

АНАЛІЗ ФАКТОРІВ БЕЗПЕКИ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Буданов П. Ф.¹, Бровко К. Ю.², Хом'як Е. А.¹

¹Українська інженерно-педагогічна академія (м. Харків),

²Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

Проведено аналіз факторів, що впливають на підвищення безпеки при експлуатації тепловиділяючих елементів тепловиділяючих збірок ядерного реактора атомної електростанції.

Постановка проблеми. Найважливіше місце в системі ядерної безпеки атомної електростанції (АЕС) займає система контролю герметичності оболонок (КГО) тепловиділяючих елементів (ТВЕЛ) тепловиділяючих збірок (ТВЗ) ядерного реактора. Система КГО дозволяє своєчасно виявляти розпочату розгерметизацію ТВЕЛів і відстежувати розвиток дефекту, запобігаючи, тим самим, важкої аварії. На АЕС проблема виявлення негерметичних ТВЕЛів є дуже актуальною у зв'язку з одноконтурною системою циркуляції теплоносія і збільшенням викиду радіонуклідів безпосередньо в атмосферу в разі аварії.

У даний час на всіх діючих українських і багатьох зарубіжних атомних електростанціях експлуатується штатна система КГО ТВЕЛів, розроблена ще в кінці 60-х рр, яка морально і фізично застаріла. У зв'язку з цим видається актуальним розробити нові способи і методи для виявлення негерметичності ТВЕЛів, що значно підвищує надійність при експлуатації технологічного обладнання на АЕС. Все це вирішує питання про оснащення АЕС сучасною системою КГО, що забезпечує безпеку експлуатації технологічного обладнання АЕС, і володіє високим ступенем надійності і оперативністю у виявленні аварійних ситуацій.

Як відомо, взаємодія нейтронного потоку з оболонкою ТВЕЛ, викликає корозійні процеси на її поверхні з утворенням локальних неоднорідностей. В роботі, запропоновано для моделювання процесів, що відбуваються в структурі зовнішньої і внутрішньої поверхонь оболонки ТВЕЛ при розгерметизації, використовувати апарат фрактально-кластерної геометрії. Розроблена на цій основі фізична модель описує процеси утворення неоднорідностей, нанопор і мікротріщин в структурі оболонки ТВЕЛ. У роботі представлена вдосконалена методика контролю динаміки порушення герметичності ТВЕЛ на більш ранній часовій стадії у порівнянні зі штатною методикою і яка дозволяє оперативно обробити отримані дані в системі КГО і своєчасно запобігти аварійним ситуаціям, тим самим підвищити надійність при експлуатації технологічного обладнання ядерного реактору на АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При експлуатації ядерних реакторів атомної електростанції, згідно з вимогами МАГАТЕ [1], необхідно забезпечити необхідний рівень безпеки. Одним з напрямків підвищення рівня без-небезпеки ядерного реактора АЕС є контроль герметичності тепловиділяючих елементів [2].

Основними характеристиками стану ТВЕЛ, обумовленими при експлуатаційному аналізі, є його геометрична стійкість і механічна міцність структури оболонки ТВЕЛ [3, 4].

Грунтуючись на цих властивостях, можна установити початок незворотного процесу зміни фізико-хімічних властивостей структури оболонки ТВЕЛ і обґрунтувати динаміку її руйнування. Як встановлено зарубіжними і вітчизняними дослідниками [3, 4], в даний час безаварійна експлуатація ТВЕЛ проводиться при розпухання структури оболонки ТВЕЛ до 15 %.

Таким чином, критерій залишкового ресурсу, ґрунтується лише на даних межі короткочасної міцності структури оболонок ТВЕЛ, без урахування доз опромінення.

Тому, проблема визначення терміну експлуатації ТВЕЛ при високих ушкоджуючих дозах, не пов'язана з межею міцності, є актуальною.

Мета статті є аналіз і прогнозування чинників безпеки при протіканні процесів, що відбуваються в структурі оболонки ТВЕЛ при їх експлуатації і визначенні критерію оцінки працездатності матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Основні матеріали дослідження. До факторів пошкоджуваності матеріалів оболонок ТВЕЛ, що призводять до зміни фізико-хімічних властивостей і геометричної нестабільності оболонки ТВЕЛ, відносяться процеси накопичення пошкоджень в оболонках ТВЕЛ в умовах механічної взаємодії пучка ТВЕЛ з чохлам тепловиділяючої збірки (ТВЗ).

Як відомо [5], в області високих пошкоджуючих доз (80 ... 90 сна), незначне накопичення пошкоджуючої дози призводить до значної зміни геометричної структури оболонки ТВЕЛ для типу сталі ЕП-172.

Крім того, можна припустити, що пошкодження матеріалу, що впливають на зміну форми оболонки, накопичуються не тільки під впливом потоку нейтронів високих енергій, а й в результаті взаємодії ядерного палива з оболонкою ТВЕЛ.

Також дослідження ТВЕЛ ядерного реактора АЕС, які пройшли опромінення до високих пошкоджуючих доз, показали [5], що зміна форми ТВЕЛ пов'язана не тільки зі зміною об'єму оболонки (розпухання), але також і з радіаційною ползучістю. Показано, що при опроміненні оболонки ТВЕЛ пошкоджуючою дозою рівня 120 сна, її структура може набувати локальну овалізацію.

Причиною виникнення овалізації є пластична деформація оболонок ТВЕЛ, що виникає через механічні взаємодії ТВЕЛів один з одним через дистанційную дрот в результаті обмеження деформації пучка ТВЕЛів з боку розпухаючого чохла тепловиділяючої збірки з ферритно-мартенситної сталі.

Таке порушення геометричних розмірів ТВЕЛ є причиною зміни температурного режиму їх експлуатації і, відповідно фактором накопичення пошкоджень. Оскільки оболонка ТВЕЛ в тепловиділяючій збірці знаходиться в напруженому стані, то однією з причин розгерметизації ТВЕЛ, тобто виникнення глибоких пір і мікротріщин, є корозійне розтріскування оболонок під напругою в середовищі корозійно-активних продуктів поділу ядерного палива.

Ризик розвитку тріщин в оболонці ТВЕЛ, в активній зоні ядерного реактора АЕС при експлуатації герметичних ТВЕЛів, може привести до критичних значень розпухання, що перевищує 12 %.

Таким чином, втрата геометричної стабільності оболонок ТВЕЛів визначається не тільки розпуханням, але також глибиною вигорання палива і взаємодією ТВЕЛів один з одним через дистанційную дрот внаслідок обмеження деформації пучка ТВЕЛів зі сторони не розпухаючого чохла ТВЗ.

У роботах [3, 4, 5] показано, що втрата пластичності і міцності матеріалу пов'язана з розвитком корозійного розтріскування внутрішньої поверхні оболонок під напругою.

Проведений аналіз розподілу параметрів експлуатації (лінійної потужності, вигорання, температури і пошкоджуючої дози) по довжині досліджуваних ТВЕЛ, показав можливість визначення геометричних розмірів оболонок ТВЕЛів:

- вимір зовнішнього діаметра оболонок по висоті ТВЕЛ;
- вимір овалізації оболонок на різних ділянках;
- визначення профілю поперечного перерізу оболонок;
- визначення дозових і температурних залежностей і параметрів розпухання оболонок ТВЕЛ.

Для контролю оболонок ТВЕЛ використовуються наступні методи:

- метод імпульсної вихрострумової дефектоскопії для визначення стану оболонок (наявність і локалізація дефектів, аномальних областей) і встановлення областей контакту палива з оболонкою;

- метод гамма-спектрометричних досліджень для визначення радіоактивного нуклідного складу гамма-випромінювачів на різних ділянках поверхні ТВЕЛ і встановлення просторових розподілів активності радіаційних продуктів поділу;

- метод ультразвукової резонансної спектроскопії для вимірювання ультразвукових резонансних частот поздовжніх та поперечних коливань в зразку оболонок ТВЕЛ і розрахунку модуля Юнга і модуля зсуву за значеннями частот поздовжніх і поперечних коливань;

- метод електронної мікроскопії для визначення структурного стану зразків оболонок ТВЕЛ і встановлення областей мікронесплошностей матеріалу;

- гідростатичного зважування для вимірювання щільності зразка з розрахунку об'єму витісненої рідини.

Розглянуті вище методи контролю оболонок ТВЕЛ дозволяють вимірювати геометричні розміри ТВЕЛів, визначати їх герметичність, виявляти розподіл продуктів поділу та наявність дефектів і області локалізації ушкоджень оболонок ТВЕЛ.

Для кожної мікроструктури можлива побудова гістограми розподілу пор за розмірами, які дають можливість розрахувати щільність пор і їх середній діаметр. Аналіз гістограм показує, що з ростом пошкоджуючої дози об'ємна частка пор (пористість) збільшується за рахунок збільшення розміру пор.

При дослідженні мікроструктур оболонок ТВЕЛ виявлені сформувалися ланцюжки вакансійних пор.

Крім того, розподіл пор за розмірами показує, що об'ємна частка пор, при якій спостерігаються ланцюжки в структурі матеріалу оболонок ТВЕЛ, становить 17 %. Однак, формування таких ланцюжків має випадковий характер. Наприклад, в області ушкодження доз 70...90 сна спостерігається різкий спад "ефективної жорсткості" кристалічної решітки, який пов'язаний з формуванням ланцюжків випадково збудованих пор.

Таким чином, показано, що формування ланцюжків випадково збудованих пор є причиною різкого зниження швидкості ультразвукової хвилі і деградації "ефективної жорсткості" кристалічної решітки.

"Ефективна жорсткість" кристалічної решітки в пористому матеріалі може бути також розрахована за значеннями модулів пружності, обчислених в рамках наближення ефективного середовища до критичної пористості.

Критична пористість – параметр неоднорідності матеріалу, який визначає початок деградації "ефективної жорсткості" кристалічної решітки матеріалу оболонок ТВЕЛ. Згідно з результатами аналізу розподілу пор за розмірами ланцюжка випадково збудованих пор в структурі матеріалу виникають при значенні пористості ~ 17 % при дозі опромінення, яка дорівнює 70 сна. Розвиток мікротріщин на внутрішній поверхні оболонок ТВЕЛ відбувається в результаті впливу палива та інших чинників прискореного накопичення пошкоджень.

Крім того, дослідження процесу розвитку мікротріщин на внутрішній поверхні оболонок ТВЕЛ, дозволило виявити закономірності поведінки Реальні показники можуть відрізнятися ТВЕЛ, що характеризують його працездатність, при досягненні високих пошкоджень доз (ВПЗ), і отримані аналітичні залежності, які описують поведінку параметрів оболонок ТВЕЛ перед руйнуванням при опроміненні до ВПЗ .

Одним з факторів зміни структури оболонок ТВЕЛ при високодозійному нейтронному опроміненні в реакторах на швидких нейтронах, є облік параметра, який визначає прохідний перетин теплоносія, від якого, в свою чергу, залежить температурний режим експлуатації ТВЕЛ. При цьому механічні напруги, що виникають на внутрішній поверхні оболонок ТВЕЛ, в області зменшеного діаметра оболонок набувають розтягуючий характер. Одночасний вплив різних фак-

торів в області дії розтягуючих напружень призводить до прискореного накопичення пошкоджень.

Одним з найбільш важливих факторів, що впливають на безпеку при експлуатації ТВЕЛ, є хімічна взаємодія корозійно-активними продуктами поділу палива (Cs, I, Te) з оболонкою ТВЕЛ.

Продукти поділу створюють активне середовище для розвитку корозійного розтріскування внутрішньої поверхні оболонки ТВЕЛ, яка перебуває під впливом напруг, що розтягують. Локалізація корозійно-активних продуктів поділу в місцях овалізації оболонки підтверджена шляхом дослідження їх розподілу по довжині ТВЕЛ.

Це означає, що в областях овалізації оболонки ТВЕЛ йде процес накопичення корозійно-активних продуктів поділу. Причина такого процесу може бути пов'язана з локальними температурними флуктуаціями. В атмосфері корозійно-активних продуктів поділу в області високих розтягуючих напруг це веде до прискореного накопичення пошкоджень і до розтріскування оболонки.

Виявити розподіл пошкоджень оболонки по висоті герметичного ТВЕЛ дозволяє метод імпульсної вихрострумової дефектоскопії, який дозволяє на внутрішній поверхні оболонки в області зіткнення оболонки ТВЕЛ з дистанційним дротом, виявити присутність глибокої тріщини. Сама оболонка ТВЕЛ, в цих областях пластично деформована.

Таким чином, можна зробити припущення, що в областях овалізації відбувається прискорене накопичення пошкоджень оболонки, викликані накопиченням корозійно-активних продуктів поділу. При тривалій експлуатації ТВЕЛ зазначені uszkodження можуть призводити до його руйнування.

Отже, для визначення умов розгерметизації, пов'язаних з овалізацією оболонки ТВЕЛ, необхідно виробити критерій, що обмежує тривалість експлуатації ТВЕЛ тепловиділяючої збірки, в момент зіткнення пучка ТВЕЛ з чохлам. При цьому запропоновано, розрахунок розпухання матеріалу оболонки ТВЕЛ проводити в наближенні лінійної залежності відносної зміни об'єму оболонки ТВЕЛ від пошкоджуючої дози. В якості вихідних даних для розрахунку розпухання матеріалу можна використовувати параметри опромінення ТВЕЛ (розподіл пошкоджуючої дози, вигорання, температури по висоті ТВЕЛ та ін.).

Розрахунок зміни діаметра ТВЕЛ проведено з урахуванням тиску газоподібних продуктів поділу та механічної взаємодії палива з оболонкою, відповідних позаштатним параметрам експлуатації ТВЕЛ тепловиділяючої збірки ядерного реактора АЕС.

Таким чином, показано, що для оцінки працездатності ТВЕЛ тепловиділяючої збірки ядерного реактора АЕС, необхідно враховувати механічну взаємодію пучка ТВЕЛ з чохлам збірки, яка призводить до овалізації оболонки. Розраховані значення напруги, що виникають на внутрішній і зовнішній поверхні оболонки ТВЕЛ показали, що середній внутрішній тиск не перевищує межі міцності для матеріалу оболонки зі сталі.

Висновки. З наведеного матеріалу витікає:

1. На Основі аналізу і прогнозування виділено фактори, що визначають процес руйнування геомет-

ричної структури оболонок ТВЕЛ тепловиділяючої збірки, які впливають на безпеку при експлуатації ядерного реактора АЕС.

2. Для опису процесу розгерметизації ТВЕЛ необхідно розробити модель опису фізико-хімічних процесів, що відбуваються у внутрішній структурі оболонок ТВЕЛ при її руйнуванні.

Список використаних джерел

1. Самойлов О. Б., Кайдалов В. Б., Кууль В. С. Результаты эксплуатации ТВСА на АЭС с ВВЭР-1000. Труды 4-й Междунар. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". 2005. С. 15-19.

2. Коновалов И. И., Чуев В. В., Митюрёв К. В. Выявление факторов ускоренного накопления поврежденных в оболочках ТВЭЛов, облученных в реакторе БН-600, неразрушающими методами контроля. *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2011. № 2. С. 171-180.

3. Воробьев Ю. Ю., Жабин О. И. Оценка применимости модели деформации оболочек ТВЭЛов для топлива реакторов ВВЭР-1000. *Ядерная та радіаційна безпека*. 2015. № 3. С. 3-7.

4. Семишкин В. П. Расчетно-экспериментальные методы обоснования поведения ТВЭЛов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из первого контура РУ: автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2007. 48 с.

5. Коновалов И. И., Митюрёв К. В., Попов В. В., Ганина С. М. Влияние изменения геометрии ТВЭЛов, облученных в реакторе БН-600, на их ресурс при повышенных выгораниях. *Труды XXI Междунар. конф. "Радиационная физика твердого тела"* (Севастополь, 22-27 августа 2011 г.). Т. 2. С. 456-457.

Аннотация

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Буданов П. Ф., Бровко К. Ю., Хомяк Э. А.

Проведен анализ факторов, влияющих на повышение безопасности при эксплуатации тепловыделяющих элементов тепловыделяющих сборок ядерного реактора атомной электростанции.

Abstract

ANALYSIS OF SAFETY FACTORS WHEN OPERATING THE HEATING FUEL ELEMENTS OF NUCLEAR REACTORS OF A NUCLEAR POWER PLANT

P. Budanov, K. Brovko, E. Khom`iak

The analysis of factors affecting the improvement of safety during operation of the fuel elements of the fuel assemblies of a nuclear reactor of a nuclear power plant is carried out.