій нейтронного потоку у ВО ЯР типу PWR під час використання нейтронного детектора типу ДПЗ, а також під час вимірювань нейтронного шуму позазонними іонізаційними камерами.

Як свідчать ці результати, детектори типу ДПЗ, що розташовані безпосередньо в об'ємі АкЗ, дозволяють виявити важливі особливості структури спектрів флуктуацій нейтронного потоку, які при застосуванні позазонних сенсорів принципово не можуть бути виявлені. Представлені для порівняння на рис. 3 за даними [18] КСГ сигналів внутрішньозонних ДПЗ (а, б, в), а також іонізаційних камер (г), що їх було встановлено поза корпусом реактора, підтверджують цей висновок.

У цьому контексті необхідно також звернути увагу на параметри КСГ двомірного сигналу нейтронного шуму, що може бути сформований на основі використання штатних вимірювальних засобів, утворених парами сигналів суміжних ДПЗ саме в цьому КНВ. Як свідчать ці дані, поява парової фази на контрольованій ділянці ТВЗ, яка оснащена КНВ, що утворює лінійну просторову структуру ДПЗ, зумовлює відповідну трансформацію частотної структури КСГ.

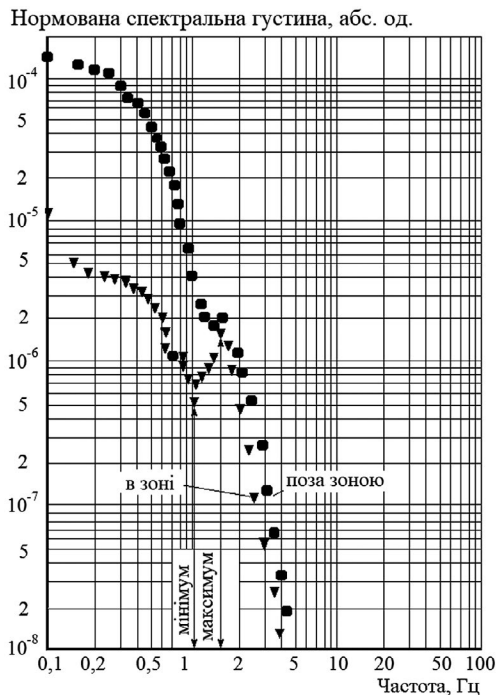


Рис. 2. Результати синхронної реєстрації АСГ флуктуацій нейтронного потоку в ЯР типу PWR при використанні внутрішньозонного нейтронного детектора та при вимірюванні нейтронного шуму поза корпусом ЯР [11]

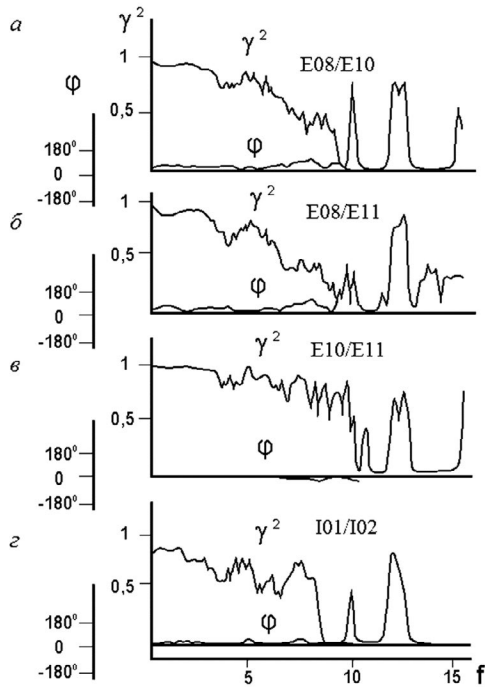


Рис. 3. Когерентний (γ^2) і фазовий (ϕ) спектри двовірних діагностичних сигналів в експериментальній ТВЗ реактора ВВЕР-440 в конвективному режимі тепловіддачі для двовірних діагностичних сигналів, сформованих виходами: а) ДПЗ E08 і E10; б) ДПЗ E08 і E 11; в) ДПЗ E10 і E11; г) іонізаційних камер I01 та I02 [18]

Остання принципово може бути виявлена на основі відповідного алгоритму ідентифікації цих спектральних образів. З огляду на такий фізичний зв'язок важливим видається аналіз частотної структури КСГ двовірного нейтронношумового сигналу, що сформований виходами суміжних сенсорів ДПЗ у КНВ у режимі конвективної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ у процесі експлуатації реактора ВВЕР-440. Ці експериментальні результати, що представлені реалізаціями АСГ та КСГ, обчисленими з аналогових виходів ДПЗ реактора ВВЕР-440, представлено на рис. 4 за даними роботи [19]. Проте слід зазначити, що систематичні дослідження параметрів функції просторової когерентності в ТВЗ реакторів типу ВВЕР за умови забезпечення термометрії поверхні ТВЕЛ у жодному з відомих досліджень (за винятком роботи [4], дані якої наведено далі) до цього часу не були виконані.

На рис. 5, за даними роботи [11], представлено результати реєстрації АСГ нейтронного шуму в дослідницькому ВО ЯР в умовах появи механічного ушкодження органу регулювання, що спричинило зміну вібраційного стану цього структурного еле-

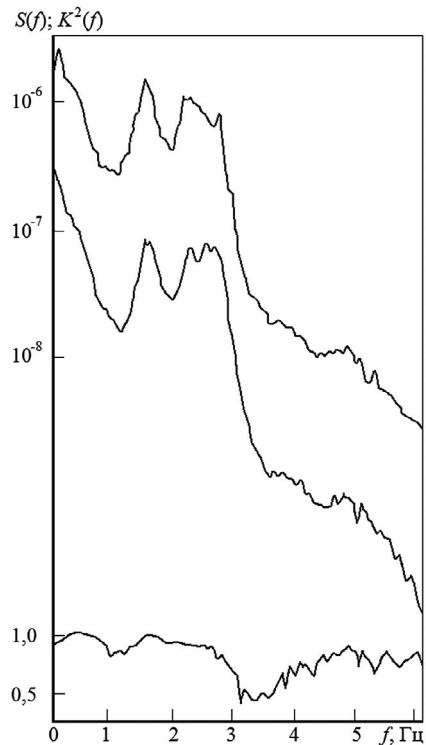


Рис. 4. Характер частотної структури АСГ і КСГ нейтронного шуму, зареєстрованого в АкЗ ВВЕР-440 на номінальному рівні його потужності (одно- та двовірний діагностичний сигнали сформовані виходами двох ДПЗ, відстань між якими становить 800 мм) [19]

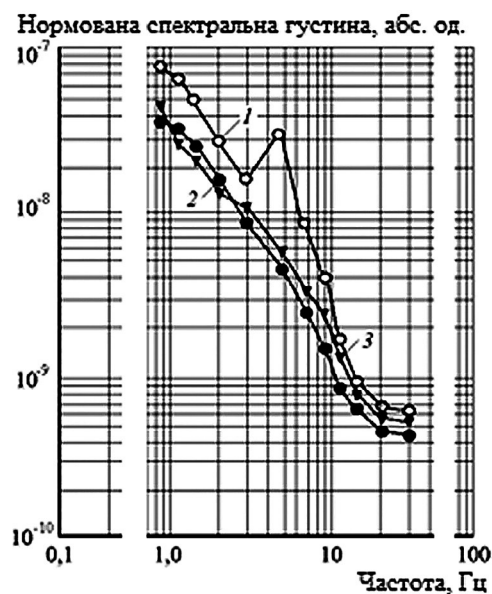


Рис. 5. Типові результати вимірювань АСГ нейтронного шуму в дослідницькому водо-водяному ЯР з появою механічного дефекту в його органі регулювання: 1 — при обірваній тязі одного керуючого стрижня; 2 — після ремонту; 3 — перед появою дефекту [11]

мента РУ. Зіставлення АСГ нейтронного шуму, зареєстрованої в цих вимірюваннях, зі структурою спектрів флуктуацій нейтронного потоку в режимі пухиркового кипіння в реакторі такого ж типу на рис. 1, в за даними роботи [11], а також на рис. 6, а для дисперсно-кільцевої структури плинину в каналі водо-водяного дослідницького ЯР [11] свідчить про те, що спектральні діапазони вібраційних процесів в АкЗ і процесів, пов'язаних із генерацією пари в каналах ЯР (див. рис. 1, в і рис. 6, а) істотно відрізняються, причому спектральні компоненти, обумовлені фазовим переходом у теплоносії, є більше низькочастотними.

Наведені на рис. 6 і 7 за даними роботи [11] експериментальні результати, що включають спектрограми сигналів ДПЗ в експериментальному каналі водо-водяного дослідницького реактора МТР, а також осцилограми сигналів ДПЗ в умовах плинину в цьому дослідницькому каналі основних типів парорідинних структур являють собою особливий інтерес, оскільки вперше отримані для області високих паровмістів. Спектрограма на рис. 6, а відповідає сигналу верхнього із групи ідентичних нейтронних детекторів однієї вимірювальної збірки КНВ. Показово, що ці вимірювання виконано у верхній частині парогенеруючого експериментального каналу, в якій досягаються паровмісти, що відповідають дисперсно-кільцевій структурі двофазного потоку.

Важливим є те, що наведені на рис. 7 осцилограми відображають сигнали ДПЗ, зареєстровані на виходах КНВ в умовах існування в реакторному каналі ВО ЯР різних типів парорідинних структур. Так, на рис. 7, б чітко виражені періоди снарядних структур, що рухаються в ТВЗ (вони добре корелюють з відомими характеристиками цього специфічного режиму плинину двофазного потоку). Визначальні фізичні особливості цього та інших режимів плинину наведено в монографії [2]. Але в роботі [11], попри наявний у ній представницький експериментальний матеріал, жодних підходів до об'єктивної кількісної класифікації сигналів ДПЗ, що були зареєстровані авторами цієї роботи в експериментальному каналі дослідницького ВО ЯР, не було запропоновано. Типовим для якісних описів зміни звичайно одного статистичного параметра (наприклад, дисперсії сигналу) з роботи [11] є, зокрема, такий: «...в пухирковому режимі плинину дисперсія сигналу нейтронного шуму зменшується, причому при переході до снарядної структури вона зростає і має тенденцію до наступного зростання в дисперсно-кільцевому режимі плинину теплоносія». Очевидно, що якісні описи такого характеру не можуть бути практично використані як основа для надійного розпізнавання реалізацій нейтронного шуму, що зареєстровані у ВО ЯР. А втім порівняння структури та частотних параметрів осцилограм сигналів внутрішньозонних нейтронних детекторів у режимах початку кипіння (див. рис. 7, г), а також конвективної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ (див. рис. 7, д), які були отримані в [11] за допомогою безінерційних ДПЗ комптонівського типу, з осцилограмами сигналів акустичного шуму в парогенеруючих каналах, що наведені в роботах [2, 4], свідчить про універсальний характер фізики генерації парової фази, що реєструється акустичними та нейтронними сенсорами. Ця універсальність свідчить не тільки про принципову можливість розпізнавання режиму початку кипіння в каналах ЯР за параметрами нейтронного шуму, але також і про відому єдність фізичних проявів процесу фазового переходу на поверхні ТВЕЛ у сигналах різних типів діагностичних систем, заснованих на різних принципах — акустичних і нейтронних.

Цей висновок підтверджують також дані роботи [11] щодо частотної структури АСГ і КСГ нейтронного шуму в дисперсно-кільцевому режимі плинину, що представлені на рис. 6. Порівняння спектрального складу КСГ нейтронно-шумових сигналів для цієї структурної форми двофазного потоку (рис. 6, б) з

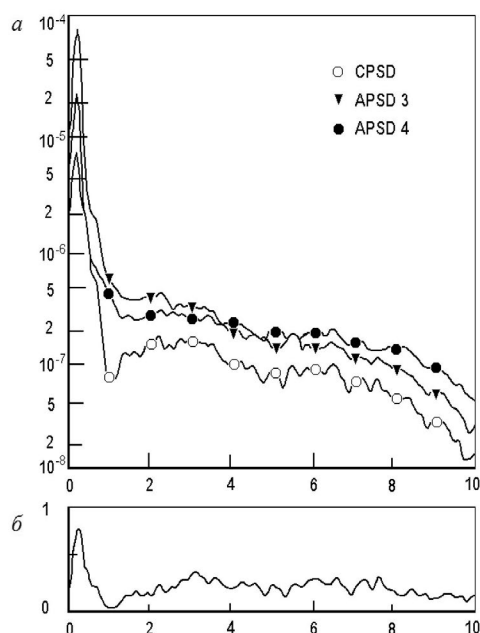


Рис. 6. Характер частотної структури: а) авто- (APSD) та взаємоспектральної (CPSD) густини сигналів ДПЗ № 3 ($z = 500$ мм) і № 4 ($z = 600$ мм) у киплячому каналі реактора МТР; б) когерентної спектральної густини двовірного сигналу від ДПЗ № 3 і № 4 за даними [11]

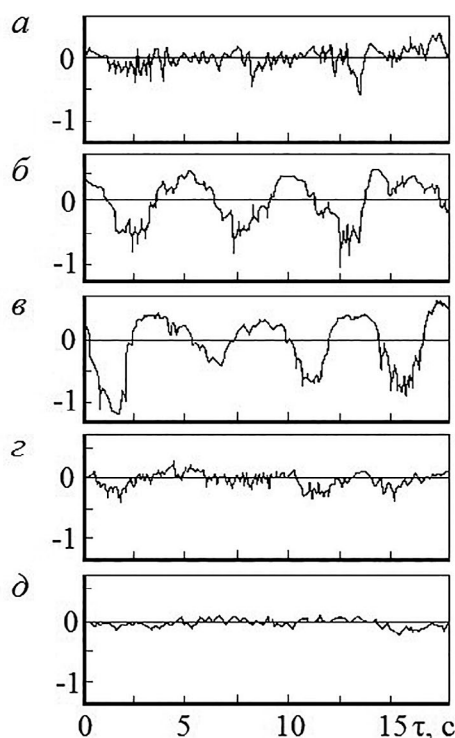


Рис. 7. Результати синхронної реєстрації сигналів ДПЗ, розташованих у киплячому каналі дослідницького водо-водяного реактора МТР з аксіальними (від входу) координатами Z: а) 600 мм; б) 500 мм; в) 400 мм; г) 300 мм; д) 100 мм за даними [11]

даними монографії [2] щодо АСГ акустичного шуму в області паровмістів, відповідних дисперсно-кільцевому режиму плинну, свідчить про те, що різке зниження (зрив функції) когерентності в КСГ двовірних діагностичних сигналів слід очікувати саме в області інфранизких частот.

Підтверджують зазначений висновок щодо характерних змін частотної структури функції просторової когерентності двовимірних сигналів нейтронного шуму в киплячому каналі при збільшенні паровмісту двофазного потоку у процесі переходу від початку кипіння на поверхні ТВЕЛ до пухиркового, снарядного й дисперсно-кільцевого режимів плинну результати експериментів [18], представлені на рис. 3, в. Наведена на цій ілюстрації функція просторової когерентності нейтронного шуму відповідає конвективному режиму тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ і є обчисленою за результатами вимірювань двовірного діагностичного сигналу, який сформований парою суміжних ДПЗ одного КНВ з нейтронних детекторів, розташованих на відстані $l = 0,4$ м у верхній частині каркасної труби експериментальної термометричної ТВЗ реактора ВВЕР-440. Спектральна структура КСГ нейтронного шуму, представлена на рис. 3, в, а також дані аналогічних вимірювань, виконаних у [19] для конвективного режиму тепловіддачі у ТВЗ ВВЕР-440 (див. рис. 4), свідчать про те, що частота зриву когерентності за відсутності кипіння на поверхні ТВЕЛ відповідає більш високочастотному, ніж для дисперсно-кільцевої структури (див. рис. 7, б), діапазону. Таким чином, представлений вище системний аналіз відомих експериментальних даних свідчить про наявність фізичного ефекту зниження частоти зриву когерентності в КСГ нейтронного шуму у процесі переходу теплогідралічних режимів у ТВЗ ЯР до структурних форм двофазного потоку, що відзначаються підвищеними значеннями паровмісту.

Представлена на рис. 8 за даними роботи [16] типова АСГ нейтронного шуму, що була зареєстрована штатним ДПЗ реактора ВВЕР-1000 в режимі конвективної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ цього ЯР в умовах номінального рівня його теплової потужності, за своєю спектральною структурою є подібною до наведених вище спектрів сигналів ДПЗ в АкЗ менших реакторів. Детальний аналіз спектральної структури сигналів ДПЗ ВО ЯР наведено в роботах [4, 20].

З огляду на представлені вище експериментальні дані та результати їхнього узагальненого аналізу в [4, 20], насамперед, має бути відзначена

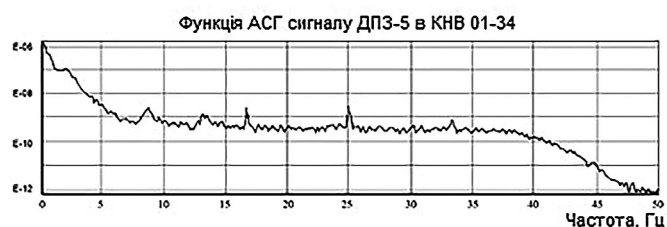


Рис. 8. Типова АСГ сигналу ДПЗ у режимі конвективної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ у ТВЗ ВВЕР-1000 на номінальному рівні потужності [16]

нижченаведена фізична особливість формування ознакового простору двомірних діагностичних сигналів із лінійних просторових структур ДПЗ у КНВ, а саме: а) різні комбінації пар ДПЗ у межах одного КНВ мають суттєво відмінну інформаційну цінність; б) не всі пари нейтронних сенсорів можуть бути використані для формування інформаційно значущих двомірних сигналів; в) лише інформативні (тобто фізично адекватні процесу генерації парової фази та формуванню відповідних типів двофазних структур уздовж аксіальних координат ТВЗ) пари ДПЗ із конкретних КНВ можуть розглядатися як діагностичні сенсори, сигнали яких мають бути покладені в основу формування представницьких статистичних масивів даних для обчислення КСГ основних класів теплогідралічних аномалій у ТВЗ ВО ЯР. Як таку типову малоінформативну пару комбінацій сенсорів РУ на рис. 9 за даними роботи [16] представлено КСГ двомірного діагностичного сигналу, сформованого виходами іонізаційної камери реактора ВВЕР-1000 та сенсора динамічного тиску, встановленого на напорі циркуляційного насосу ГЦН-195М. Показово, що спектральна структура КСГ цього двомірного сигналу практично не змінюється при виникненні в АкЗ початку генерації парової фази та інших видів теплогідралічних аномалій.

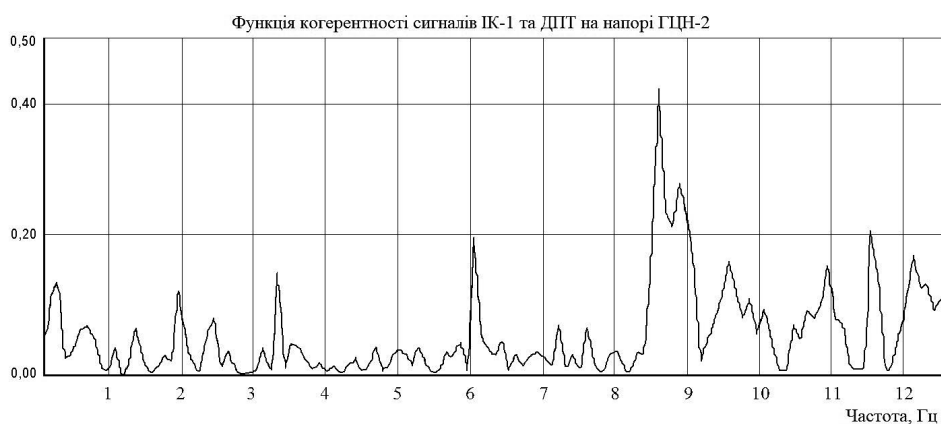


Рис. 9. Типова КСГ двомірного діагностичного сигналу, сформованого виходами іонізаційної камери реактора ВВЕР-1000 і сенсора динамічного тиску на напорі ГЦН (рівень потужності номінальний) [16]

За даними вищезазначеної роботи [16], на рис. 10 наведено реалізацію фазового спектра двомірного сигналу нейтронного шуму, що зареєстрований між парою нейтронних детекторів (ДПЗ № 1 та № 7 у ТВЗ № 09–22) реактора ВВЕР-1000 на номінальному рівні його теплової потужності. Показово, що збільшення теплового навантаження ТВЗ в умовах подальшого форсування теплової потужності реактора практично не змінило структуру фазового спектра, наведеного на рисунку. Відсутність такої зміни у фазовому спектрі двомірного діагностичного сигналу свідчить про низьку інформативність цього типу спектрального перетворення двомірного діагностичного сигналу або про його невідповідну вимірювальну базу для виявлення аномалій теплогідралічного характеру. Так, наприклад, під час вирішення завдань ідентифікації цих аномалій використана в роботі [16] вимірювальна база (тобто відрізок розташування суміжних нейтронних детекторів в КНВ), а саме — у кінцевих точках усього вимірювального каналу — проявила себе як завелика для забезпечення достатньої роздільної спроможності такої двомірної просторової структури при виявленні двофазних парорідинних утворень у ТВЗ. У той же час, як свідчать дані роботи [19], наведені на рис. 4, зменшення базової відстані між нейтронними детекторами КНВ (від 1 200 мм на рис. 4, б до 400 мм на рис. 4, в) дало змогу надійно ідентифікувати область локалізації відповідного типу теплогідралічної аномалії при зменшенні довжини цієї міждетекторної бази.

У контексті аналізу сучасних підходів до ідентифікації теплогідралічних аномалій у ТВЗ реактора ВВЕР-1000 за параметрами нейтронного шуму видається за необхідне розглянути модель шумової діагностики АкЗ з роботи [16]. Розглянуте в ній вирішальне правило слід вважати типовим. Воно, як і інші подібні підходи, є детермінованим за своєю ма-

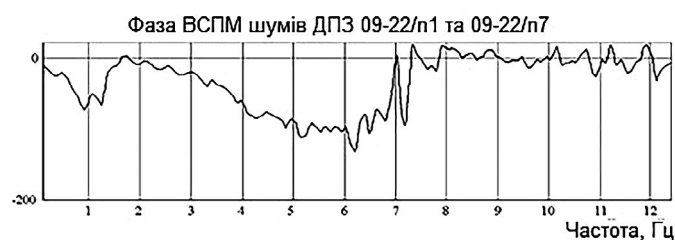


Рис. 10. Фазовий спектр двомірного діагностичного сигналу, сформованого виходами ДПЗ № 1 і ДПЗ № 7 у ТВЗ № 09–22 реактора ВВЕР-1000 на номінальному рівні потужності за даними [16]

тематичною суттю, яка не може вважатися адекватною з огляду на статистичну природу діагностичних сигналів нейтронного шуму, що підлягають автоматичній ідентифікації. Визначальним є те, що саме такі, детерміновані за своєю суттю алгоритми, реалізовано на теперішній час у переважній більшості найбільш сучасних технічних засобів оперативної діагностики обладнання АЕС. Показово, що сутність підходу роботи [16] полягає в обчисленні для двомірного сигналу нейтронного шуму, який сформовано сигналами ДПЗ штатного КНВ у ТВЗ «параметра регресії Q ». Останній є за своєю математичною суттю множинним коефіцієнтом кореляції R^2 . Відповідно до вирішуваного завдання виявлення процесу кипіння теплоносія в ТВЗ, у роботі [16] запропоновано контролювати ступінь лінійності та фазу сигналу у фіксованому спектральному діапазоні фазового спектра двомірної статистичної послідовності, що надходить після цифрового перетворення з виходів ДПЗ.

На думку авторів [16], ступінь лінійності фазового спектра такого двомірного діагностичного сигналу може бути мірою дисперсійно-дисипативних властивостей потоку теплоносія між двома суміжними нейтронними детекторами. У цьому зв'язку слід зазначити, що при аналізі умов бездисперсійного поширення широкополосного акустичного шуму від зовнішнього джерела на ділянці провідного середовища між двома акустичними сенсорами в теоретичних засадах прикладної акустики [2] показано, що зниження ступеня лінійності ділянки фазового спектра в певному його спектральному діапазоні зумовлено дисперсією широкополосного шуму на неоднорідностях середовища по шляху його поширення між цими акустичними сенсорами, виходи яких формують відповідний двомірний сигнал. Стосовно до завдання виявлення пазиркової структури пароводяного потоку в ТВЗ водо-водяного ЯР подібний ефект зниження ступеня лінійності фазового спектра в спектральному діапазоні $\Delta f = 1 \dots 4$ Гц

має у своїй основі зміну енергетичних характеристик термалізованих нейтронів у процесі їхньої взаємодії з паровими об'ємами як фазовими неоднорідностями потоку теплоносія. При цьому множинний коефіцієнт кореляції обчислюється в [16] на основі таких параметрів статистичної вибірки, як значення \hat{Y}_i випадкової змінної Y_i з математичним очікуванням \bar{Y} , які розраховуються на основі рівняння регресії, отриманого для цієї випадкової послідовності.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Отже, параметр R^2 , який використовується під час формування цього вирішального правила в [16], характеризує лише загальний розкид даних щодо їх математичного очікування \bar{Y} , причому більшому значенню R^2 відповідає і більша дисперсія даних. Наприклад, у діагностичній системі KARD, що розглянута в [16], спектральний діапазон ділянки фазового спектра (див. рис. 10), значення оцінок якого формують статистичну вибірку, відповідає частотній смузі $\Delta f = 1 \dots 4$ Гц. При оцінці ефективності розглянутого діагностичного алгоритму слід звернути увагу на тип вирішального правила, який запропоновано використовувати в [16]. При $R^2 = 0,9$ приймається рішення про наявність значного кипіння в ТВЗ, а у випадках $R^2 \leq 0,9$ вважається, що кипіння в каналі реактора є відсутнім. Таким чином, запропоноване в [16] вирішальне правило варто розглядати як правило детермінованого типу, оскільки воно фактично не дозволяє врахувати реальні ймовірнісні характеристики багатовимірного спектрального ознакового простору діагностичного сигналу, оскільки заміняє його граничними рівнями тільки одного статистичного параметра — множинного коефіцієнта кореляції R^2 . Слід зазначити, що спроба використання детермінованих вирішальних правил, що сформовані на основі зменшення числа використовуваних під час аналізу діагностичних ознак на основі заміни багатовимірного ознакового простору одним «узагальненим» параметром, є типовою і характерна для багатьох інших діагностичних систем, проаналізованих у монографіях [10, 20]. Показово, що автори цих достатньо сучасних розробок [16 та ін.] практично не враховують той факт, що наслідком зменшення мірності простору діагностичних ознак, що використовуються під час ідентифікації випадкових об'єктів, є різке зменшення надійності автоматичної класифікації цих об'єктів. Показово також, що набутий досвід дослідної експлуатації системи KARD, яка серед іншо-

го мала забезпечувати ідентифікацію початку кипіння в ТВЗ реактора ВВЕР-1000 на основі розглянутого вище вирішального правила [16], підтвердив непринятно низьку надійність такого підходу.

Представлені вище результати аналізу інформаційної значущості двомірних сигналів нейтронного шуму дали змогу зробити практичні висновки:

а) підходи до триангуляційної діагностики областей локалізації теплогідравлічних аномалій в АкЗ ВВЕР мають передбачати використання діагностичних ознак, сформованих на основі параметрів функції КСГ;

б) статистичні масиви, що складають основу для обчислення параметрів функції КСГ, мають бути сформовані на основі реальних вимірювань двомірних нейтронношумових сигналів суміжних пар ДПЗ у кожному з КНВ АкЗ ВВЕР;

в) автоматичне формування діагностичних рішень щодо визначення приналежності обчислених параметрів функції КСГ відповідно до кожної з суміжних пар ДПЗ КНВ штатної СВРК ВВЕР може бути забезпечене на основі реалізації запропонованих у [4] алгоритмів комп'ютерної побудови в N -мірному просторі діагностичних ознак розділяючої гіперплощини, що дає змогу оперативно ідентифікувати невідомий діагностичний об'єкт;

г) результатом діагностики має бути автоматично сформоване рішення щодо наявності теплогідравлічної аномалії того чи іншого типу між відповідними парами сенсорів ДПЗ у кожному з КНВ системи СВРК ВВЕР.

Практична реалізація вищезазначеної діагностичної концепції зумовила необхідність виконання реакторних експериментів з комплексним вимірюванням температурних режимів ТВЕЛ ЯР ВВЕР-440 та синхронною реєстрацією одно- та двомірних діагностичних сигналів нейтронного шуму в АкЗ цього реактора. Зазначені результати наведено з роботи [4].

Результати комплексного дослідження теплових та нейтронно-фізичних параметрів реальної ТВЗ реактора ВВЕР-440

За результатами аналізу інформаційних особливостей спектральних параметрів нейтронного шуму в реакторах водо-водяного типу необхідно підкреслити:

1) нечіткий характер меж між окремими класами теплогідравлічних процесів, які реалізуються на поверхні тепловіддачі ТВЕЛ (такими, наприклад, є межі між режимами конвективної тепловіддачі та початком кипіння, а також іншими класами струк-

турних форм двофазного парорідинного потоку), обумовлений не тільки ймовірнісною природою процесу генерації парової фази при кипінні та, крім того, стохастичним характером гідродинаміки й теплообміну в ТВЗ, але також і суб'єктивним характером оцінки меж між теплогідравлічними режимами і неповнотою сучасних знань щодо них;

2) зміна частотної структури сигналів внутрішньозонних електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів, що реєструється при переході відповідної ділянки ТВЗ реактора ВВЕР від конвективної тепловіддачі до кипіння, є обумовленою локальною зміною термалізаційних властивостей уповільнювача у тій частині поверхні ТВЗ, на якій почалася генерація парової фази;

3) вплив режимних параметрів процесу теплообміну, особливо тиску, масової швидкості, недогріву теплоносія на спектральні характеристики нейтронного шуму в АкЗ реактора ВВЕР в умовах генерації парової фази на поверхні тепловіддачі ТВЕЛ проявляє себе істотно менше, ніж вплив цих параметрів на структуру АСГ акустичного шуму процесу кипіння;

4) на відміну від режимних параметрів процесу теплообміну істотно більший вплив на спектральну структуру сигналів нейтронного шуму в реакторах водо-водяного типу має місце розташування детектора нейтронного потоку в об'ємі АкЗ;

5) механічна вібрація внутрішньокорпусних елементів реактора ВВЕР обумовлює трансформацію спектральної структури АСГ сигналів внутрішньозонних детекторів нейтронного потоку типу ДПЗ у тих частотних діапазонах цих спектрів, які істотно відрізняються від ділянок локалізації спектральних компонентів, обумовлених процесом генерації парової фази на поверхні тепловіддачі ТВЕЛ;

6) послідовне зменшення частоти різкого зниження (зриву) когерентності у структурі КСГ двомірного сигналу нейтронного шуму, який сформований відповідними парами виходів електронно-емісійних детекторів потоку нейтронів, розташованих у конструктиві КНВ з різними аксіальними координатами по висоті контрольованої ТВЗ, обумовлено переходом теплогідравлічних режимів цього реакторного каналу до структурних форм двофазного парорідинного потоку з високими рівнями паровмісту;

7) формування окремих спектральних діапазонів АСГ нейтронного шуму, що реєструється в АкЗ реактора ВВЕР, пов'язано з конкретними видами нейтронно-фізичних процесів, що реалізуються в реакторах цього типу, а саме:

а) частотний діапазон $\Delta f = 7\text{--}60$ Гц обумовлений, головним чином, процесами термалізації нейтронів, що відбуваються в уповільнювачі;

б) спектральна смуга $\Delta f = 0,05\text{--}1,0$ Гц може розглядатися як інформативна щодо протікання ТГП в АкЗ ВО ЯР.

8) у жодному з відомих досліджень, що були виконані за останні роки в напрямі нейтронношумової діагностики РУ, реальна термометрія ТВЗ безпосередньо в АкЗ ВО ЯР не виконувалась (експериментальні складнощі виконання таких вимірювань очевидні).

З огляду на вищезазначене, доцільним є розгляд результатів натурних експериментів з роботи [4], особливо в тій їхній частині, що стосується оцінки характеру взаємозв'язку параметрів нейтронного шуму в АкЗ реакторів ВВЕР безпосередньо з процесом генерації парової фази на поверхні тепловіддачі ТВЕЛ. На рис. 11, а представлено схему розміщення родієвих ДПЗ в експериментальній термометричній ТВЗ реактора ВВЕР-440, яка використовувалась у програмі міжнародного експерименту на АЕС «Райнсберг» (Німеччина). У цих експериментах та обробці їхніх результатів, що виконувалась із використанням алгоритмів з роботи [4], було передбачено синхронну реєстрацію температури поверхонь тепловіддачі ТВЕЛ разом з вимірюваннями флуктуацій нейтронного потоку поздовжньо розподіленою структурою із семи ДПЗ у складі КНВ.

Відповідно до даних роботи [4] на рис. 12 наведено результати вимірювань температурних режимів поверхні ТВЕЛ по висоті експериментальної ТВЗ реактора ВВЕР-440 в режимах конвективної тепловіддачі, а також початку генерації парової фази та розвиненого пухиркового кипіння в деяких характерних експериментах.

У свою чергу на рис. 13 наведено результати синхронної реєстрації АСГ нейтронного шуму в експериментальній термометричній ТВЗ відповідно до експериментів А, Б, В, температурні режими яких позначені на рис. 12.

Відповідно до цих одномірних вимірювань результати обчислення АСГ нейтронного шуму, що отримані в експериментальному КНВ (див. рис. 11) між суміжними парами ДПЗ і формують відповідні двомірні діагностичні сигнали, представлено на рис. 14.

Дані фізичного аналізу та результати експериментальних досліджень інформаційної значущості параметрів нейтронного шуму в АкЗ водо-водяного ЯР, що були виконані на АЕС «Райнсберг», дозволяють відзначити:

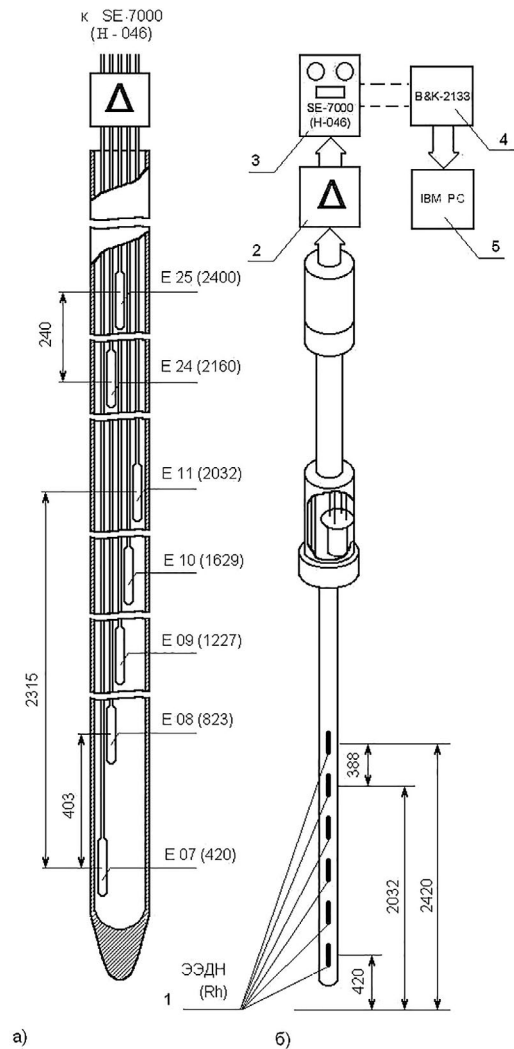


Рис. 11. Принципові схеми: а) схема розміщення родієвих ДПЗ у центральній каркасній трубі експериментальної ТВЗ; б) схема реєстрації нейтронного шуму. 1 — родієві ДПЗ; 2 — вимірювальний комплекс МИК розробки РНЦ «Курчатівський інститут»; 3 — багатоканальний магнітограф SE-7000 або Н-046; 4 — цифровий спектроаналізатор Bruel&Kjaer, тип 2133; 5 — комп'ютер

1) флуктуації нейтронного потоку в АкЗ реактора ВВЕР є зумовленими не тільки стохастичною природою нейтронно-фізичних процесів, вібраціями його внутрішньокорпусних елементів та іншими фізичними чинниками, але є також безпосередньо пов'язаними з коливаннями термалізаційних властивостей уповільнювача внаслідок можливого переходу до процесу кипіння теплоносія на поверхні ТВЕЛ у нештатних режимах експлуатації РУ цього типу;

2) зв'язок між окремими інформаційно значущими спектральними діапазонами АСГ та КСГ нейтронного шуму на виході ДПЗ реактора ВВЕР і конкретними фізичними чинниками, що зумов-

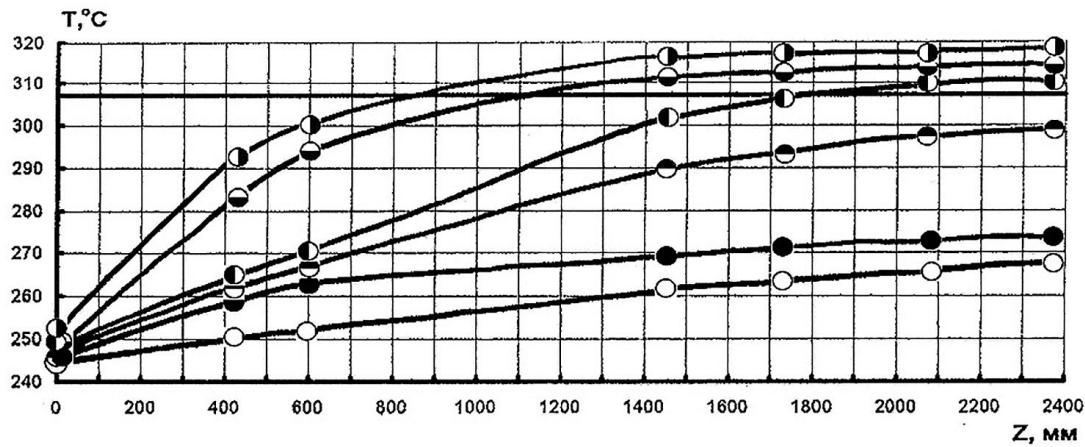


Рис. 12. Результати вимірювань температурних режимів поверхні ТВЕЛ по висоті експериментальної ТВЗ у режимах конвективної тепловіддачі, початку кипіння та розвинуеного пухиркового кипіння в наступних типових експериментах:

- 1) експеримент А: ● – $T_{ст}$; ○ – $T_{ж}$; $T_{вх} = 246,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{вих} = 265,7\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{нед}^{вих} = 41,4\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\rho W = 2741\text{ кг/(м}^2\text{с)}$; $N_{ТВЗ} = 2,36\text{ МВт}$.
Режими тепловіддачі по висоті ТВЗ між парами ДПЗ: конвективний, кипіння відсутнє між ДПЗ E07 і E25 по всій висоті АкЗ;
- 2) експеримент Б: ● – $T_{ст}$; ● – $T_{ж}$; $T_{вх} = 248,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{вих} = 294,3\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{нед}^{вих} = 9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\rho W = 1067\text{ кг/(м}^2\text{с)}$; $N_{ТВЗ} = 2,28\text{ МВт}$.
Режими тепловіддачі по висоті ТВЗ між ДПЗ E07–E08 — конвективний; на ділянці ТВЗ між ДПЗ E08–E09 — початок кипіння; на ділянці ТВЗ між ДПЗ E09–E10, E10–E11, E11–E25 — розвинуене кипіння;
- 3) експеримент В: ● – $T_{ст}$; ● – $T_{ж}$; $T_{вх} = 247,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{вих} = 306,2\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\Delta T_{нед}^{вих} = 0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $\rho W = 768,5\text{ кг/(м}^2\text{с)}$; $N_{ТВЗ} = 2,15\text{ МВт}$.
Режими тепловіддачі на ділянці ТВЗ між ДПЗ E07–E08 — конвективний; на ділянці ТВЗ між ДПЗ E08–E09 — початок кипіння; на ділянці ТВЗ між ДПЗ E09–E10, E10–E11, E11–E25 — розвинуене кипіння. Режимні параметри в цих експериментах: $P = 9,62\text{ МПа}$, температура насичення $T_s = 307,1\text{ }^{\circ}\text{C}$

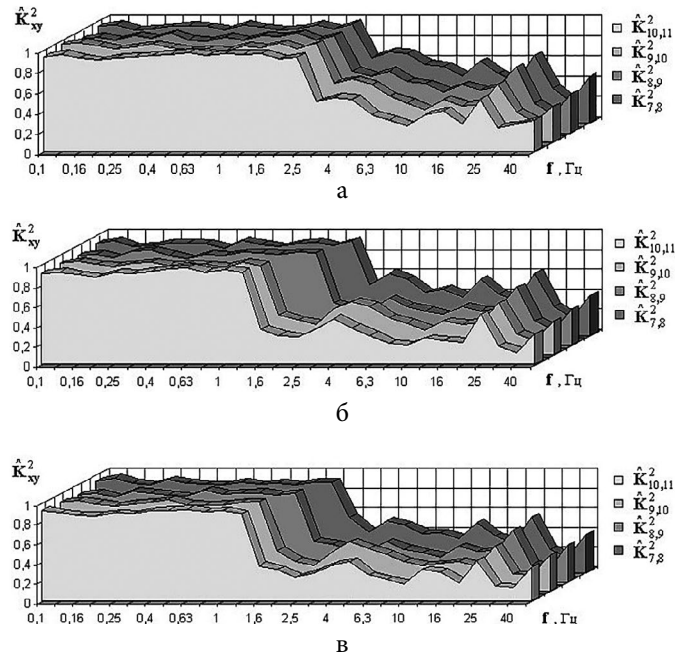
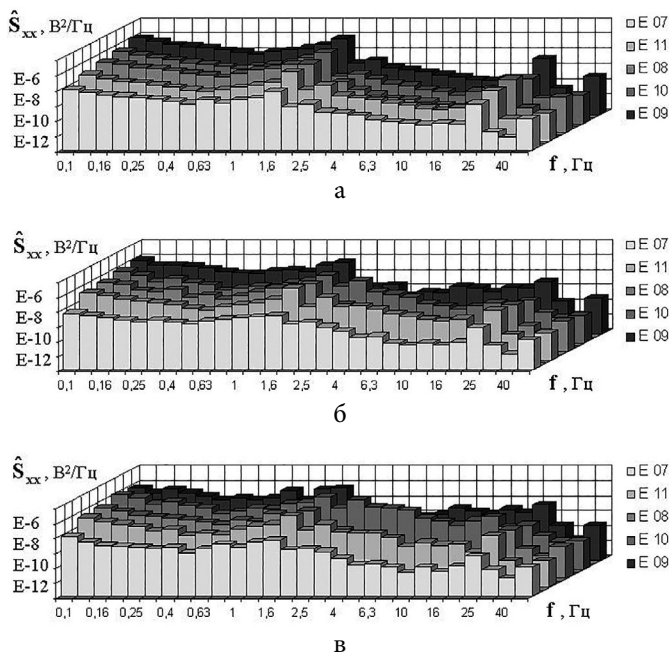


Рис. 13. Результати синхронної реєстрації АСГ нейтронного шуму в експериментальній ТВЗ у режимах конвективної тепловіддачі, початку кипіння теплоносія та розвинуеного пухиркового кипіння на поверхні ТВЕЛ відповідно до експериментів А, Б, В на рис. 12

Рис. 14. Результати обчислення КСГ нейтронного шуму в експериментальній ТВЗ між суміжними парами ДПЗ каналу нейтронних вимірювань у режимах конвективної тепловіддачі, початку кипіння теплоносія та розвинуеного пухиркового кипіння на поверхні ТВЕЛ відповідно до експериментів А, Б, В на рис. 12

люють формування цих діапазонів, має ймовірнісний характер;

3) відповідно до результатів, виконаних у роботі комплексних тепло- та нейтронно-фізичних досліджень, що демонструють характер та особливості взаємозв'язку температурних режимів поверхні тепловіддачі ТВЕЛ та відповідних ТГП у ТВЗ реактора ВВЕР-440 на рис. 12–14, представлено дані:

а) вимірювань температури ТВЕЛ за висотою ТВЗ реактора ВВЕР-440 у штатному, аномальному та перед аварійному режимах (експерименти А, Б, В);

б) синхронної (відповідно до температурних кривих на рис. 12) реєстрації АСГ одномірних сигналів нейтронного шуму в режимах конвективної тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, початку кипіння та пазиркової структури потоку в ТВЗ (див. рис. 13);

в) результатів обчислення КСГ двомірних сигналів нейтронного шуму між суміжними парами ДПЗ вимірювального каналу відповідно до вищезазначених режимів АкЗ ЯР в експериментах А, Б, В (див. рис. 14);

4) визначальною структурною особливістю АСГ нейтронного шуму, що реєструється в АкЗ реакторів ВВЕР в умовах відсутності кипіння теплоносія на поверхні ТВЕЛ є низькочастотна (досліджувався спектральний діапазон $f = 0,1 \dots 63,0$ Гц) випадкова $1/f$ — структура цих спектрів, що має характерні ознаки фліккер-шуму (див. рис. 13). Початок кипіння теплоносія в ТВЗ супроводжується пропорційним збільшенням інтенсивності спектральної густини складових АСГ нейтронного шуму на величину $\approx 20\%$ у полосі частот $f = 1,6 \dots 40$ Гц;

5) спектральний діапазон нейтронного шуму в АкЗ реактора ВВЕР, що відповідає частотній полосі $f = 10 \dots 40$ Гц, визначальною мірою зумовлюється процесами термалізації нейтронів. У той же час інфранизькі спектральні складові в частотній полосі від $f = 0,05$ Гц до декількох герц містять діагностичну інформацію щодо виникнення аномальних та перед аварійних ТГП на поверхні ТВЕЛ;

б) ідентифікація областей локалізації аномальних та перед аварійних ТГП у каналах реактора ВВЕР має бути реалізована на основі використання спектральних параметрів КСГ двомірною діагностичного сигналу нейтронного шуму, що має бути сформований відповідними суміжними парами виходів ДПЗ, розташованих уздовж аксіальної координати контрольованої ТВЗ (див. рис. 14);

7) послідовний перехід частоти різкого зменшення (зриву) рівня функції просторової когерентно-

сті у структурі КСГ двомірною сигналу нейтронного шуму до нижньої частини інфранизького частотного діапазону цього спектра є фізично пов'язаним із формуванням режимів плинну двофазного парорідинного потоку теплоносія зі збільшеними рівнями паровмісту. Так, зокрема, перехід режиму тепловіддачі в ТВЗ ВВЕР від турбулентної конвекції на поверхні ТВЕЛ до пазиркової структури потоку призводить до зменшення частоти зазначеного зриву когерентності від околиць частоти $f_{зр} \approx 2,5$ Гц відповідно до $f_{зр} \approx 1,6$ Гц (див. рис. 14, б, в);

8) вплив режимних параметрів процесу теплообміну (тиску, масової швидкості, недогріву теплоносія) на спектральну структуру АСГ та КСГ нейтронного шуму в АкЗ реактора ВВЕР в умовах генерації парової фази в його ТВЗ не є визначальним.

Висновки

1. У процесі експлуатації реакторів ВВЕР, що відповідно до проектних вимог у штатних експлуатаційних режимах мають забезпечувати в їхніх АкЗ лише конвективний режим тепловіддачі з поверхні ТВЕЛ, можливим є непрогнозоване виникнення в ТВЗ низки потенційно небезпечних теплогідравлічних аномалій, ознакою яких є латентне виникнення в процесі експлуатації ЯР нештатних режимів генерації парової фази.

2. Об'єктом оперативної діагностики теплогідравлічних аномалій у реакторах ВВЕР з докритичними параметрами є нерегламентні режими кипіння теплоносія в ТВЗ починаючи з активації перших центрів пароутворення на поверхні ТВЕЛ.

3. Формування пазиркової структури на поверхні ТВЕЛ становить потенційну загрозу герметичності їх через можливість виникнення множинних наскрізних пошкоджень поверхні тепловіддачі завдяки появі циклічних термічних напруг, що утворюються в матеріалі оболонки внаслідок температурних коливань, які є результатом циклічного випаровування мікрошару теплоносія, сформованого в основі кожного з активованих парових центрів.

4. Виникнення перших псевдопарових утворень в АкЗ перспективних реакторів ВВЕР із НКП теплоносія слід розглядати як об'єкт діагностики і фізичну передумову для подальшого переходу цього початкового аномального режиму псевдокипіння в ТВЗ до його аварійного псевдоплівкового різновиду, що проявляє себе як режим погіршеної тепловіддачі на поверхні ТВЕЛ.

5. Зміна частотної структури сигналів ДПЗ докритичного реактора ВВЕР, що реєструється під час переходу відповідної ділянки ТВЗ від конвективної тепловіддачі до процесу генерації парової фази має у своїй основі зумовлене фазовим переходом локальне збурення термалізаційних властивостей уповільнювача, яке обумовлює зміну спектра енергії нейтронів, що дифундують у цьому об'ємі АкЗ.

6. Нейтронні детектори типу ДПЗ, що розташовані в об'ємі АкЗ, дозволяють виявити важливі особливості структури спектрів флуктуацій нейтронного потоку, які при застосуванні позазонних іонізаційних камер не можуть бути виявлені.

7. Флуктуації нейтронного потоку в АкЗ реакторів ВВЕР зумовлені не тільки стохастичною природою нейтронно-фізичних процесів, а також вібраціями їхніх внутрішньокорпусних елементів, але є також пов'язаними з коливаннями термалізаційних властивостей уповільнювача, зокрема через виникнення аномальних режимів генерації парової фази.

8. Характерною структурною особливістю АСГ нейтронного шуму, що реєструється на виходах ДПЗ в умовах відсутності кипіння теплоносія на поверхні ТВЕЛ, є низькочастотна випадкова $1/f$ структура цих спектрів, що має ознаки типового флікер-шуму.

9. Спектральний діапазон нейтронного шуму в АкЗ реактора ВВЕР, що відповідає частотній полосі $f = 10 \dots 40$ Гц, визначальною мірою зумовлюється процесами термалізації нейтронів, причому інфранизькі спектральні складові від $f = 0,05$ до декількох герц містять діагностичну інформацію щодо теплогідрравлічних аномалій.

10. Ідентифікація областей локалізації теплогідрравлічних аномалій по висоті ТВЗ реакторів ВВЕР принципово може бути реалізована на основі параметрів КСГ двомірного сигналу нейтронного шуму, що сформований суміжними парами виходів ДПЗ, що розташовані в одному КНВ.

11. Послідовний перехід частоти зриву рівня функції просторової когерентності у структурі КСГ до нижньої частини інфранизького спектрального діапазону є фізично пов'язаним з виникненням у ТВЗ парорідинних структур з підвищеним рівнем паровмісту.

Список використаної літератури

1. Самойлов О. Б. Безопасность ядерных энергетических установок / О. Б. Самойлов, Г. Б. Усынин, А. М. Бахметьев. — Москва : Энергоатомиздат, 1989. — 279 с.

2. Теплофизика безопасности атомных электростанций: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко [и др.]. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2010. — 484 с.
3. Теплофизика поврежденных реакторных установок: монография / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко [и др.]. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2013. — 528 с.
4. Шараевський І. Г. Розпізнавання передаварійних теплогідрравлічних процесів у водоохолоджуваних ядерних енергетичних реакторах: автореф. дис. ... д-ра техн. наук / І. Г. Шараевський. — Київ : ІПБ АЕС НАН України, 2010. — 48 с.
5. Світові тенденції розвитку конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараевський, Н. М. Фіалко, Л. Б. Зімін [та ін.]. // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 2 (17). — С. 3–15.
6. Головні напрями російських розробок перспективних конструкцій водоохолоджуваних реакторів із надкритичним тиском / І. Г. Шараевський, Н. М. Фіалко, А. В. Носовський [та ін.]. // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — № 3 (18). — С. 34–41.
7. Abdelmessih A. H. An experimental investigation on incipient boiling oscillation of Freon-11 in forced convection / A. H. Abdelmessih, S. T. Yin // Proceedings of the Two-Phase Flow and Heat Transfer Symposium — Workshop (Fort Lauderdale, Fl.) — 1976. — P. 203–204.
8. Рассохин Н. Г. Особенности воздействия теплоносителя с высокой температурой на теплопередающую поверхность из алюминиевых сплавов при различных видах теплообмена / Н. Г. Рассохин, Г. Н. Градусов, М. Г. Гумилева // Тр. МЭИ. — 1975. — Вып. 257. — С. 81–87.
9. Кашинский В. И. Влияние отложения продуктов коррозии на температурный режим труб при развитом кипении / В. И. Кашинский, Е. И. Невструева, И. М. Романовский // Кризисы теплообмена и околокритическая область. — Ленинград : Наука, 1977. — С. 189–196.
10. Проблеми аварійної динаміки теплогідрравлічних процесів у перспективних реакторах із надкритичними параметрами легководного теплоносія / А. В. Носовський, І. Г. Шараевський, Н. М. Фіалко [та ін.]. // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — № 2 (21). — С. 3–16.
11. Kozma R. Identification of flow patterns by neutron noi. Analysis during actual coolant boiling in thin rectangular channels / R. Kozma, N. van Dam, I. E. Hoogenboom // Nucl. Technology. — 1992 — Vol. 100 — P. 97–109.
12. Биргер И. А. Техническая диагностика / И. А. Биргер. — Москва : Машиностроение, 1978. — 239 с.
13. Распознавание образов. Состояние и перспективы / К. Верхаген, Р. Джейк, Ф. Грун [и др.]; пер. с англ. под

- ред. И. Б. Гуревича — Москва : Радио и связь, 1985. — 103 с.
14. Комплексная система оперативной технической диагностики энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000/НПО «Хартрон», КБ «Хартрон-АРКОС». Технический проект. — Харьков, 1996. — 269 с.
 15. Система контроля, управления и диагностики (СКУД) реакторной установки с реактором типа В-320. Техническая спецификация. — Москва : РЦН «Курчатовский институт». Институт ядерных реакторов, 1995. — 95 с.
 16. Отчет по результатам первых месяцев эксплуатации системы реакторной шумовой диагностики (СШРД) «KARD». — Калининская АЭС, г. Удомля, 1992. — 37 с.
 17. Шульц И. Новые развития в области технической диагностики для АЭС с ВВЭР на основе современных ЭВМ типа РС / И. Шульц. — Siemens AG, Bereich Energiezengung (KWU/S42), 1997. — 26 с.
 18. Rauschdiagnostische Untersuchungen zum Kuhlmittelsieden in Druckwasserreaktoren / G. Blumentritt, P. Liewers, U. Rindelhardt, M. Werner // *Kernergie*. — 1990. — No. 1. — P. 260–274.
 19. Prokop K. Zkusnosti z vyvoje, projktovani a puuziti diagnostickehe systemu v období spousteni a v provozu JE / K. Prokop, M. Novak // *Energetica*. — 1981. — Vol. 31, No. 10. — P. 429–434.
 20. Теплофизика ресурса ядерных энергоустановок: монография / А. В. Носовский, И. Г. Шараевский, Н. М. Филалко [и др.]. — Чернобыль : ИПБ АЭС НАН Украины, 2017. — 624 с.

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

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

Study of WWER Reactors Neutronic Noise Spectral Images in Irregular Thermohydraulic Regimes of Core Zones

The information on the peculiarities of the manifestations of potentially dangerous thermohydraulic anomalies, that occur unpredictably during the operation of the WWER reactor core, is generalized. Considerable attention is paid to the threat of uncontrolled occurrence of latent pre-emergency and emergency operating states in fuel assemblies during the generation of the vapor phase on the surface of fuel elements, including the heat transfer

crisis with subsequent boiling of the coolant. It is noted that under these conditions, heat transfer, which should occur exclusively in the convective mode, is also characterized by the uncontrolled occurrence of the boiling process, from the activation of the first centers of vaporization to the formation of a developed bubble structure of the coolant. The limited possibilities of modern technical means of monitoring the technical condition of WWER, which do not provide detection of these anomalies and pre-emergency heat transfer regimes, are considered. Given the data on neutron flux fluctuations, it is shown that the noise components at the output of standard electron emission neutron flux meters carry important diagnostic information on thermohydraulic processes in the volume of the core, which is currently lost. With this in mind, it is concluded that it is necessary to immediately develop a methodology for the operational identification of random spectral realizations of neutron noise, which is registered at the outputs of neutron detectors of existing in-reactor control systems. The nature of the necessary reliable data on the spectral structure of the main types of diagnostic images (signatures or patterns) of neutron noise, which is registered at the output of standard neutron flux detectors in accordance with the main types of thermohydraulic anomalies, is determined. The analysis of known data and performed with the participation of authors of reactor experiments on the basis of which it is proved that the spectral structure of auto- and coherent signal density at the output of standard neutron flux detectors contains comprehensive diagnostic information on the type and location of vapor-liquid structures of WWER reactor core. With this in mind, the information characteristics of individual spectral ranges of neutron noise are analyzed and conclusions are made about their direct correspondence to the characteristic thermohydraulic processes as objects of diagnostics.

Keywords: WWER, core, neutron noise, spectral characteristics of signals, thermohydraulic anomalies, diagnostics.

References

1. Samoilov O. B., Usynin G. B., Bakhmet'ev A. M. (1989). *Bezopasnost' jadernykh energeticheskikh ustanovok* [Safety of nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 279 p. (in Rus.)
2. Klyuchnikov A. A., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevsky G. I. (2010). *Teplofizika bezopasnosti atomnykh elektrostantsiy* [Thermal physics of nuclear power plants safety]. Chornobyl: ISP NPP, NAS of Ukraine, 484 p. (in Rus.)

3. Klyuchnikov A. A., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevskaya N. I. (2013). *Teplofizika povrezhdenij reaktornykh ustanovok* [Thermophysics of NPP damages]. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 528 p. (in Rus.)
4. Sharevsky I. G. (2010) *Rozpiznavannia peredavarijnykh teplogydravlichykh procesiv u vodookholodzhuvanykh jadernykh energenychnykh 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.)
5. 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. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 17, no. 2, pp. 3–15. doi.org/10.31717/2311-8253.20.2.1. (in Ukr.)
6. Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Nosovskyi A. V., Zimin L. B., Vlasenko T. S., Sharaevsky G. I. (2020). Main directions of Russian developments of prospective structures of water-cooled supercritical pressure reactors. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 18, no. 3, pp. 34–41. doi.org/10.31717/2311-8253.20.3.4. (in Ukr.)
7. Abdelmessih A. H., Yin S. T. (1976). An experimental investigation on incipient boiling oscillation of Freon-11 in forced convection. *Proceedings of the Two-Phase Flow and Heat Transfer Symposium — Workshop (Fort Lauderdale, Fl.)*, pp. 203–204.
8. Rassokhin N. G., Gradusov G. N., Gumileva M. G. (1975). [Features of influence of the heat carrier with high temperature on a heat-transfer surface from aluminum alloys at various types of heat exchange]. *Proc. MEI*, vol. 257, pp. 81–87. (in Rus.)
9. Kashinskyi V. I., Nevstrueva E. I., Romanovskyi I. M. (1977). [Influence of deposition of corrosion products on the temperature regime of pipes at the developed boiling]. In: *Crizisy kipeniya i okolocriticheskaya oblast'* [Heat transfer crises and near-critical ares]. Leningrad: Nauka, pp. 189–196. (in Rus.)
10. Sharaevsky I. G., Vlasenko T. S., Zimin L. B., Nosovskyi A. V., Fialko N. M., Sharaevsky G. I. (2021). Problems of abnormal dynamics of thermal hydraulic processes in prospective reactors with supercritical parameters of light water coolant. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 21, no. 2, pp. 3–16. doi.org/10.31717/2311-8253.21.2.1. (in Ukr.)
11. Kozma R., van Dam N., Hoogenboom I. E. (1992). Identification of flow patterns by neutron noi. Analysis during actual coolant boiling in thin rectangular channels. *Nucl. Technology*, vol. 100, pp. 97–109.
12. Birger I. A. (1978). *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow: Mashinostroenie, 239 p. (in Rus.)
13. Verkhagen K., Jeik R., Grun F., Josten J., Verbek P.; Curevich I. B. (ed.) (1985). *Raspoznavanie obrazov. Sostojanie i perspektivy* [Pattern recognition. State and prospects.]. Translated from English. Moscow: Radio i svjaz', 103 p. (in Rus.)
14. Integrated system for operational technical diagnostics of a NPP power unit with a VVER-1000 reactor. Technical Project. Kharkiv: JSC “Khartron”, “Khartron-ARKOS”, 1996, 269 p. (in Rus.)
15. *Monitoring, control and diagnostic system (MCDS) of a reactor plant with a V-320 reactor*. Data sheet. — Moscow: NRC “Kurchatov Institute”, Institute of Nuclear Reactors, 1995, 95 p. (in Rus.)
16. *Report on the results of the first months of operation of the reactor noise diagnostics system*. Udomlya: Kalinin NPP, 1992, 37 p. (in Rus.)
17. Shulz I. (1997). *Novye razvitiya v oblasti tekhnicheskoi diagnostiki dlia AES s VVER na osnove sovremennykh EVM tipa PC* [New developments in the field of technical diagnostics for NPPs with VVER based on modern computers of the RS type]. Siemens AG — Bereich Energiezengung (KWU/S42), 26 p. (in Rus.)
18. Blumentritt G., Liewers P., Rindelhardt U., Werner M. (1990). Rauschdiagnostische Untersuchungen zum Kuhlmittelsieden in Druckwasserreaktoren. *Kernergie*, no. 1, pp. 260–274.
19. Prokop K., Novak M. (1981). Zkuscnosti z vyvoje, projktovani a puuziti diagnostickehe systemu v období spousteni a v provozu JE. *Energetica*, vol. 31, no. 10, pp. 429–434. (in Cze)
20. Nosovskyi A. V., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevsky G. I. (2017). *Teplofizika resursa jadernykh energoustanovok* [Thermal physics of NPP resource]. Kyiv: ISP NPP, NAS of Ukraine, 624 p. (in Rus.)

Надійшла 11.11.2021

Received 11.11.2021