

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

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

Фізичне обґрунтування завдання автоматичної діагностики систем механічного ущільнення валу головних циркуляційних насосів АЕС

Ключові слова:

головний циркуляційний насос, механічне ущільнення валу, розділовий ступінь, трибоспряження, капілярний щілинний зазор, скипання забираючої води.

Проаналізовано гідромеханічні та теплофізичні умови функціонування розділового ступеня системи механічного ущільнення валу головних циркуляційних насосів першого контуру ядерних реакторів водо-водяного типу. Розглянуто типові конструкції та досвід експлуатації ущільнень валів торцевого типу. Визначено фізичні особливості перебігу процесів, що супроводжують напірне водяне змащування капілярного щілинного каналу в парі тертя трибоспряження ущільнюючих кілець. Виявлено основні причини пошкоджуваності та відмов системи механічного ущільнення валу. Розроблено фізичну модель зони мікроконтактів поверхонь кілець та теплогідрравлічну модель капілярного щілинного мікроканалу в зоні трибоспряження контактних кілець торцевого ущільнення розділового ступеня. Відзначено необхідність вивчення можливості використання даних наявних систем стосовно перепаду тиску ущільнюючої води на розділовому ступені для контролю та прогнозу технічного стану системи механічного ущільнення валу.

Вступ

Як відомо [1], до складу обладнання, що є критично важливим для забезпечення експлуатаційної безпеки ядерних енергоблоків, входить насосна група головних циркуляційних насосів (ГЦН) першого контуру реакторної установки (РУ). Саме ГЦН є тим елементом основного обладнання ядерного енергоблока, працездатність якого має визначальний вплив на характеристики надійності та безпеки будь-якої сучасної АЕС, оскільки ГЦН повинні забезпечити безперебійну циркуляцію теплоносія в першому контурі і створити необхідні умови для надійного охолодження активної зони (АкЗ). Відомо, що АкЗ зарубіжних РУ з некиплячою водою типу PWR, а також їхніх вітчизняних аналогів — реакторів ВВЕР-1000 — є високотеплонапруженими і навіть у штатних режимах експлуатації знаходяться в умо-

вах, близьких до гранично допустимих. Так, середня температура паливних осердь тепловидільних елементів (ТВЕЛ) у водоохолоджуваних РУ може досягати 870 °С, а енергія, акумульована у ТВЕЛ, досягає рівня $1,4 \cdot 10^4$ МДж. Тому аварійна зупинка подібної РУ внаслідок раптової відмови ГЦН здатна ініціювати розвиток кризових за тепловіддачею явищ на поверхні ТВЕЛ і відповідну низку нерегламентних і потенційно небезпечних перехідних фізичних процесів включно з перегрівом паливних осердь, втратою герметичності оболонок ТВЕЛ, а також виходом високорадіоактивних продуктів поділу в об'єм першого контуру РУ. Таким чином, безвідмовне функціонування ГЦН є однією з головних передумов забезпечення безпеки АЕС.

Особливе місце у проблематиці надійності насосного обладнання АЕС посідає система механічного ущільнення валу. Стосовно до структурної надій-

© А. В. Носовський, Г. І. Шараєвський, Н. М. Фіалко, І. Г. Шараєвський, Л. Б. Зімін, 2019

ності найбільш поширених в атомній енергетиці України типів вітчизняних циркуляційних насосів з механічним ущільненням валу, а саме ГЦН-195М та ГЦН-317, необхідно відзначити такий факт. Згідно з накопиченою статистикою Комісії з ядерного регулювання (Nuclear Regulatory Commission, NRC) США частка аварійних зупинок ядерних енергоустановок (ЯЕУ), що були пов'язані з порушеннями штатних умов охолодження АкЗ реакторів PWR, становить близько чверті всіх позаштатних ситуацій. При цьому більшість аварійних зупинок були ініційовані саме раптовими відмовами ГЦН.

При аналізі причин нештатних експлуатаційних станів, що пов'язані з раптовими відмовами ГЦН-195М, звертають на себе увагу такі факти. По-перше, більшість раптових відмов ГЦН обумовлена розвитком прихованих пошкоджень, а також потенційно небезпечних аномалій у деяких структурних елементах цих агрегатів. По-друге, фізичні процеси, які ініціюють виникнення прихованих пошкоджень, а також зародження аномальних експлуатаційних режимів у критичних елементах конструкції ГЦН не можуть бути своєчасно виявлені експлуатаційним персоналом і тому є латентними вихідними аварійними подіями, що ініціюють передчасний вихід з ладу ряду найбільш навантажених конструкційних вузлів ГЦН. Експлуатаційна надійність основних елементів ГЦН є істотно різною й значною мірою визначається екстремальним характером тих фізичних умов, в яких функціонують ці вузли. При цьому найбільш схильним до пошкоджень є, поряд з підшипниковими вузлами, механічне ущільнення валу, що призначене для запобігання виходу високорадіоактивного теплоносія за межі першого контуру ЯЕУ. Слід зазначити, що згідно з відомими даними NRC середній час заміни пошкодженого блока механічного ущільнення валу ГЦН на АЕС США становить близько семи діб. Водночас, за оцінками роботи [2], сумарний збиток, який спричиняється внаслідок аварійної зупинки ядерного енергоблока електричною потужністю 1 000 МВт тривалістю в одну добу, перевищує 1 млн доларів США. Це свідчить, що раптові відмови ГЦН, обумовлені латентним зародженням і неконтрольованим подальшим розвитком пошкоджень у його найбільш уразливих агрегатних вузлах, не тільки негативно впливають на безпеку енергоблока, але також зумовлюють значні економічні втрати.

З огляду на вищезазначене актуальну проблематику процесу виникнення латентних пошкоджень

і наступної відмови механічного ущільнення валу ГЦН можна конкретизувати таким чином.

1. Фізичні особливості процесів зародження, а також розвитку пошкоджень у найбільш відповідальних елементах і системах обладнання насосної групи першого контуру, зокрема в системі механічного ущільнення валу ГЦН, на теперішній час є фактично недослідженими.

2. Наявними штатними технічними засобами автоматичних систем управління технологічними процесами (АСУ ТП), контрольно-вимірювальними приладами та автоматикою (КВПА), а також сучасними комп'ютерними комплексами оперативного моніторингу та діагностики обладнання АЕС початкові фази зародження потенційно небезпечних пошкоджень в основних агрегатних вузлах ГЦН не можуть бути виявлені.

3. Штатні засоби експлуатаційного контролю ГЦН здатні забезпечити аварійну зупинку насосного агрегату лише після виявлення ними факту лавиноподібної руйнації всієї системи механічного ущільнення валу.

4. Вихідною аварійною подією, яка ініціює фізичну руйнацію системи механічного ущільнення валу, починаючи з її розділового ступеня, є раптове непередбачуване скипання ущільнюючої води в капілярному щілинному зазорі між рухомими та нерухомими контактними кільцями цього ущільнення.

5. Логіка бінарного типу та булева алгебра, які звичайно є достатньо ефективними в завданнях ідентифікації детермінованих сигналів датчиків контролю технічного стану обладнання АЕС, зокрема ГЦН, не здатні забезпечити прийнятної надійності розпізнавання цих сигналів через їхню ймовірнісну природу, що зумовлена конкретними фізичними особливостями теплофізичних, гідродинамічних, нейтроннофізичних та інших технологічних процесів в елементах та системах ядерного енергоблока.

6. Реалізовані на сьогодні в технічних засобах АСУ ТП, КВПА та системах підтримки операторів АЕС підходи до оперативної діагностики, що передбачають використання вирішальних правил детермінованого типу, принципово не можуть бути застосовані в завданнях розробки математичного забезпечення для діагностичних систем нового покоління, адаптованих для експлуатації в реальних умовах імовірнісного діагностичного середовища.

7. Створення ефективних діагностичних моделей та розробка на їхній основі спеціалізованого програмного забезпечення для систем автоматичної

оперативної діагностики нового покоління вимагає розробки якісно нових методів автоматичного розпізнавання аномальних і передаварійних режимів експлуатації основного обладнання ядерного енергоблока, включаючи ГЦН, в умовах суттєвих інформаційних обмежень, насамперед, стосовно апріорної навчальної інформації.

8. Вимога надійного автоматичного формування діагностичних рішень в умовах фізичної нечіткості стохастичних діагностичних сигналів, що підлягають ідентифікації, обумовлює необхідність ефективного вирішення таких наукових завдань: а) розробки фізичної моделі функціонування торцевих ущільнень системи механічного ущільнення валу сучасних ГЦН; б) створення математичної моделі автоматичного розпізнавання початкових фаз виникнення потенційно небезпечних латентних пошкоджень у найбільш відповідальному розділовому ступені системи механічного ущільнення валу ГЦН; в) розробки програмно-алгоритмічного забезпечення та практичної реалізації розробленого методу автоматичного комп'ютерного розпізнавання початкових фаз процесу виникнення латентних пошкоджень у системі механічного ущільнення валу сучасних ГЦН.

Фізичні умови функціонування торцевого ущільнення

Як зазначено вище, найбільш відповідальний елемент системи механічного ущільнення валу ГЦН — торцеве ущільнення її розділового ступеня (так само, як і трьох інших ступенів системи, призначених для редукції тиску) складається з роторного та статорного кілець, що утворюють пласку пару тертя, а також пружного елемента. Останній має забезпечувати таку щільність контакту у трибологічному з'єднанні, яка гарантує його функціонування в умовах вібрації та можливого зміщення валу, а також у процесі фрикційного зносу контактних поверхонь рухомого та нерухомого кілець. Очевидно, що величина капілярного щілинного зазору між цими кільцями безпосередньо визначає фактичну величину витрати ущільнюючої води, яка відповідно до умов функціонування розділового ступеня рухається в радіальному напрямку через згаданий зазор між поверхнями тертя кілець цієї трибологічної пари. При цьому рух запираючої води відбувається під відповідним надлишковим тиском, який забезпечує живильний насос системи механічного ущільнення валу ГЦН. Слід відзначити, що в процесі функціонування торцевого

ущільнення між його трибологічними поверхнями розвивається гідродинамічна сила, яка розжимає ці поверхні, тобто діє в аксіальному напрямку, що є протилежним до напрямку зусилля притискаючого елемента і створює в трибоспряженні робочий зазор на рівні 10 мкм. Отже, у такій гідродинамічній парі тертя поверхні трибоспряження розділені капілярним шаром рухомої запираючої води, яка має також забезпечувати ефективне відведення теплоти, що генерується внаслідок трибологічних ефектів. Показово, що в штатному режимі експлуатації такого торцевого ущільнення фактична кількість механічних зіткнень, тобто фізичних контактів виступів мікронерівностей роторного кільця з відповідними виступами нерухомої поверхні статорного елемента (попередня технологічна обробка має забезпечувати абсолютну величину мікронерівностей в діапазоні $0,08 \div 0,16$ мкм) є порівняно малочисельною та має випадковий характер. Такий перебіг трибологічних процесів зумовлює відносно невеликий рівень тепловиділення в рухомому капілярному зазорі у штатному режимі експлуатації торцевого ущільнення, коли тепловіддача з поверхонь тертя реалізується виключно в конвективному режимі, тобто без скипання запираючої води. Результатом узагальнення вищезгаданих фізичних умов експлуатації зони трибоспряження торцевого ущільнення валу ГЦН відповідно до вимог штатної експлуатації розділового ступеня ГЦН стала фізична модель вищезазначеної зони трибоспряження, що була розроблена за результатами наших досліджень. У першому наближенні вона являє собою гідродинамічний капілярний щілинний мікроканал з розрахунковою шириною близько 10 мкм, який утворено поверхнями тертя кілець із композиційного матеріалу, поверхня контакту яких у результаті розвитку трибологічних процесів динамічно й неконтрольовано змінюється. При цьому в мікроканалі рухається гідродинамічний капілярний шар ущільнюючої води, яка має забезпечувати режим напіврідинного тертя в зоні контакту, а також ефективне відведення теплоти, що виділяється в зоні трибоспряження.

Аналіз трибологічних та теплофізичних властивостей контактних поверхонь

Результати відомих експериментальних досліджень торцевих ущільнень, а також досвіду їхньої розробки та експлуатації в атомному насособудуванні та інших галузях [1, 3–6] дали змогу з'ясувати, що три-

біологічні спрощення цих систем у штатних режимах здебільшого експлуатуються в режимах напіврідинного тертя. У цих умовах у зоні трибоспрямлення торцевого ущільнення присутній капілярний шар запираючої рідини, який завдяки її надлишковому тиску не тільки практично повністю розділяє трибологічні поверхні кілець, але, крім того, сприймає аксіальні навантаження, що стискають ці елементи. При цьому у зоні контакту пари тертя спостерігаються стохастичні акти механічної взаємодії мікронерівностей контактуючих поверхонь, які (разом із можливою наявністю деякої кількості абразивних частинок у запираючій рідині) спричиняють їхній механічний знос. Формування такого напіврідинного режиму тертя в зоні трибоспрямлення зумовлюється низкою визначальних фізичних чинників. Так, по-перше, до них слід віднести гідродинамічні ефекти, включаючи можливі кавітаційні процеси в рідині. При цьому ступінь впливу цих ефектів визначається комплексом умов, до яких, крім контактного тиску та швидкості ковзання, слід віднести також характер в'язкості та щільності рідини. По-друге, це механіка взаємодії поверхонь тертя, яка визначається не тільки їхньою мікро- та макрогеометрією, але й характером деформації, а також твердістю і структурою матеріалів. По-третє, одним із визначальних чинників є саме теплофізичні процеси, що відбуваються в цьому капілярному каналі. Слід підкреслити, що характер цих процесів, включаючи можливість скипання запираючої води, зумовлюється, насамперед, її температурою, швидкістю, досягнутим рівнем теплового потоку, мікрогеометрією потенційних центрів пароутворення, теплопровідністю матеріалу контактних кілець, а також режимом тепловіддачі, тобто інтенсивністю тепловідводу. Показово, що ця інтенсивність може обмежуватись, насамперед, неприпустимим, але можливим в умовах функціонування торцевого ущільнення процесом скипання плівки запираючої води. При цьому слід також підкреслити той визначальний факт, що процес скипання запираючої рідини (як загалом і початок кишіння будь-якого іншого теплоносія), як відомо [7–10 та ін.], визначається, зокрема, наявністю потенційних центрів пароутворення на поверхнях тепловіддачі. Таким чином, можна стверджувати, що визначальним чинником, що обумовлює неконтрольовану деградацію змащувального шару, є процес раптового скипання запираючої води в капілярному мікроканалі.

З огляду на вищезазначене, потребують практичної реалізації наступні проблемні задачі експлу-

атації торцевого ущільнення розділового ступеня ГЦН: 1) аналіз та систематизація фізичних причин пошкоджуваності розділового ступеня як найбільш відповідального структурного елемента системи механічного ущільнення валу; 2) розробка фізичної моделі виникнення та розвитку аварійних процесів у торцевому ущільненні для подальших досліджень процесу виникнення нерегламентних експлуатаційних станів розділового ступеня; 3) проведення експериментальних досліджень фізичних особливостей руйнації цього ступеня; 4) розробка комп'ютерної моделі автоматичного розпізнавання процесу виникнення початкових фаз виникнення неконтрольованих латентних пошкоджень розділового ступеня.

Аналіз фізичних особливостей пошкоджень трибоспрямлення розділового ступеня

Враховуючи дані робіт [1, 3–6], присвячених експериментальним та теоретичним дослідженням гідродинаміки ущільнюючої рідини в зоні трибоспрямлення торцевих ущільнень, видається можливим стверджувати, що гідродинамічний змащувальний клин, який формується в цьому шарі, здатен сприймати значні стискаючі аксіальні навантаження за таких умов. Так, насамперед, величина реакції, яка при цьому виникає, характеризується ступеневою залежністю з показником ступеня від 3 до 6, а величина коефіцієнта тертя визначається низкою фізичних чинників. З огляду на це слід відзначити наступне. У сучасній теорії гідродинамічного та теплового розрахунку торцевих ущільнень [3–6] однією з базових фізичних моделей є модель гідродинамічного мікропідшипника, яка звичайно розглядається стосовно до пари тертя «вуглеграфіт — метал». Досвід експлуатації конструкцій різних типів з використанням цієї пари тертя в торцевих ущільненнях різного призначення засвідчив, що критичним елементом подібного трибоспрямлення є саме вуглеграфітова композиція. На поверхні кілець, що просочені відповідним полімерним компаундом, після деякого періоду експлуатації формуються структурні нерівності з плоскими вершинами висотою у декілька мікрон. Зазначені структурні нерівності здатні формувати достатньо великі (до 0,5 мм) агломерати, що займають близько 30...40% номінальної площі трибологічного контакту. Подібну типову структуру фрагмента поверхні вуглеграфітового ущільнюючого кільця, що сформувалася у процесі експлуатації торцевого ущільнення, наведено на рис. 1 [11].

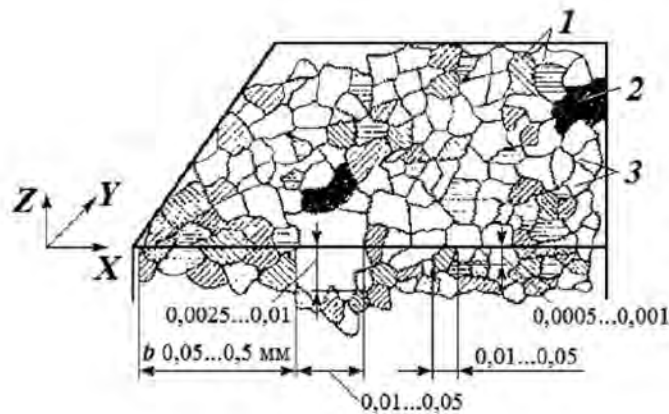


Рис. 1. Структура фрагмента поверхні вуглеграфітового ущільнюючого кільця: 1 — зерна з горизонтальними робочими поверхнями; 2 — глибокі пори; 3 — западини мікрорельєфу

Мікрографічне дослідження таких кілець у передексплуатаційний період засвідчило, що зареєстровані на рис. 1 шляхом електронного сканування робочої поверхні глибокі пори та западини мікрогеометрії практично відсутні, а середня висота мікронерівностей звичайно не перевищує 0,25 мкм. Аналізуючи цей факт у контексті систематизації головних фізичних чинників, що безпосередньо впливають на можливість початку генерації парової фази в щільному капілярному мікроканалі, слід відзначити наступне. По-перше, у процесі експлуатації вуглеграфітових кілець торцевих ущільнень ГЦН відбувається формування системи потенційних центрів кипіння для початку генерації парової фази в мікроплівці запираючої рідини. По-друге, тим самим створюються необхідні фізичні передумови для можливості раптового закипання запираючої рідини. По-третє, близькі за своїми структурними характеристиками до вуглеграфіту силіційовані графіти отримали в сучасних конструкціях механічних ущільнень валів ГЦН найбільше застосування. Останнє зумовлено не тільки значно більшою несучою спроможністю зазначених матеріалів, а й суттєво більшою зносостійкістю. З огляду на такі експлуатаційні властивості силіційованого графіту в сучасних системах механічних ущільнень валу ГЦН поверхні контакту як нерухомого, так і рухомого кілець виготовляються саме з цього матеріалу, переваги якого обґрунтовано в роботах [12, 13]. У цьому контексті реальну динаміку зміни структури поверхні силіційованого графіту в процесі експлуатації торцевого ущільнення валу проілюстровано на рис. 2 [13], на якому

представлено агломерати з м'яких графітових зерен, які заповнюють просторовий структурний каркас із карбиду кремнію та власне кремнію. Показово, що в процесі експлуатації такої пари тертя відбувається зсув та шліфування графітових зерен, похилі ділянки яких формують характерні зони контакту, що є подібними до подвійних мікропідшипників Релея, відомих з теорії гідродинамічного змащування.

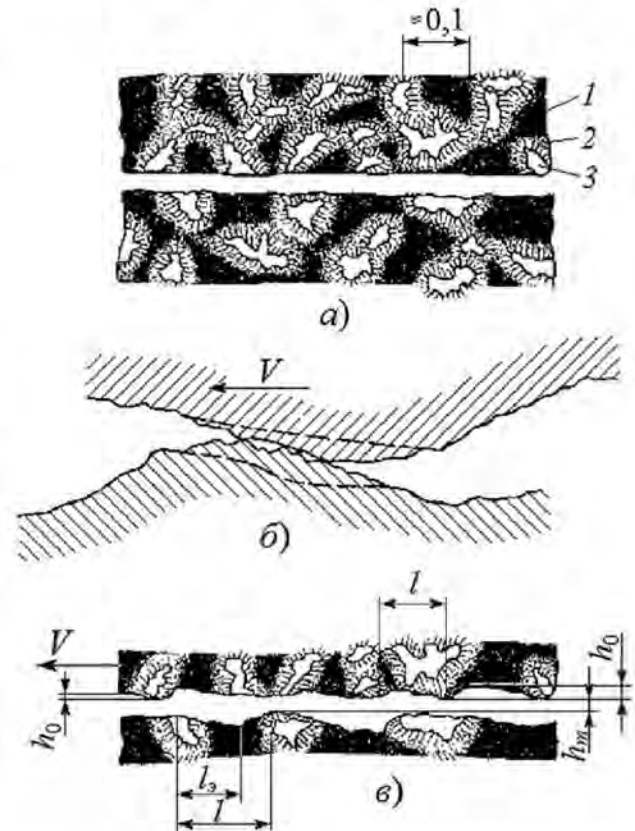


Рис. 2. Структура поверхні трибологічного контакту кілець із силіційованого графіту (1 — графітові зерна; 2 — карбід кремнію; 3 — кремній): а) перед початком експлуатації; б) схема гідродинамічної взаємодії; в) у процесі експлуатації

Вочевидь, представлені на рис. 1 і 2 фізичні та пов'язані з ними розрахункові моделі гідродинамічної взаємодії ущільнюючих кілець із композитних матеріалів, а саме вуглеграфіту та силіційованого графіту, є загалом подібними. Крім того, аналізуючи динаміку трансформації мікроструктури кілець торцевого ущільнення із силіційованого графіту, можна зробити такий висновок: поверхні роторного та статорного кілець із силіційованого графіту схильні до утворення в процесі їхньої експлуатації мікрозападин, геометрія яких здатна динамічно змінюва-

тися та являти собою потенційно активні центри пароутворення. Тим самим створюються необхідні передумови для виникнення неконтрольованого експлуатаційним персоналом процесу скипання ущільнюючої води, яка рухається в капілярному каналі розділового ступеня. При цьому слід відзначити, що наявні методики теплового та гідродинамічного розрахунку пар тертя із силіційованого графіту не враховують факт можливого скипання запираючої рідини в процесі експлуатації торцевого ущільнення, а наявні теплофізичні підходи до визначення початку кипіння на поверхні тепловіддачі в умовах динамічної зміни її мікрогеометрії та невизначеності ряду визначальних теплофізичних параметрів у зоні скипання (зокрема, недогріву запираючої води) не можуть бути практично застосовані. Таким чином, не тільки адекватне розрахункове прогнозування режиму фазового переходу в мікроканалі торцевого ущільнення валу ГЦН, але також практична ідентифікація факту скипання ущільнюючої води в трибоспряженні на основі наявних вимірювальних засобів на сьогодні є неможливими.

Аналізуючи в цьому контексті гідродинамічні умови функціонування зони трибоспряження в торцевому ущільненні, можна стверджувати, що такий режим його експлуатації, як рідинне змащування, характеризується наявністю в цій зоні розвиненої рідинної змащувальної плівки та практично повною відсутністю контактів мікронерівностей, що зумовлює низьку інтенсивність зносу контактуючих поверхонь. Утім, у цих умовах можливим є локальний ерозійний знос пари тертя, який обумовлений ерозійним впливом шару рідкого змащувального агента. Так, експерименти, виконані в деяких роботах [3–6], свідчать про те, що інтенсивність ерозійних процесів різко зростає в діапазоні достатньо високих тисків рідинного мастила (понад 10 МПа), які є характерними для умов експлуатації систем механічного ущільнення валу сучасних ГЦН. Крім того, ще одним вагомим фізичним чинником, що інтенсифікує ерозійний знос пар тертя, є високі (понад 50 м/с) швидкості ковзання, які є типовими для динаміки функціонування трибоспряжень у системі механічного ущільнення валу. Показово, що деякі дослідження, зокрема [13], засвідчили наявність у капілярному мікроканалі пари тертя макрозон локальної гідродинамічної кавітації запираючої рідини. При цьому виникнення цих зон автор зазначеної роботи пояснює виключно невідомими ефектами та закономірностями змащування повер-

хонь деградуючих контактних кілець. Зважаючи на подібні кавітаційні ефекти, а також враховуючи той факт, що до ерозійного зносу поверхонь графітових композитів схильні, насамперед, зони їхніх відносно м'яких графітових зерен, які заповнюють порожнистий каркас із композиції кремнію та його карбиду (див. рис. 2), можна стверджувати, що під час експлуатації контактних поверхонь торцевого ущільнення розділового ступеня ГЦН унаслідок процесів механічного зносу та можливих кавітаційних ефектів спостерігається розподілене в часі динамічне формування такої мікрогеометрії цих поверхонь, що в їхніх западинах створюються необхідні та достатні умови для активації перших центрів пароутворення, тобто виникнення фазового переходу.

Слід зазначити, що відповідно до даних [1, 3–6] штатний режим напіврідинного змащування торцевих ущільнень валу ГЦН характеризується відносно невеликою площею контактів мікронерівностей поверхонь і, як наслідок, допустимою інтенсивністю зносу. Водночас на основі аналізу значного обсягу експериментальних даних, отриманих у роботах [3–6], можна стверджувати, що локально в окремих зонах контакту мікронерівностей поверхонь тертя режим тертя є близьким до граничного змащування. У цих умовах особливе значення має збереження достатньої гідромеханічної жорсткості гідродинамічного змащувального клину, що має запобігти аварійному стану сухого тертя, яке ініціює циклічне різке підвищення температури контактної поверхні кілець. Слід зазначити, що в таких експлуатаційних умовах особливо небезпечним є термоциклювання, яке ініціює терморозтріскування контактних кілець торцевого ущільнення та їхню лавиноподібну руйнацію.

Теплогідравлічна модель капілярного мікроканалу

Виконаний аналіз фізичних умов експлуатації торцевого ущільнення розділового ступеня ГЦН дав змогу синтезувати теплогідравлічну модель капілярного мікроканалу в зоні трибоспряження кілець (рис. 3).

Наведена на рисунку модель має такі принципові особливості: а) зони тепловиділення верхнього та нижнього кілець мають довільні епюри, що формуються випадковими зонами контакту мікронерівностей контактних поверхонь і мають динамічний стохастичний характер; б) поверхні тепловіддачі від

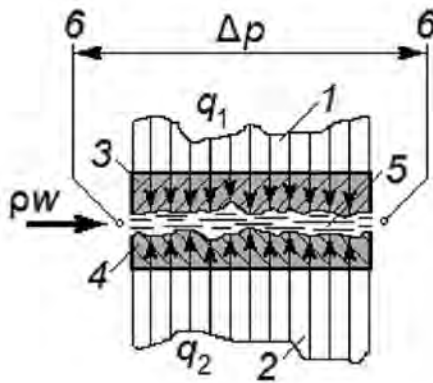


Рис. 3. Теплогідрравлічна модель капілярного щілинного мікроканалу в зоні трибоспряження контактних кілець торцевого ущільнення розділового ступеня: 1, 2 — стохастичні профілі епюр енерговиділення; 3, 4 — контактні кільця; 5 — рух запираючої води з невідомою масовою швидкістю r_w ; 6 — перепад тиску в капілярному щілинному мікроканалі

кілець до запираючої рідини мають випадковий, неконтрольований та змінний у процесі експлуатації мікропрофіль; в) величина масової швидкості ущільнюючої рідини r_w , що є одним із визначальних параметрів процесу теплообміну, через динамічну зміну мікрогеометрії контактних поверхонь достеменно невідома; г) вимірювання температури рухомої контактної поверхні є технічно неможливим. З огляду на вищезазначене в цих складних, апріорно невизначених теплогідрравлічних умовах величина гідравлічного опору капілярного мікроканалу Δp залишається єдиною з контрольованих штатними засобами вимірювання експлуатаційних параметрів ГЦН величиною, яка може бути використана для можли-

вості діагностики теплового стану трибоспряження. Ця гіпотеза, що стосується можливості ефективного використання цього параметра для оперативної діагностики теплового режиму щілинних капілярних мікроканалів системи механічного ущільнення валу ГЦН, може бути опосередковано підтверджена результатами експериментальних досліджень авторів цієї роботи, узагальнених у роботі [7]. Показово, що ці теплофізичні дослідження було виконано відповідно до реальних умов перебігу аварійних процесів генерації парової фази в технологічних каналах активних зон енергетичних ядерних реакторів з киплячою водою. Відповідно до наведених у роботі [7] даних, які ілюструє рис. 4, структура автоспектральної щільності флуктуацій гідравлічного опору в парогенеруючому каналі зі зміною паровмісту потоку та відповідно режиму його течії зазнає характерних структурних змін, які принципово можуть бути виявлені на основі спеціально розробленого алгоритму ідентифікації.

Водночас набутий досвід теплофізичних досліджень [7–10] свідчить про те, що, на відміну від докладно досліджених на сьогодні теплогідрравлічних особливостей [9] циліндричних каналів, в умовах капілярного щілинного мікроканалу зі стохастично змінними фізичними параметрами при погіршенні тепловідводу трансформація структури і режиму течії потоку запираючої води від штатного рідинного стану до скипання і перехід до кризи тепловіддачі відбуватиметься лавиноподібно, що суттєво ускладнює процедуру розпізнавання.

Підсумовуючи вищезазначену проблематику, необхідно підкреслити, що розробка та комп'ютерна реалізація математичної моделі автоматичної

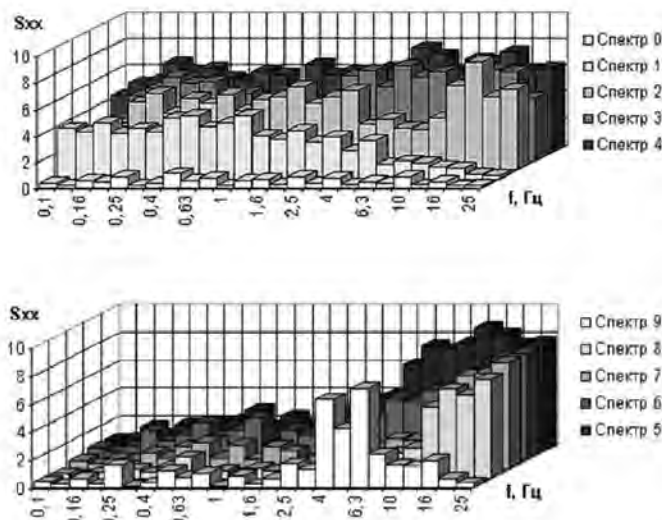


Рис. 4. Структура автоспектральної щільності флуктуацій гідравлічного опору вихідної ділянки експериментального циліндричного парогенеруючого каналу в умовах збільшення теплового навантаження та послідовної трансформації режимів плинну двофазного парорідинного потоку: 0 — конвективний режим тепловіддачі; 1 — бульбашковий режим плинну; 2 — снарядна структура потоку; 3 — перехід від снарядного до емульсійного режиму; 4 — емульсійна структура; 5 — дисперсно-кільцевий режим з хвилями збурення на пристінковій рідинній плівці; 6 — перехід від хвиль збурення до хвиль малого масштабу; 7 — хвилі малого масштабу на пристінковій плівці; 8 — верхня частина дисперсно-кільцевого режиму з рідинною мікроплівкою на стінці каналу; 9 — криза тепловіддачі 2-го роду, що відповідає досягненню граничного рівня паровмісту

ідентифікації в реальному часі стану початку активації перших центрів пароутворення в капілярному щілинному мікроканалі, що передує лавиноподібній руйнації розділового та інших ступенів торцевого ущільнення валу ГЦН, є актуальною науковою проблемою. Результати її вирішення буде наведено в наступній публікації нашого авторського колективу.

Висновки

1. Визначальним чинником, що зумовлює можливе раптове різке зниження гідромеханічної жорсткості півки ущільнюючої рідини в капілярному зазорі, є втрата суцільності гідродинамічного змащувального клину між роторним і статорним кільцями торцевого ущільнення.

2. Головними фізичними причинами раптової втрати гідромеханічної жорсткості змащувального клину є процеси фазового переходу в ущільнюючій рідині, а саме її раптове скипання. При цьому наявні методики розрахунку торцевих ущільнень валу не дають змоги прогнозувати можливості виникнення фазового переходу в капілярному щілинному мікроканалі.

3. Специфіка теплогідравлічних умов у капілярному каналі через велику кількість невідомих теплофізичних та трибологічних чинників не дає змоги забезпечити надійний розрахунок цього каналу, оскільки в процесі експлуатації торцевого ущільнення спостерігається динамічна зміна мікропрофілю контактних поверхонь, у тому числі на основі утворення мікрозападин, які слід розглядати як потенційно активні центри пароутворення.

4. За вищезазначених умов виникнення мікрозападин слід розглядати як визначальний чинник раптове неконтрольоване скипання запираючої рідини, що спричиняє подальшу лавиноподібну руйнацію торцевого ущільнення та вихід з ладу розділового ступеня та всього ГЦН.

5. Відповідно до розроблених фізичних моделей капілярного щілинного каналу, що утворений контактними поверхнями торцевого ущільнення, величина його гідравлічного опору Δp залишається єдиним з контрольованих штатними засобами вимірювання параметром, що може бути використаний для контролю теплового режиму трибоспряження. При цьому можливість використання Δp як принципово нової діагностичної ознаки для контролю та прогнозування аварійного теплового стану

розділового ступеня ГЦН має бути доведена в подальших дослідженнях.

Список використаної літератури

1. Будов В. М. Насосы АЭС / В. М. Будов. — М. : Энергоатомиздат. — 1986. — 408 с.
2. Кириленко О. В. Комплексний аналіз аварійних ситуацій генеруючого обладнання електростанцій / О. В. Кириленко, Г. М. Федоренко, О. Г. Кенсіцький // Сб. докл. третьей науч. — практ. конф. «Повышение безопасности и эффективности атомной энергетики» (Одесса, 24–28 сент. 2013 г.). — Одесса: НПУ «Энергоатом» ООО, 2013. — С. 203–2015.
3. Майер Э. Торцевые уплотнения / Э. Майер; пер. с нем. — М. : Машиностроение, 1978. — 288 с.
4. Голубев А. И. Торцевые уплотнения вращающихся валов / А. И. Голубев. — [2-е изд., перераб. и доп.]. — М. : Машиностроение, 1974. — 212 с.
5. Мур Д. Основы и применение триботехники / Д. Мур. — М. : Мир, 1978. — 487 с.
6. Торцевые уплотнения аппаратов химических производств / Г. В. Антипин, М. Т. Банников, А. Д. Домашнев и др. — М. : Машиностроение, 1984. — 112 с.
7. Теплофизика безопасности атомных электростанций / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский / Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2010. — 484 с.
8. Теплофизика надежности активных зон / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский / Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2015. — 772 с.
9. Теплофизика ресурса ядерных энергоустановок / А. В. Носовский, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Г. И. Шараевский. — Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины. — 2017. — 624 с.
10. Теплофизика поврежденных реакторных установок / А. А. Ключников, И. Г. Шараевский, Н. М. Фиалко, Л. Б. Зимин, Н. И. Шараевская. — Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины. — 2013. — 528 с.
11. Уплотнения и уплотнительная техника: справочник / Л. А. Кондаков, А. И. Голубев, В. Б. Овандер и др.; под общ. ред. А. И. Голубева, Л. А. Кондакова. — М. : Машиностроение, 1986. — 464 с.
12. Тарабанов А. С. Силицированный графит / А. С. Тарабанов, В. Н. Костиков. — М. : Металлургия, 1977. — 208 с.
13. Lebeck A. O. Hydrodynamic lubrication in wavy contacting face seals — a two-dimensional model / A. O. Lebeck // Journal of Lubrication Tech. — Vol. 103. — No. 4. — P. 578–586. Doi: 10.1115/1.3251742.

**А. В. Носовский, Г. И. Шараевский, Н. М. Фялко,
И. Г. Шараевский, Л. Б. Зимин**

*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины,
ул. Лысогорская, 12, Киев, 03028, Украина*

**Физическое обоснование задачи автоматической
диагностики систем механического уплотнения
вала главных циркуляционных насосов АЭС**

Проанализированы гидромеханические и теплофизические условия функционирования разделительной ступени системы механического уплотнения вала главных циркуляционных насосов первого контура ядерных реакторов водо-водяного типа. Рассмотрены типовые конструкции и опыт эксплуатации уплотнений валов торцевого типа. Определены физические особенности протекания процессов, которые сопровождают напорное водяное смазывание капиллярного щелевого канала в паре трения трибосопряжения уплотнительных колец. Выявлены основные причины повреждаемости и отказов системы механического уплотнения вала. Рассмотрена специфика вскипания теплоносителя в капиллярных каналах. Разработаны физическая модель зоны микроконтактов поверхностей колец и теплогидравлическая модель капиллярного щелевого микроканала в зоне трибосопряжения контактных колец торцевого уплотнения разделительной ступени. Отмечена необходимость изучения возможности использования имеющихся данных существующих систем относительно перепада давления уплотняющей воды на разделительной ступени для контроля и прогноза технического состояния системы механического уплотнения вала.

Ключевые слова: главный циркуляционный насос, механическое уплотнение вала, разделительная ступень, трибосопряжение, капиллярный щелевой зазор, вскипание запирающей воды.

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

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

**Physical Substantiation of the Mechanical Sealing
Systems Automatic Diagnostics Problem of NPP
Coolant Reactor Pumps**

Hydromechanical and thermophysical conditions for the operation of the mechanical shaft seal system separation stage for the main circulation pumps of the water-water type nuclear reactors first circuit are analyzed. Typical designs and experience of the end type sealing shafts are considered. The physical features of the flow of processes that accompany the pressure water lubrication of the capillary slit channel in the friction pair of the rotor and stator O-rings tribo-tension are determined. Such a cause is most often a change in the friction regime of surfaces of siliconized graphite in the contact zone of the movable and fixed rings of the tribological pair of the separation stage. As these surfaces wear out, potential vaporization centers may appear on them. Therefore, the transition from semi-liquid to dry friction is most often caused by cavitation processes and uncontrolled boiling of blocking water in the capillary slot channel. The specificity of the coolant boiling in the capillary channels and the dynamics of the development of the heat crisis phenomena in such conditions are considered. Applicable to the stated task using the theory of the Rayleigh microbearing, a physical model of the ring surfaces contact zone and a thermo-hydraulic model of the capillary slit microchannel in the zone of tribon-tension of the end seal contact rings of separation stage have been developed. The models take into account the peculiarities of the progress of thermophysical processes in the capillary slot channel and the practical engineering requirements for the developed operational diagnostics system. The necessity to study the possibility of using the data of existing systems with respect to the pressure drop of the sealing water at the separation stage for monitoring and forecasting the technical state of the mechanical shaft seal system was noted.

Keywords: main circulation pump, mechanical shaft seal, separating stage, tribopair, capillary gap, boiling of blocking water.

References

1. Budov V. M. (1986). *Nasosy AES* [Pumps of NPP]. Moscow: Energoatomszdat, 408 p. (in Russ.)
2. Kirilenko O. V., Fedorenko G. M., Kensitskiy O. G. (2013). Kompleksnyi analiz avariinykh sytuatsii heneruiuchoho obladnannia elektrostantsii [Comprehensive analysis of emergency situations of power plants generating equip-

- ment]. Proceedings of 3d scientific-practical conference "Improving the safety and efficiency of nuclear energy" (Odesa, September, 24–28, 2013). Odesa: Energoatom, pp. 203–215. (in Ukr.)
3. Maier E. (1978). *Mekhanicheskie uplotnenia* [Mechanical seals]. Moscow: Mashinostroenie, 288 p. (in Russ.)
 4. Golubiev A. I. (1974). *Mekhanicheskie uplotnenia vrashchayushchikhsia valov* [Mechanical Shaft Seals]. Moscow: Mashinostroenie, 212 p. (in Russ.)
 5. Mur D. (1978). *Osnovy i primeneniye tribotechniki* [Basics and application of tribotechnics]. Moscow: Mir, 487 p. (in Russ.)
 6. Antipin G. V., Bannikov M. T., Domashnev A. D., Yermolovich Ye. I., Khanitskaya, G. M., Tyugin, V. G. (1984). *Torcovye uplotnenia apparatov khimicheskikh proizvodstv* [Mechanical seals of chemical manufactures devices]. — Moscow: Mashinostroenie, 112 p. (in Russ.)
 7. Kliuchnikov A. A., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevsky G. I. (2010). *Teplofizika bezopasnosti atomnykh elektrostancij* [Thermal physics of NPP safety]. Institute for Safety Problems of NPP, NAS of Ukraine, 484 p. (in Russ.)
 8. Kliuchnikov A. A., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevsky G. I. (2015). *Teplofizika nadezhnosti aktivnykh zon* [Thermal physics of active zones reliability]. Institute for Safety Problems of NPP, NAS of Ukraine, 772 p. (in Russ.)
 9. Nosovsky A. V., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevsky G. I. (2017). *Teplofizika resursa jadernykh energoustanovok* [Thermal physics of NPP resource]. Institute for Safety Problems of NPP, NAS of Ukraine, 624 p. (in Russ.)
 10. Kliuchnikov A. A., Sharaevsky I. G., Fialko N. M., Zimin L. B., Sharaevskaya N. I. (2013). *Teplofizika povrezhdenij reaktornykh ustanovok* [Thermal physics of NPP damages]. Institute for Safety Problems of NPP, NAS of Ukraine, 528 p. (in Russ.)
 11. Kondakov L. A., Golubev A. I., Gordeev V. V., Ovander V. B., Furmanov V. A., Karmugin B. V. (1986). *Uplotnenia i uplotnitelnaja tehnika* [Seals and Sealing Technology]. Moscow: Mashinostroenie, 464 p. (in Russ.)
 12. Tarabanov A. S., Kostikov V. N. (1977). *Silicirovannyj grafit* [Silicified graphite]. Moscow: Metallurgia, 208 p. (in Russ.)
 13. Lebek A. O. (1961). Hydrodynamic lubrication in wavy contacting face seals — a two-dimensional model. *Journal of Lubrication Tech.*, Vol. 103, no. 4, pp. 578–586. Doi: 10.1115/1.3251742.

Надійшла 19.08.2019.

Received 19.08.2019