

С. М. Пелих¹, М. В. Максимов¹, С. Д. Рябчиков²¹ Одеський національний політехнічний університет, Одеса² Харківський фізико-технічний інститут, Харків**АНАЛІЗ ПОШКОДЖУВАНOSTI ОБОЛОНОК ТВЕЛІВ,
ЩО ВРАХОВУЄ НЕОДНОРІДНІСТЬ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ
В ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЗБІРКАХ**

Розроблено метод прогнозування розгерметизації оболонок твेलів реактора типу ВВЕР-1000 за механізмом накопичення деформаційної пошкоджуваності оболонок, що враховує для кожної тепловиділяючої збірки (ТВЗ) історію навантаження і неоднорідність розподілу енерговиділення серед твेलів. При чотиригруповій моделі розподілу пошкоджуваності максимальна величина пошкоджуваності, що досягається в чотиригруповому паливному циклі, збільшується в порівнянні з одногруповою моделлю приблизно у два рази. Знайдено алгоритм перестановок ТВЗ, для якого перевищуються гранична величина параметра пошкоджуваності і межа безпечної експлуатації реактора. Показано, що величина параметра пошкоджуваності відіграє істотну обмежуючу роль при оцінці граничного стану оболонок. Виведено умову допустимості алгоритму перестановок ТВЗ і критерій мінімальності ймовірності розгерметизації оболонок, які можна використовувати в автоматизованій системі забезпечення герметичності оболонок твелів ВВЕР-1000.

Ключові слова: ВВЕР-1000, оболонка твела, критерій мінімальності ймовірності розгерметизації оболонок.

Вступ

Для приведення якості електроенергії в енергосистемі України у відповідність до якості електроенергії в енергосистемі Об'єднаної Європи існує необхідність адаптації енергоблоків АЕС до специфічних умов їхньої роботи. Ці умови полягають у тому, що якщо сумарна частка вироблення електроенергії в енергосистемі на АЕС знаходиться в межах 25 - 50 % і відбувається скорочення частки енергетичних установок, які працюють у напівпіковому режимі, то виникає невідповідність між виробленням і споживанням електроенергії в системі. Ця ситуація істотно загострюється, якщо частка вироблення електроенергії в енергосистемі на АЕС перевищує 50 %. Тому необхідно враховувати специфічну експлуатацію АЕС України в перехідному режимі з постійним циклічним розвантаженням її потужності протягом нічного часу і завантаженням у денний.

Такі умови роботи АЕС в енергосистемі призводять до багаторазового перерозподілу енерговиділення в активній зоні (а.з.) з причини виникаючих ксенонівих коливань, унаслідок чого виникають термоциклічні навантаження, що впливають на циклічну втому матеріалу і пластичну деформацію оболонки твелів. Додаткові термоциклічні навантаження виникають у ТВЗ, що знаходяться під регулюванням, унаслідок постійного переміщення стрижнів органів регулювання у протилежних напрямках для підтримки нормативного значення аксіального офсету, що є

невід'ємним для підтримки ядерної енергетичної установки (ЯЕУ) у стійкому стані. Більше того, термоциклічні навантаження виникають у ТВЗ першого і другого радіальних рядів, розташованих навколо ТВЗ, яка знаходиться під регулюванням.

Одним з основних елементів обладнання ЯЕУ, який забезпечує межу безпечної експлуатації при циклічному режимі роботи в постійному перехідному процесі, є оболонка твелів. Межа безпечної експлуатації регламентується кількістю твелів, що розгерметизовано від їхньої загальної кількості в а.з.: 1 % як газова нещільність і 0,1 % як прямий контакт паливної матриці з теплоносієм.

Розробка методу аналізу пошкоджуваності оболонок твелів реактора типу ВВЕР-1000 для України актуальна й обумовлена тим, що в найближчі 10 - 15 років такі ЯЕУ будуть забезпечувати понад 50 % генерації електроенергії. Метою даної статті є розробка методу оцінки пошкодження оболонок твелів у нормальних умовах експлуатації ВВЕР-1000 на основі врахування неоднорідності розподілу енерговиділення твелів ТВЗ і факторів, що визначають ушкодження.

Розглянемо прогнозування розгерметизації оболонок твелів унаслідок збільшення параметра деформаційної пошкоджуваності оболонок твелів $\omega(\tau)$ у змінному режимі навантаження ЯЕУ. При перехідному режимі експлуатації в оболонці одночасно накопичуються пошкодження, які характеризуються параметром квазістатичної

© С. М. Пелих, М. В. Максимов, С. Д. Рябчиков, 2016

пошкоджуваності матеріалу оболонки $\omega_{cr} = \int_0^{\tau} dt/t^{\lim}$, обумовленої тривалими повільно змінними напруженнями, і пошкодження, які характеризуються параметром пошкоджуваності від втоми $\omega_{vt} = \sum_i n_i/n_i^{\lim}$, обумовленої циклічними непружними деформаціями. При накопиченні таких пошкоджень граничний стан визначається їхньою сумою [1] і є основою нормативного критерію з міцності SC4 [2, 3]:

$$\omega(\tau) = \int_0^{\tau} dt/t^{\lim} + \sum_i n_i/n_i^{\lim} < 1/K_{SC4}, \quad (1)$$

де t – час; t^{\lim} – гранична тривалість експлуатації оболонки до руйнування від повзучості при номінальному рівні потужності в стаціонарних умовах; n_i і n_i^{\lim} – кількість і гранично допустима кількість циклів змінного навантаження i -го типу відповідно; $K_{SC4} = 10$ – нормативний коефіцієнт запасу.

При розрахунку $\omega(\tau)$ за виразом (1) після чотирьох років експлуатації оболонки за добовими циклами навантаження ВВЕР-1000 значення другого з доданків приблизно в 5 разів перевищує перший [4]. Це суперечить експериментальним даним [5, 6] про переважний внесок повзучості у збільшення параметра $\omega(\tau)$ при частоті навантаження циліндричної оболонки $\nu \ll 1$ Гц, що показує неадекватність критерію SC4 реальному процесові.

Неадекватність SC4 може бути пояснена тим, що в експериментах [1 - 3] для прискорення циклічного навантаження оболонки твела збільшували інтенсивність опромінення і частоту навантаження оболонки. Така дія змінювала механізм руйнування оболонки з огляду на те, що при $\nu \geq 1$ основний фізичний процес накопичення деформаційних пошкоджень у циліндричній оболонці – втома, тоді як при $\nu \ll 1$ – повзучість [7].

Моделі розрахунку параметра деформаційної пошкоджуваності оболонки за критерієм SC4 властивий високий ступінь неоднозначності через відсутність урахування повзучості як фізичного процесу, який визначає накопичення деформаційних пошкоджень в оболонці при $\nu \ll 1$ Гц, що обумовлено рівноцінністю доданків у виразі (1) [8]. Крім того, у такій моделі розрахунку параметра деформаційної пошкоджуваності оболонки відсутнє врахування впливу умов експлуатації і послідовності навантаження оболонки, таких як послідовність перестановок ТВЗ,

флюєнс і спектр нейтронів, тиск газів під оболонкою, зміна температури теплоносія, розміщення та амплітуди переміщення органів регулювання, параметри циклу навантаження ЯЕУ [9].

Зважаючи на невизначеність моделі (1), її неможливо використовувати для прогнозування розгерметизації оболонок твелів за механізмом накопичення деформаційної пошкоджуваності у змінному режимі навантаження. Тому поширене обґрунтування, що величина $\omega(\tau)$ не лімітує довговічність твелів у циклічних навантаженнях, і основною умовою відсутності деформаційної розгерметизації оболонок є неперевикнення граничної величини для окружних напружень [4] $\sigma_e(\tau) < 250/K_{SC1}$, МПа, де $K_{SC1} = 1,2$ – нормативний коефіцієнт запасу.

Розрахунок зміни окружних напружень від часу, який застосовується в даний час при обґрунтуванні довговічності оболонок твелів у циклічних режимах [10], має той недолік, що розрахункова величина усередненого по аксіальному сегменту оболонки значення окружного напруження не відображає змішаний механізм протікання процесу повзучості в оболонці [1].

Оскільки розвиток деформації повзучості за змішаним механізмом описується на основі зміни величини еквівалентної напруги $\sigma_e(\tau)$ [1], для врахування переважаючого вкладу процесу повзучості в накопичення $\omega(\tau)$ при $\nu \ll 1$ Гц доцільно використовувати метод розрахунку $\omega(\tau)$ на основі енергетичного варіанта теорії повзучості (ЕВТП-метод). Відповідно до цього методу $\omega(\tau)$ розраховується як інтегральна функція від добутку еквівалентної напруги $\sigma_e(\tau)$ (Па) і похідної за часом від еквівалентної деформації повзучості $\dot{p}_e(\tau)$ (с⁻¹) [11]:

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0 < \frac{1}{K_{SC4}},$$

$$A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau; A_0 = \text{const}; \nu \ll 1 \text{ Гц}, \quad (2)$$

де $A(\tau)$, A_0 – питома енергія розсіювання (Дж/м³) у момент часу τ і при руйнуванні оболонки в момент τ_0 відповідно; A_0 не залежить від історії навантаження твела, визначається за умовою $\lim_{\tau \rightarrow \tau_0} (A(\tau) / d\tau)^{-1} \rightarrow 0$ [11]. Розрахунок A_0 проводиться при застосуванні верифікованого програмного засобу, призначеного для аналізу динамічної зміни властивостей ядерного палива [12].

Визначення розгерметизованих оболонок твелів ВВЕР-1000

Розглянутий метод визначення розгерметизованих оболонок твелів ВВЕР-1000 складається з семи етапів. На першому етапі визначаються початкові дані, до яких належать: алгоритм регулювання потужності а.з. і статична програма регулювання, які визначають номери комірок а.з., в яких розміщені органи регулювання, та зміну температури теплоносія і положення органів регулювання; конструкційні параметри твела, ТВЗ і а.з.; модель перестановок ТВЗ; розподіл шлаків в а.з. на початок кожної кампанії.

На другому етапі визначаються довжина одного аксіального сегмента твела і кількість умовно виділених груп твелів для кожної ТВЗ. Ці характеристики залежать від ступеня дискретизації розподілу твелів за коефіцієнтом об'ємної нерівномірності енерговиділення в аксіальних сегментах твелів.

На третьому етапі обраним розрахунковим програмним засобом розраховуються потужність ЯЕУ і коефіцієнти об'ємної нерівномірності енерговиділення. Для статичної програми регулювання розраховуються поточна потужність і коефіцієнти об'ємної нерівномірності енерговиділення $k_{v,i,j}$ для всіх аксіальних сегментів, що розташовані в секторі а.з., який розглядається (де i – номер аксіального сегмента, j – номер комірки а.з.).

На четвертому етапі здійснюється розподіл твелів кожної ТВЗ на умовно виділені чотири групи за значенням величини $k_{v,i,j}$ в максимально енергонапруженому аксіальному сегменті твела, виходячи з граничних значень $k_{v,i,j}$ в кожній групі.

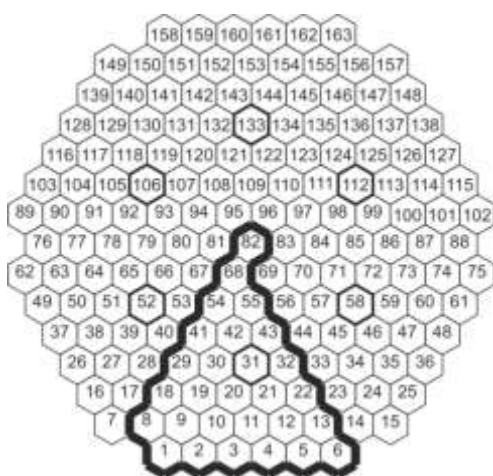


Рис. 1. Сектор симетрії а.з.: число – номер комірки.

На п'ятому етапі вводяться консервативні групи I*...IV* твелів з метою забезпечення для кожної перестановки ТВЗ постійної кількості твелів кожної групи, для визначення найгіршого з можливих алгоритмів навантаження твелів. Формування консервативних груп здійснюється на основі консервативного заповнення вакансій твелами з умовно виділених груп, з урахуванням частки твелів кожної з чотирьох виділених груп.

На шостому етапі, використовуючи ЕВП-метод, розраховують $\omega(\tau)$ у максимально навантаженому аксіальному сегменті оболонки для консервативних груп твелів та всіх можливих перестановок ТВЗ, здійснюючи перевірку поточного значення $\omega(\tau)$, яке має бути менше гранично допустимої величини параметра пошкоджуваності ω^{lim} .

На сьомому етапі проводиться аналіз значень параметра пошкоджуваності. У разі $\omega(\tau) > \omega^{lim}$ для будь-якої із чотирьох консервативних груп твелів будь-якої перестановки ТВЗ, для будь-якого алгоритму перестановок розраховується прогнозована кількість розгерметизованих оболонок. Виходячи з нормативної межі безпечної експлуатації твелів, робиться висновок про допустимість даного алгоритму.

Дані для моделі розрахунку пошкоджуваності

Для розрахунку $\omega(\tau)$ приймалися режимні й конструктивні параметри твелів, ТВЗ і ЯЕУ відповідно до проектних характеристик [13], і розрахунок здійснювався для заданих алгоритмів перестановок ТВЗ у секторі симетрії а.з., межі якого показано на рис. 1.

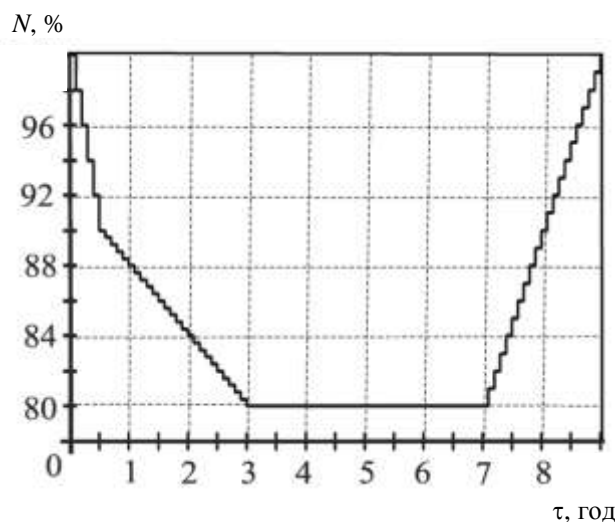


Рис. 2. Зміна потужності ЯЕУ залежно від часу.

Було прийнято схему розміщення в а.з. органів регулювання, яка використовувалась для У-алгоритму, що дає стабільний аксіальний офсет. Для регулювання офсету використовується тільки 10-а група органів регулювання. Шість комірок а.з., в яких розміщені стрижні органів

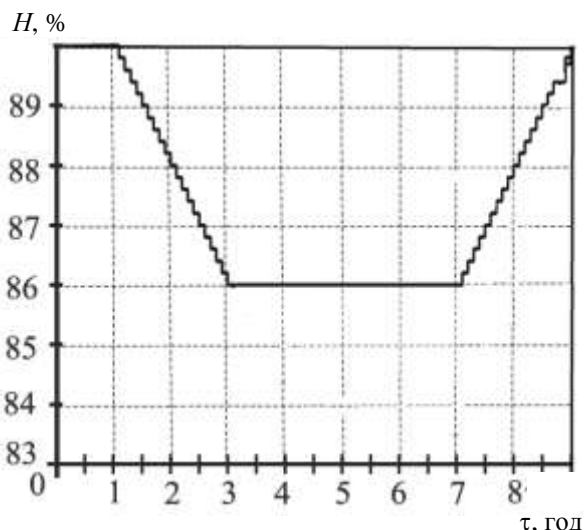


Рис. 3. Зміна положення стрижнів 10-ї групи органів регулювання залежно від часу.

Зміна потужності ЯЕУ здійснюється за програмою регулювання $t_{вх} = \text{const}$ [15], вхідна температура теплоносія стабілізується на величині $t_{вх} = 287^\circ\text{C}$ за рахунок зміни тиску пари в головному паровому колекторі. Для моделювання приймався розподіл шлаків в а.з. на початок 5-ї кампанії 2-го енергоблока ХАЕС.

У межах сектора симетрії а.з. розподіл ТВЗ кожного року чотирирічної паливної кампанії по комірках а.з. приймався за [16]. На рис. 4 римськими та арабськими цифрами показано роки паливної кампанії та номери комірок а.з. відповідно.

Модель розрахунку розподілу енерговиділення у твелах заснована на двогруповому дифузійному наближенні нейтронного поля в а.з. ВВЕР-1000 [12].

Формування матриці коефіцієнтів $k_{v,i,j}$ та вибір програмного засобу

Для формування матриці коефіцієнтів профілю енерговиділення $k_{v,i,j}$ довжина кожного твела була поділена на вісім аксіальних сегментів, їхня нумерація приймалася від низу а.з. Розрахунковою коміркою (i, j) вважався i -й аксіальний сегмент j -ї комірки а.з. Профіль енерговиділення в кожному твелі визначався шляхом розрахунку $k_{v,i,j}$ у восьми аксіальних сегментах для 27 комірок сектора симетрії, зазначених на рис. 4. Розподіл енерговиділення серед твелів ТВЗ вра-

регулювання, показано на рис. 1 товстими лініями [14]. Зміна потужності N ЯЕУ і координати H нижнього краю стрижнів органів регулювання залежно від часу для добової зміни потужності приймалася за залежностями, показаними на рис. 2 та 3.



Рис. 4. Схема розподілу ТВЗ по комірках.

ховувався виділенням чотирьох груп твелів, кожна з яких характеризується усередненими по групі коефіцієнтами $k_{v,i,j}$. Розмірність матриці коефіцієнтів $k_{v,i,j}$ складала: $4 \times 8 \times 27$.

Було використано верифіковані програмні засоби «Імітатор реактора» (IP) [17], «Femaxi» [18] та «ANC-N» [19] для розрахунку коефіцієнтів $k_{v,i,j}$ усередненого за ТВЗ твела, еволюції напруг і деформацій в оболонках твелів та коефіцієнтів $k_{v,i,j}$ з урахуванням неоднорідності розподілу енерговиділення серед твелів ТВЗ відповідно.

Для розрахунку напружень та деформацій в оболонках твелів у програмі «Femaxi» для центральної точки кожного з аксіальних сегментів задавалася своя лінійна потужність, пропорційна потужності реакторної установки. Кожен стовп паливних таблеток та кожна оболонка дискретизувались у циліндричній геометрії за допомогою кільцевих елементів. Кількість радіальних розрахункових ланок задавалася 10 і 4 для таблеток і оболонки відповідно, де дві внутрішні ділянки оболонки моделюють її матеріал, а дві зовнішні — шар окислу цирконію. Аналіз напружень та деформацій виконувався з використанням методу кінцевих елементів, де чотирикутний елемент має чотири виміри свободи. Швидкість еквівалентної деформації повзучості $\dot{p}_e(\tau)$ оболонки була записана у вигляді функції від тангенціальної напруги в оболонці, температури оболонки і по-

току швидких ($E > 1$ MeV) нейтронів. Розрахунок характеристик теплопередачі та напружень здійснювався через цикл збіжності [9].

Розбиття твелів на чотири умовні групи

Розрахунок коефіцієнтів $k_{v,i,j}$ здійснювався при рівнях потужності 100 і 80 % для чотирьох умовних груп твелів ТВЗ всіх комірок сектора симетрії а.з. за допомогою тривимірного двогрупового дифузійного нодального програмного засобу ANC-H. Енерговиділення кожного твела відновлювалося за допомогою поправочних коефіцієнтів до гомогенізованих перетинів. У розрахунковій моделі ТВЗ, яка була формалізована в нодальному уявленні, виділявся один нод для радіального напрямку і 24 ноди для аксіального. У подальшому аксіальний напрямок усереднювався до 8-ми сегментів.

Для кожної ТВЗ твели групувалися за величиною $k_{v,i,j}$ в максимально енергонапруженому i -му аксіальному сегменті за таких умов:

- перша група (I) $k_{v,max,i,j} \in [0,4...1]$;
- друга група (II) $k_{v,max,i,j} \in [1...1,2]$;
- третя група (III) $k_{v,max,i,j} \in [1,2...1,4]$;
- четверта група (IV) $k_{v,max,i,j} \in [1,4...1,7]$.

Щоб оцінити похибку проведеного групування для кожної ТВЗ, що знаходяться в комірках 2...5, 9, 13, 55, для чотирьох умовних груп твелів отримані коефіцієнти $k_{v,max,i,j}$ (ANC-H), які усереднювалися для кожної групи:

$$k_{v,max,i,j} \text{ (ANC-H)} = \sum_{m=1}^4 (k_{v,max,i,j,m} \times n_{j,m}) / 312, \quad (3)$$

де $n_{j,m}$ – кількість твелів групи m у ТВЗ, розміщеної в комірці j .

Отримані за виразом (3) значення порівнювалися зі значеннями, отриманими за допомогою програмного засобу IP. Усереднене відношення для розглянутих ТВЗ становило $k_{v,max,i,j}$ (ANC-H) / $k_{v,max,i,j}$ (IP) $\approx 1,07$. Така величина демонструє прийнятну величину похибки дискретизації розподілу твелів у виділених чотирьох умовних групах.

Формування віртуальних наведених груп твелів

Для ілюстрації формування віртуальних наведених груп твелів розглянемо два алгоритми А і Б типових перестановок ТВЗ. Початкові розрахункові характеристики за прийнятими перестановками ТВЗ наведено в табл. 1.

Таблиця 1. Характеристики алгоритмів перестановок А і Б

Алгоритм	Перестановка	$A(\tau)$, МДж/м ³	$\omega(\tau)$, %
А	5-30-10-43	1,838	3,342
	9-11-20-1	1,443	2,624
	3-22-54-29	1,843	3,351
	13-19-21-42	2,652	4,822
	2-31-18	1,209	2,198
	55-41-12-6	1,955	3,555
Б	4-32-68-8	1,368	2,487
	55-11-18-43	1,568	2,851
	13-32-20	2,019	3,671
	3-31-10-8	1,816	3,302
	9-19-68-42	2,054	3,735
	4-41-12-29	1,935	3,518
	2-30-21-6	1,522	2,767
	5-22-54-1	1,238	2,251

Для перестановки 5-30-10-43 алгоритму А розподіл твелів по умовних групах наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Розподіл твелів по умовно виділених групах

Група	Комірка 5	Комірка 30	Комірка 10	Комірка 43
I	108	0	0	226
II	54	2	17	86
III	75	61	295	0
IV	75	249	0	0

Кількість твелів у кожній з чотирьох умовно виділених груп змінюється при перестановках ТВЗ по комірках а.з. Для кількості твелів $n_{k,j}$ групи k в ТВЗ, розміщеній в j -й комірці сектора симетрії а.з. (див. табл. 2), справедливе зауваження: коли $j = var$, то $n_{k,j} = var$.

Для виключення невизначеності розподілу твелів по групах було введено консервативні групи твелів I*...IV*, які формуються за такими умовами: кількість твелів у кожній віртуальній наведеній групі постійна при перестановках ТВЗ з однієї комірки а.з. в іншу; коефіцієнти питомого об'ємного енерговиділення для кожної консервативної групи твелів розраховуються з частки твелів кожної умовної групи в комірці а.з.; заповнення вакансій для кожної консервативної групи здійснюється за консервативним принципом твелями з більшою енергонапруженістю.

Розподіл твелів з умовно виділених чотирьох груп по консервативних групах I*...IV* в ТВЗ, переміщеній протягом чотирирічної паливної кампанії послідовно в комірці 5, 30, 10 і 43, проілюстровано на рис. 5.

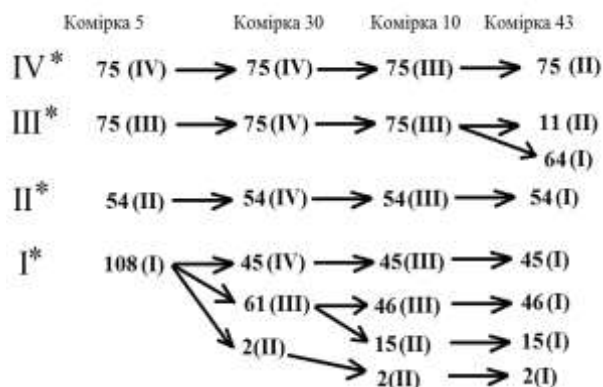


Рис. 5. Розподіл твєлів консервативних груп I*...IV* перестановки 5-30-10-43.

При цьому для перестановки 5-30-10-43 у консервативних групах I*...IV* виконуються рівності: $n_j^{I*} = \text{const} = 108$, $n_j^{II*} = \text{const} = 54$, $n_j^{III*} = \text{const} = 75$, $n_j^{IV*} = \text{const} = 75$, де $j = \{5, 3, 10, 43\}$. На підставі розподілу твєлів по групах I*...IV* отримано коефіцієнти об'ємної нерівномірності енерговиділення $k_{v,i,j}^{I*}...k_{v,i,j}^{IV*}$ для консервативних груп твєлів перестановки 5-30-10-43 алгоритму А (табл. 3).

Таблиця 3. Коефіцієнти $k_{v,i,j}^{I*}$, $k_{v,i,j}^{II*}$, $k_{v,i,j}^{III*}$, $k_{v,i,j}^{IV*}$ для груп твєлів I*...IV*

Комірка	Група I*, $n^{I*} = 108$	Група II*, $n^{II*} = 54$	Група III*, $n^{III*} = 75$	Група IV*, $n^{IV*} = 75$
$j = 5$	$k_{v,i,5}^{I*}$	$k_{v,i,5}^{II*}$	$k_{v,i,5}^{III*}$	$k_{v,i,5}^{IV*}$
$j = 30$	$(k_{v,i,30}^{II*} \cdot 2 + k_{v,i,30}^{III*} \cdot 61 + k_{v,i,30}^{IV*} \cdot 45) / n^{I*}$	$k_{v,i,30}^{II*}$	$k_{v,i,30}^{III*}$	$k_{v,i,30}^{IV*}$
$j = 10$	$(k_{v,i,10}^{II*} \cdot 17 + k_{v,i,10}^{III*} \cdot 91) / n^{I*}$	$k_{v,i,10}^{II*}$	$k_{v,i,10}^{III*}$	$k_{v,i,10}^{IV*}$
$j = 43$	$k_{v,i,43}^{I*}$	$k_{v,i,43}^{II*}$	$(k_{v,i,43}^{III*} \cdot 11 + k_{v,i,43}^{IV*} \cdot 64) / n^{III*}$	$k_{v,i,43}^{IV*}$

Далі на основі розрахованих коефіцієнтів $k_{v,i,j}^{I*}...k_{v,i,j}^{IV*}$ визначаються величини максимальної лінійної потужності $q_{l,j,\text{max}}$ в j -й комірці а.з. і

аксіальні розподіли $k_{i,j}$, де $k_{i,j} = \langle q_{l,i,j} \rangle / q_{l,j,\text{max}}$ – коефіцієнт відносної потужності (i, j)-комірки (табл. 4 і 5).

Таблиця 4. Значення $q_{l,j,\text{max}}$ для груп твєлів I*...IV* перестановки 5-30-10-43, для рівнів потужності ЯЕУ $N_{100\%}/N_{80\%}$

Група	$q_{l,j,\text{max}}$, Вт/см			
	$j = 5$	$j = 30$	$j = 10$	$j = 43$
I*	120,3/97,73	240,8/193,6	208,9/169,7	159,9/127,9
II*	184,3/147,5	259,3/209,6	211,3/172,8	159,9/127,9
III*	221,4/176,0	259,3/209,6	211,3/172,8	172,0/137,8
IV*	249,7/201,8	259,3/209,6	211,3/172,8	174,1/139,4

Таблиця 5. Аксіальний розподіл $k_{i,j}$ для рівнів потужності ЯЕУ $N_{100\%}/N_{80\%}$

i	$k_{i,j}$ для IV* групи твєлів перестановки 5-30-10-43			
	$j = 5$	$j = 30$	$j = 10$	$j = 43$
1	0,555/0,531	0,619/0,597	0,610/0,584	0,626/0,609
2	0,873/0,848	0,867/0,845	0,866/0,840	0,843/0,830
3	0,966/0,951	0,944/0,933	0,952/0,936	0,925/0,922
4	1,000/0,996	0,988/0,987	0,993/0,988	0,978/0,981
5	0,999/1,000	1,000/1,000	1,000/1,000	1,000/1,000
6	0,955/0,954	0,968/0,940	0,966/0,959	0,975/0,928
7	0,840/0,841	0,853/0,807	0,864/0,858	0,845/0,751
8	0,516/0,522	0,558/0,558	0,587/0,594	0,554/0,546

При $A_0 = 55 \text{ МДж/м}^3$ розраховано значення деформаційної пошкоджуваності в максимально напружених аксіальних сегментах оболонок твेलів перестановки 5-30-10-43 за чотиригруповою (ω_{IV}) та одногруповою (ω_I) моделями. Величина

пошкоджуваності для групи IV* становить 5,889 %, що значно більше значення $\omega_I = 3,342 \%$ для усередненого за ТВЗ твела, тобто для одногрупової моделі (табл. 6).

Таблиця 6. Значення параметра пошкоджуваності для консервативних груп твेलів перестановок 5-30-10-43, 3-22-54-29 та 13-19-21-42

Група	Кількість твелів	$\omega_{IV}, \%$	$\omega_I, \%$
I*	108/67/8	2,154/4,147/1,397	3,342/3,351/4,822
II*	54/28/39	3,599/5,785/4,013	
III*	75/45/55	4,613/6,812/4,713	
IV*	75/172/210	5,889/10,8/7,75	

Дотримуючись викладеного методу, для решти 13 перестановок ТВЗ алгоритмів А і Б отримано розподіл твелів по консервативних групах I*...IV*, для яких також розраховано значення параметра пошкоджуваності. Як приклад, у табл. 6 наведено розрахункові значення пошкоджуваності після чотирирічної паливної кампанії (1460 діб) для консервативних груп твелів перестановок 3-22-54-29 і 13-19-21-42 відповідно до алгоритму А.

Узагальнюючи результати розрахунку пошкоджуваності для всіх перестановок ТВЗ, отримано, що для алгоритмів А і Б при одногруповій моделі значення ω_I знаходяться в діапазоні 2,2...4,82 і 2,25...3,74 % відповідно. При чотиригруповій моделі значення ω_{IV} знаходяться в діапазоні 0,72...10,8 та 0,75...6,16 % відповідно. Таким чином, у порівнянні з одногруповою моделлю максимальна пошкоджуваність оболонки твела для алгоритмів А і Б збільшилася в 2,2 і 1,6 раза.

значається для деформаційної пошкоджуваності на основі нормативного коефіцієнта запасу $K_{SC4} = 10$ [2, 3], тоді як для перестановки 13-19-21-42 ця величина не досягається.

Оскільки для перестановки 3-22-54-29 в консервативній групі IV* міститься 172 твела (див. табл. 6), а для всіх інших перестановок ТВЗ алгоритму А $\omega^{lim} = 10 \%$ не досягається, то у випадку застосування такого алгоритму прогнозована кількість розгерметизованих оболонок в секторі симетрії становитиме 172. Вважаючи наявність в активній зоні шести ідентичних секторів симетрії, для алгоритму А кількість розгерметизованих оболонок становитиме 1032, що перевищить межу безпечної експлуатації, згідно з якою для ВВЕР-1000 допускається не більше, ніж $n^{lim} = 508$ негерметичних оболонок твелів [10]. Для алгоритму Б для жодної перестановки ТВЗ не виявлено перевищення $\omega^{lim} = 10 \%$.

Вплив циклічних навантажень на пошкоджуваність

Циклічні навантаження, під якими розуміється послідовна зміна всієї сукупності експлуатаційних параметрів ТВЗ, істотно впливають на величину $\omega(\tau)$, накопичену після чотирьох років експлуатації ТВЗ в а.з., що призводить до невизначеності моделі розрахунку $\omega(\tau)$ за нормативним критерієм міцності SC4 [11]. Для визначення такого впливу виконано порівняння часових залежностей параметра деформаційної пошкоджуваності оболонок твелів четвертої консервативної групи для перестановок 3-22-54-29, 22-3-29-54 і 54-22-3-29, що мають однакові значення усереднених по чотирьох роках коефіцієнтів $k_{v,i,j}^{IV*}$ і відрізняються тільки історією циклічних навантажень ТВЗ. Отримано, що послідовність комі-

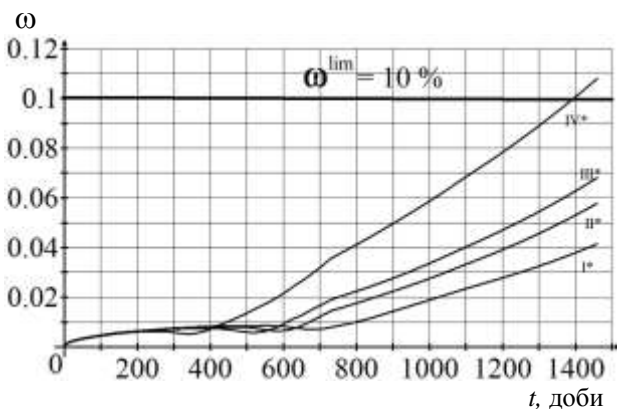


Рис. 6. Залежність пошкоджуваності від часу для перестановки 3-22-54-29 (чотири консервативні групи твелів).

Для перестановки 3-22-54-29 перевищується гранична величина $\omega^{lim} = 10 \%$ (рис. 6), яка ви-

рок а.з., між якими переміщалася ТВЗ протягом чотирирічної кампанії, значно впливає на $\omega(\tau)$: параметр пошкоджуваності для перестановок 3-22-54-29, 22-3-29-54 і 54-22-3-29 становив 10,8, 11,7 і 13 % відповідно.

Аналіз обмежень за критеріями SC1 і SC2

Обґрунтування експлуатації ядерного палива забезпечується нормативними критеріями міцності SC1 і SC2, які відіграють визначальну роль у порівнянні з критерієм міцності SC4, який обмежує величину пошкоджуваності $\omega(\tau)$. Для аналізу обмежень за критеріями SC1 і SC2 було визначено зміну еквівалентної $\sigma_e(\tau)$ і тангенціальної $\sigma_\theta(\tau)$ напруги для IV*-ї консервативної групи твелів при перестановках 3-22-54-29, 13-19-21-42 та 9-11-20-1, що мають найбільші значення $\omega(\tau)$.

Величина $\sigma_\theta(\tau)/250$ МПа для IV*-ї групи твелів перестановок 3-22-54-29, 13-19-21-42 та 9-11-20-1 не перевищує 15, 10 та 11 % відповідно. Розрахувавши відношення еквівалентної напруги $\sigma_e(\tau)$ до межі плинності $\sigma_0(\tau)$ матеріалу оболонки (ціркалой-4), отримано, що величина $\sigma_e/\sigma_0(\tau)$ для IV*-ї групи твелів перестановок 3-22-54-29, 13-19-21-42 та 9-11-20-1 алгоритму А не перевищує 48, 38 та 41 % відповідно.

Згідно з критеріями міцності SC1 та SC2 гранична величина для $\sigma_\theta(\tau)$ і $\sigma_e(\tau)$ відповідно до [2] становить

$$\sigma_\theta^{\text{lim}}(\tau) = 250 \text{ МПа} / K_{\text{SC1}} = 0,83 \cdot 250 \text{ МПа},$$

$$\sigma_e^{\text{lim}}(\tau) = \sigma_0(\tau) / K_{\text{SC2}} = \sigma_0(\tau), \tag{4}$$

де $K_{\text{SC1}} = 1,2$ і $K_{\text{SC2}} = 1$ – коефіцієнти запасу для критеріїв SC1 і SC2 відповідно.

Отже, хоча для IV*-ї групи твелів перестановки 3-22-54-29 гранична величина для параметра пошкоджуваності $\omega^{\text{lim}} = 10\%$ перевищується (див. рис. 6), у той же час немає перевищення граничних величин для $\sigma_\theta(\tau)$ і $\sigma_e(\tau)$. Отриманий результат суперечить даним [4], в яких указано, що величина деформаційної пошкоджуваності не має істотного значення при розрахунку граничного стану твела.

Аналіз невизначеності вхідних параметрів

Прогнозування розгерметизації оболонок доцільно уточнити шляхом урахування невизначеності вхідних параметрів моделі розрахунку $\omega(\tau)$. Основні детермінуючі фактори знайдені для комбінованого циклу змінного навантаження ВВЕР-1000 шляхом визначення усередненої відносної різниці $\delta A_{i,\pm}(\tau)$ між питомою енергією розсіювання $A_{i,\pm}(\tau)$ для набору параметрів $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0} \pm \Delta X_i, \dots, X_{k,0}\}$ і питомою енергією розсіювання $A_B(\tau)$ для базового набору параметрів $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0}, \dots, X_{k,0}\}$:

$$\delta A_{i,\pm}(\tau) = \left(|A_{i,+}(\tau) - A_B(\tau)| + |A_{i,-}(\tau) - A_B(\tau)| \right) / (2 \cdot A_B(\tau) \cdot \Delta X_i), \tag{5}$$

де τ – час (еф. діб); ΔX_i – відхилення i -го змінного параметра, %.

Обчисливши $\delta A_{i,\pm}(\tau)$ для центрального аксіального сегмента середньонавантаженого твела

після експлуатації реакторної установки протягом 1400 еф. діб, отримуємо чинники з $\delta A_{i,\pm} > 2$, що детермінують параметр пошкоджуваності (табл. 7).

Таблиця 7. Основні детермінуючі фактори

Назва детермінуючого фактора	$\delta A_{i,\pm}$	Спрямованість
1. Максимальна лінійна потужність у твелі $q_{l,\text{max}}$	18,7	при $q_{l,\text{max}} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$
2. Температура теплоносія на вході в а.з. $T_{\text{вх}}$	5,6	при $T_{\text{вх}} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$
3. Зовнішній діаметр оболонки $d_{\text{об}}^3$	4,19	при $d_{\text{об}}^3 \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$
4. Діаметр паливної таблетки $d_{\text{таб}}$	2,15	при $d_{\text{таб}} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$

Діапазон невизначеності для $q_{l,\text{max}}$ було прийнято в межах $\Delta q_{l,\text{max}} = \pm 10\%$ [12]. Отримавши діапазон невизначеності для $\omega(\tau)$, використовуючи правило трьох сигм нормального закону розподілу випадкової величини і формулу Бернуллі, можна розрахувати ймовірність розгерметизації оболонок твелів [14]. Алгоритм розра-

хунку складається з трьох кроків.

На першому кроці пошкоджуваність оболонки усередненого в консервативній групі m твела розглядається як випадкова величина ω_m^{rand} , розподілена за нормальним законом в інтервалі $[\omega^{\text{min}}; \omega^{\text{max}}]$, де $\omega^{\text{min}} = < \omega_m^{\text{rand}} > - \Delta \omega_m^{\text{rand}}$;

$\omega^{\max} = \langle \omega_m^{\text{rand}} \rangle + \Delta\omega_m^{\text{rand}}$; $\Delta\omega_m^{\text{rand}}$ – діапазон невідомості параметра пошкоджуваності для консервативної групи m .

На другому кроці за правилом трьох сигм знаходять стандартні відхилення $\sigma(\omega_m^{\text{rand}})$ випадкової величини ω_m^{rand} для консервативної групи m .

На третьому кроці, якщо $\omega^{\max} > \omega^{\text{lim}}$, то ймовірність P_m розгерметизації оболонки після чотирьох років експлуатації твела, усередненого за консервативною групою m , для кожної з шести ТВЗ в секторі симетрії а.з. (див. рис. 1 і 4) розраховується за виразом нормального закону

$$P_m = \int_{\omega^{\text{lim}}}^{\omega^{\max}} \frac{\exp\left[-\frac{(\omega_m^{\text{rand}} - \langle \omega_m^{\text{rand}} \rangle)^2}{2[\sigma(\omega_m^{\text{rand}})]^2}\right] \cdot d\omega_m^{\text{rand}}}{\sigma(\omega_m^{\text{rand}})\sqrt{2\pi}}, \quad (6)$$

де $\omega^{\text{lim}} = 10\%$ відповідно до нормативного коефіцієнта запасу $K_{\text{SC4}} = 10$ для $\omega(\tau)$.

Для спрощення будемо вважати, що для всіх ТВЗ умова $\omega^{\max} > \omega^{\text{lim}}$ може виконуватися тільки для твелів консервативної групи IV*, надалі будуть розглядатися тільки такі твели й індекс "m" буде опускатися.

Вважаючи наявність в активній зоні шести тождних секторів симетрії, а також наявність у кожному секторі симетрії шести ТВЗ, експлуатованих протягом чотирирічної паливної кампанії (див. рис. 1 та 4), необхідна умова допустимості алгоритму перестановок ТВЗ має вигляд

$6 \cdot \sum_{i=1}^6 n_{0,i} < n^{\text{lim}}$, де $n_{0,i}$ – кількість розгерметизованих твелів, що прогнозується в i -й ТВЗ, $i = \overline{1,6}$; $n^{\text{lim}} = 508$ – гранично допустима кількість розгерметизованих твелів в ВВЕР-1000 [10].

Для визначення $n_{0,i}$ запишемо ймовірність розгерметизації k з n_i твелів після чотирьох років експлуатації i -ї ТВЗ на основі формули Бернуллі

$$P_{n_i}(k) = \frac{n_i!}{(k)! \cdot (n_i - k)!} \cdot (P)^k \cdot (1 - P)^{n_i - k}. \quad (7)$$

Тоді прогнозована кількість розгерметизованих твелів в i -й ТВЗ знаходиться як

$$n_{0,i} = \sum_{k=1}^{n_i} P_{n_i}(k) \cdot k. \quad (8)$$

З урахуванням виразів (7) і (8) маємо умову допустимості алгоритму перестановок ТВЗ

$$\sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^{n_i} \frac{n_i!}{(k)! \cdot (n_i - k)!} \cdot (P)^k \cdot (1 - P)^{n_i - k} \cdot k < \frac{n^{\text{lim}}}{6}. \quad (9)$$

Якщо декілька алгоритмів перестановок ТВЗ задовольняють умові (9), для мінімізації ймовірності розгерметизації твелів за механізмом накопичення $\omega(\tau)$ найкращий алгоритм перестановок вибирається за критерієм

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \left[\sum_{i=1}^6 \sum_{k=1}^{n_i} \frac{n_i!}{(k)! \cdot (n_i - k)!} \cdot (P)^k \cdot (1 - P)^{n_i - k} \cdot k \right], \\ P = \int_{\omega^{\text{lim}}}^{\omega^{\max}} \frac{\exp\left[-\frac{(\omega - \langle \omega \rangle)^2}{2[\sigma(\omega)]^2}\right] \cdot d\omega}{\sigma(\omega)\sqrt{2\pi}}. \end{array} \right. \quad (10)$$

Висновки

1. На основі ЕВТП-методу розроблено підхід для прогнозування розгерметизації оболонок твелів ВВЕР-1000 за механізмом накопичення деформаційних пошкоджень в оболонках, які характеризуються параметром пошкоджуваності оболонок $\omega(\tau)$, що враховує для кожної ТВЗ історію її навантаження та розподіл $\omega(\tau)$ серед твелів.

2. При чотиригруповій моделі розподілу $\omega(\tau)$ максимальна величина $\omega(\tau)$, що досягається в чотирирічному паливному циклі, для двох алгоритмів перестановок ТВЗ збільшилася порівняно з однією групою моделлю в 2,2 і 1,6 рази відповідно. Для перестановки 3-22-54-29 алгоритму А перевищується гранично допустима величина деформаційної пошкоджуваності $\omega^{\text{lim}} = 10\%$. Враховуючи наявність в активній зоні шести тождних секторів симетрії, загальна кількість розгерметизованих оболонок при реалізації алгоритму А становитиме 1032, що перевищить межу безпечної експлуатації.

3. Незважаючи на те, що для перестановки 3-22-54-29 досягається перевищення $\omega^{\text{lim}} = 10\%$, перевищення гранично допустимих величин для тангенціального та еквівалентного напружень в оболонці не відбувається. Цей висновок суперечить загальноприйнятій думці, що величина параметра деформаційної пошкоджуваності не відіграє істотної обмежувачої ролі при оцінці граничного стану оболонки твела.

4. Запропоновано метод урахування невизначеності вхідних параметрів моделі розрахунку $\omega(\tau)$, умову допустимості алгоритму перестановок ТВЗ і критерій мінімальності ймовірності розгерметизації твелів за механізмом накопичення деформаційних пошкоджень, які рекомендовано використовувати для забезпечення надійної експлуатації реактора типу ВВЕР.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Попов В.В.* Разработка и совершенствование методов расчета на прочность и надежность стержневых твэлов ЯЭУ: дис. ... д-ра техн. наук. - Обнинск, 2000. - 62 с.
2. *Алексеев Е.Е.* Разработка методов расчета работоспособности твэлов ВВЭР в вероятностной и детерминистической постановке: автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 2008. - 31 с.
3. *Nuclear fuel safety criteria technical review. Second edition.* // OECD NEA No. 7072. - Issy-les-Moulineaux: Nuclear Energy Agency, 2012. - 83 p.
4. *Новиков В.В., Медведев А.В., Богатырь С.М. и др.* Обеспечение работоспособности ядерного топлива в маневренных режимах // Укр.-рос. науч.-практ. сем. «Опыт эксплуатации и внедрения топлива ВВЭР нового поколения». - Хмельницкий: ХАЭС, 2005. - 22 с.
5. *Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф.* Энергетический вариант теории ползучести. - Новосибирск: Ин-т термодинамики СО АН СССР, 1986. - 95 с.
6. *Kim J.H., Lee M.H., Choi B.K., Jeong Y.H.* Deformation behavior of Zircaloy-4 cladding under cyclic pressurization // Journal of Nuclear Science and Technology. - 2007. - Vol. 44. - P. 1275 - 1280.
7. *Pelykh S.N., Maksimov M.V.* Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit // Nuclear Engineering and Design. - 2011. - Vol. 241, No. 8. - P. 2956 - 2963.
8. *Pelykh S.N., Maksimov M.V., Baskakov V.E.* Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control // Annals of Nuclear Energy. - 2013. - Iss. 58. - P. 188 - 197.
9. *Сузуки М.* Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / Пер. с англ. С. Н. Пелых. - Одесса: Астропринт, 2010. - 248 с.
10. *Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07 (взамен ПНАЭ Г-1-024-90, ПБЯ РУ АС-89).* - М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2008. - 21 с.
11. *Пелых С.Н.* Основы управления свойствами твэлов ВВЭР. - Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. - 160 p. (in Russian).
12. *Pelykh S.N., Maksimov M.V., Parks G.T.* A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup // Nuclear Engineering and Design. - 2013. - Vol. 257, No. 4. - P. 53 - 60.
13. *Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П.* Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. - М.: Академкнига, 2004. - 220 с.
14. *Pelykh S.N., Maksimov M.V., Nikolsky M.V.* A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. - 2014. - Iss. 4. - P. 108 - 116.
15. *Пат. 100070, Україна, МПК G 21 C 7/00 / М. В. Максимов, С. М. Пелих, В. Е. Баскаков, Т. О. Цисельська.* Спосіб управління ядерною енергетичною установкою з реактором водяного типу при зміні потужності реактора або зовнішнього навантаження. - 2012. - Бюл. № 21/2012.
16. *Воробьев Р.Ю.* Альбомы нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора энергоблока № 5 ЗАЭС, кампании 20 - 23. - Энергодар: Запорожская АЭС, 2011. - 323 с.
17. *Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П.* Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 // Атомная энергия. - 1998. - Т. 84, № 6. - С. 560 - 563.
18. *Suzuki M.* Light water reactor fuel analysis code FE-MAXI-V (Ver.1). JAERI-Data/Code 2000-030. - Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. - 285 p.
19. *Chao Y.A., Shatilla Y.A.* Conformal mapping and hexagonal nodal methods - II: Implementation in the ANC-H code // Nuclear Science and Engineering. - 1995. - Vol. 121, No. 2. - P. 210 - 225.

С. Н. Пелых¹, М. В. Максимов¹, С. Д. Рябчиков²

¹ Одесский национальный политехнический университет, Одесса

² Харьковский физико-технический институт, Харьков

АНАЛИЗ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ

Разработан метод прогнозирования разгерметизации оболочек твэлов реактора типа ВВЭР-1000 по механизму накопления деформационной поврежденности оболочек, учитывающий для каждой тепловыделяющей сборки (ТВС) историю нагружения и неоднородность распределения энерговыделения среди твэлов. При четырехгрупповой модели распределения поврежденности максимальная величина поврежденности, достигаемая в четырехлетнем топливном цикле, увеличивается по сравнению с одnogрупповой моделью примерно в два раза. Найден алгоритм перестановок ТВС, для которого превышаются предельная величина параметра поврежденности и предел безопасной эксплуатации реактора. Показано, что величина параметра поврежденности играет существенную ограничивающую роль при оценке предельного состояния оболочек. Выведены условие допустимости алгоритма перестановок ТВС и критерий минимальности вероятности разгерметизации оболочек, которые можно использовать в автоматизированной системе обеспечения герметичности оболочек твэлов ВВЭР-1000.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, оболочка твэла, критерий минимальности вероятности разгерметизации оболочек.

S. N. Pelykh¹, M. V. Maksimov¹, S. D. Ryabchikov²¹ Odessa National Polytechnic University, Odessa² Kharkov Institute of Physics and Technology, Kharkov**AN ANALYSIS OF THE FUEL ELEMENT CLADDING FAILURE PARAMETER CONSIDERING THE NONUNIFORMITY OF ENERGY RELEASE IN A FUEL ASSEMBLY**

Considering the fuel assembly (FA) load history and the nonuniformity of energy release for the fuel elements (FEs) contained in this FA, a method for forecasting of probability of VVER-1000 FE cladding failure due to FE cladding deformation damage accumulation, has been developed. In the case of four-group damage distribution model, the maximum value of damage parameter accumulated in a four-year fuel campaign is approximately two times greater compared with the one-group model. A FA rearrangement algorithm characterized by exceeding of the limiting value for cladding damage parameter and the safety margin for VVER-1000 operation, has been found. The thesis that the value of FE cladding damage parameter plays an important role in estimating the limit state of claddings, has been proved. The condition of FA rearrangement algorithm admissibility and the criterion of minimum cladding failure probability which can be used in a control system insuring the hermeticity of VVER-1000 FE claddings, have been derived.

Keywords: VVER-1000, fuel element cladding, criterion of minimum cladding failure probability.

REFERENCES

1. Popov V.V. Development and improvement of the methods for calculation of the strength and reliability of NPP fuel rods: Thesis. Doctor of Sciences in Technology. - Obninsk, 2000. - 62 p. (Rus)
2. Alexeyev E.E. Development of the methods for calculation of the VVER fuel element workability using probabilistic and deterministic approaches: Thesis abstract. Candidate of Sciences in Technology. - Obninsk, 2008. - 31 p. (Rus)
3. Nuclear fuel safety criteria technical review. Second edition // OECD NEA No. 7072. - Issy-les-Moulineaux: Nuclear Energy Agency, 2012. - 83 p.
4. Novikov V.V., Medvedev A.V., Bogatyr S.M. Nuclear fuel operability assurance in maneuver regimes // Proc. of the Int. Ukrainian-Russian Conf. on Experience of the New VVER Fuel Operation, Khmelnytskyi, Ukraine, 2005. - 22 p. (Rus)
5. Sosnin O.V., Gorev B.V., Nikitenko A.F. Energy Variant of the Theory of Creep. - Novosibirsk: The Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1986. - 95 p. (Rus)
6. Kim J.H., Lee M.H., Choi B.K. et al. Deformation behavior of Zircaloy-4 cladding under cyclic pressurization // Journal of Nuclear Science and Technology. - 2007. - Vol. 44. - P. 1275 - 1280.
7. Pelykh S.N., Maksimov M.V. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit // Nuclear Engineering and Design. - 2011. - Vol. 241, No. 8. - P. 2956 - 2963.
8. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Baskakov V.E. Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control // Annals of Nuclear Energy. - 2013. - Iss. 58. - P. 188 - 197.
9. Suzuki M. Modelling of light-water reactor fuel element behaviour in different loading regimes / Transl. from English by S. N. Pelykh. - Odessa: Astroprint, 2010. - 248 p. (Rus)
10. Nuclear safety regulations for NPP reactor plants NP-082-07. - Moskva: Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service, 2008. - 21 p. (Rus)
11. Pelykh S.N. Grounds of VVER fuel element behavior control. - Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. - 160 p. (Rus)
12. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Parks G.T. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup // Nuclear Engineering and Design. - 2013. - Vol. 257, No. 4. - P. 53 - 60.
13. Shmelev V.D., Dragunov Y.G., Denisov V.P. The VVER active cores for nuclear stations. - Moskva: Akademkniga, 2004. - 220 p. (Rus)
14. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Nikolsky M.V. A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements // Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science. - 2014. - Iss. 4. - P. 108 - 116.
15. Patent. 100070, Ukraine, MPK G 21 C 7/00 / M. V. Maksimov, S. N. Pelykh, V. E. Baskakov, T. A. Tsiselskaya. A method for control of the VVER nuclear power plant at changing the reactor power or external loading. - 2012. - Bul. No. 21/2012. (Ukr)
16. Vorobyev R.Y. Albums of neutron-physical characteristics of the reactor core, Unit 5, Zaporizhzhya NPP. Campaigns 20 - 23. - Energodar: Zaporizhzhya NPP, 2011. - 323 p. (Rus)
17. Philimonov P.E., Mamichev V.V., Averyanova S.P. The "reactor simulator" code for modelling of maneuvering WWER-1000 regimes // Atomnaya Energiya. - 1998. - Vol. 84, No. 6. - P. 560 - 563 (Rus)
18. Suzuki M. Light water reactor fuel analysis code FE-MAXI-V (Ver.1). JAERI-Data/Code 2000-030 / M. Suzuki. - Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. - 285 p.
19. Chao Y.A., Shatilla Y.A. Conformal mapping and hexagonal nodal methods - II: Implementation in the ANC-H code // Nuclear Science and Engineering. - 1995. - Vol. 121, No. 2. - P. 210 - 225.

Надійшла 03.02.2016

Received 03.02.2016