

УДК 621.039.548

С.М. Пелих

ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ МАНЕВРУ ПОТУЖНІСТЮ ВВЕР-1000**Вступ**

Останнім часом збільшився інтерес до роботи реактора ВВЕР-1000 у режимі змінного навантаження енергосистеми, що припускає багатократні циклічні зміни потужності реакторної установки (РУ). Оцінка часу зберігання цілісності оболонки твела при багатократних циклічних змінах потужності РУ є одним із ключових завдань при оцінці допустимої тривалості експлуатації ВВЕР-1000 у змінному режимі.

Складність визначення часу зберігання цілісності оболонки твела за нормальної експлуатації РУ в режимі змінного навантаження полягає в тому, що експериментальне вивчення повзучості оболонки модельного твела в умовах, що відповідають експлуатаційним режимам змінного навантаження, або надзвичайно складне, або просто неможливе, оскільки тривалість таких випробувань може становити декілька років. Крім того, некоректним є використання експериментальних даних про повзучість оболонки, отриманих в умовах стаціонарних і аварійних режимів, оскільки необхідно врахувати всю історію навантаження оболонки.

Якщо не аналізувати режими з аварійним підвищенням температури, то для оцінки часу зберігання цілісності оболонки при багатократних змінах потужності РУ необхідно обчислити питому енергію розсіяння A_0 , накопичену в процесі повзучості до моменту руйнування оболонки і витрачену на її руйнування. В [1] показано, що для аварії з втратою теплоносія при використанні умови руйнування оболонки твела $\omega = 1$ енергія A_0 може бути знайдена експериментально на основі випробувань мікророзривків матеріалу оболонки, якщо взяти як основні допущення залежність A_0 тільки від температури і незалежність A_0 від усіх інших характеристик, зокрема і від передісторії навантаження оболонки.

На відміну від експериментального методу визначення A_0 [1] у працях [2, 3] A_0 знаходиться як питома енергія розсіяння в момент втрати стійкості матеріалу оболонки при досяг-

ненні рівності між величинами еквівалентної напруги $\sigma_e^{\max}(\tau)$ і межі текучості $\sigma_0^{\max}(\tau)$ у точці з максимальною температурою, розташованій на внутрішній поверхні центрального аксіального сегмента твела.

У методі аналізу довговічності оболонки твела ВВЕР-1000 у змінному режимі [2, 3] використовуються критерії міцності SC2 і SC4 оболонки, що дає можливість отримувати фізично обгрунтовані залежності довговічності оболонки від режимних характеристик активної зони (АКЗ) і конструктивних параметрів твела тепловидільної збірки (ТВЗ) із врахуванням реальної історії навантаження РУ.

Однак допустима тривалість експлуатації ВВЕР-1000 у змінному режимі обмежується не тільки довговічністю оболонки твела, оскільки РУ є складною системою, що складається із взаємозв'язаних елементів.

Постановка задачі

Для оцінки допустимої тривалості експлуатації ВВЕР-1000 у змінному режимі необхідно розробити комплексний показник ефективності алгоритму маневрування потужністю РУ, що враховує, крім довговічності оболонки твела, також і системні властивості РУ.

Вибір інструменту для розрахунку параметра ушкодження оболонки

При виборі програми FEMAXI (Японія) для розрахунку розвитку напруг і деформацій в оболонці, необхідного для визначення параметра ушкодження оболонки [3], враховувалася така важлива перевага цієї програми, як сумісне розв'язання рівнянь теплопровідності і механічної деформації компонентів твела за допомогою методу скінченних елементів, що дало можливість врахувати вплив змінних режимів на стан твела [4]. Довжина твела умовно ділилася на десять аксіальних сегментів, дискретизація в циліндричній геометрії проводилася за допомогою десяти і чотирьох кільцевих елементів для таблеток і оболонки, відповідно. Програма FEMAXI, сертифікована в "Агентстві з атомної енергії країн ОЕСР", придатна для адекватного аналізу поведінки твела легководного реактора типу ВВЕР у всіх режимах нормальної експлуатації до вигорання більше 50 МВт-доб/кг із врахуванням реальної послідовності змін потужності РУ і параметрів теплоносія.

Методика визначення довговічності оболонки твела в змінному режимі

В [1] розвинений метод аналізу міцності оболонки твела реактора ВВЕР-1000 у важкій аварії з втратою теплоносія на основі енергетичного варіанта теорії повзучості (ЕВТП). Критерій руйнування оболонки при використанні ЕВТП записується у вигляді

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0 = 1, \tag{1}$$

де $\omega(\tau)$ – параметр ушкодження оболонки твела; A_0 – питома енергія розсіяння в момент руйнування τ_0 матеріалу оболонки; $A(\tau)$ – питома енергія розсіяння, Дж/м³:

$$A(\tau) = \int_0^\tau \sigma_e \dot{p}_e d\tau, \tag{2}$$

де σ_e – еквівалентна напруга, Па; \dot{p}_e – швидкість еквівалентної деформації повзучості, с⁻¹.

Наприклад, покладаємо, що реактор у буденні дні тижня працює за добовим циклом навантаження, згідно з яким протягом перших 16 год кожної розрахункової буденної доби потужність N реактора дорівнює номінальній потужності $N_{\text{ном}}$, потім протягом однієї години N знижується до 75 % $N_{\text{ном}}$, протягом 6 год $N = 75$ %, далі протягом останньої години розрахункової буденної доби N підвищується до $N_{\text{ном}}$ (час початку розрахункової і календарної діб може бути різним). Проте протягом останньої години кожної п'ятої розрахункової доби тижня N знижується до 50 % і залишається такою протягом 6-ї і 23-ї годин сьомої доби, далі протягом останньої години кожної сьомої розрахункової доби потужність підвищується до $N_{\text{ном}}$. Такий комбінований цикл навантаження, що об'єднує добовий і тижневий цикли, означає, що протягом 85, 35 і 48 год кожного тижня N дорівнює 100, 75 і 50 % $N_{\text{ном}}$, відповідно. На сьогодні для вказаного комбінованого режиму немає як експериментальних, так і розрахункових даних про питому енергію розсіяння A_0 , що призводить до руйнування оболонки.

На рис. 1 для комбінованого циклу навантаження наведено залежність питомої енергії розсіяння A для оболонки з циркулюючим знятими напругами від кількості ефективних діб N для трьох діаметрів центрального отвору таблетки $d_{\text{табл}}^{\text{ц.о}}$: 0,140, 0,168 (+ 20 %) і 0,112 (– 20 %) см.

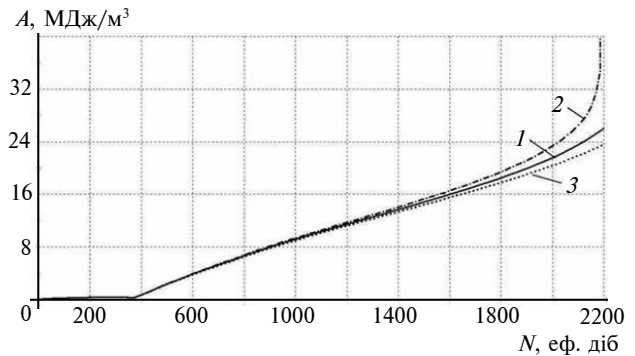


Рис. 1. Залежність питомої енергії розсіяння від кількості ефективних діб для $d_{\text{табл}}^{\text{ц.о}} = 0,140$ см (1); 0,112 см (2); 0,168 см (3)

На рис. 2 показано досягнення умови $\sigma_e^{\text{max}}(\tau) = \sigma_0^{\text{max}}(\tau)$ у момент $\tau_0 \equiv N_0 = 2074$ еф. діб для $d_{\text{табл}}^{\text{ц.о}} = 0,112$ см. Видно, що ця умова при $N = 2074$ еф. діб для $d_{\text{табл}}^{\text{ц.о}} = 0,168$ см не виконується.

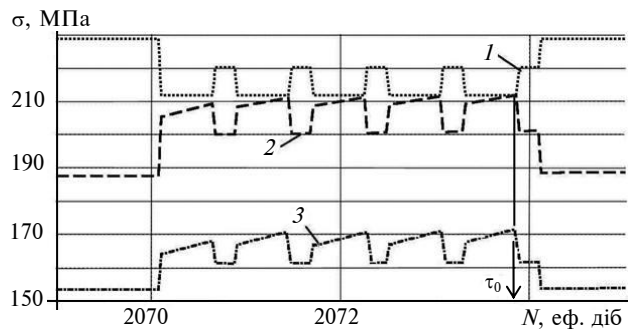


Рис. 2. Визначення часу втрати стійкості оболонки τ_0 для $d_{\text{табл}}^{\text{ц.о}} = 0,112$ см: 1 – межа текучості σ_0 ; 2, 3 – еквівалентна напруга σ_e для $d_{\text{табл}}^{\text{ц.о}} = 0,112$ см і $d_{\text{табл}}^{\text{ц.о}} = 0,168$ см, відповідно

На основі залежності $A(N)$ для $d_{\text{табл}}^{\text{ц.о}} = 0,112$ см при $\tau_0 = 2074$ еф. діб знаходиться так: $A_0 = 25,5$ МДж/м³. Таким чином, якщо енергія A_0 визначена для конкретного набору режимних параметрів АКЗ і конструктивних параметрів ТВЗ, то за виразом (1) для будь-якої кількості циклів змінного навантаження можна отримати параметр ушкодження оболонки $\omega(\tau)$.

Показник ефективності експлуатації реактора ВВЕР-1000 у змінному режимі

Реакторна установка зберігає свою цілісність, безпеку, ефективність і надійність до тих

пір, поки зберігаються [5]:

- цілісність і безпека ключових елементів, що її створюють;
- незмінність структури, тобто стабільність найважливіших динамічних процесів, що визначають виконання функцій РУ;
- високий рівень інтегральних техніко-економічних показників експлуатації РУ протягом достатньо тривалого проміжку часу;
- високий рівень керованості РУ.

У рамках комплексного підходу до побудови показника ефективності маневрування потужністю РУ можна виділити такі рівні її аналізу.

Елементарний рівень. На рівні елементів РУ насамперед доцільно розглядати ступінь цілісності найбільш важливого елемента РУ – оболонки твела, яка служить першим бар'єром безпеки. Збереження цілісності оболонки в змінному режимі можна аналізувати за допомогою оцінки параметра ω ушкодження оболонки твела.

Структурний рівень. На рівні структури РУ доцільно розглядати стабільність найбільш важливих фізичних процесів, передусім енерговиділення в АКЗ. Для цього використовують величину аксіального офсету (АО), що визначає висотну нерівномірність поля енерговиділення.

Інтегральний економічний рівень. Це – аналіз техніко-економічних показників експлуатації РУ, насамперед коефіцієнта використання встановленої потужності (КВВП).

Інтегральний рівень надійності системи керування. Це – аналіз вірогідності безвідмовної експлуатації всіх систем керування, включаючи дії персоналу, що забезпечують маневрування потужністю РУ.

Доцільно ввести такі зведені параметри:

- зведений параметр ω^* ушкодження оболонки:

$$\omega^* = |\omega - 1|, \quad (3)$$

де ω – параметр ушкодження оболонки;

- зведений аксіальний офсет AO^* :

$$AO^* = 1 - |\Delta AO|, \quad (4)$$

де $|\Delta AO|$ – амплітуда зміни АО в ході маневрування;

- зведений коефіцієнт використання встановленої потужності КВВП*:

$$КВВП^* = КВВП \frac{10}{N_n + 10}, \quad (5)$$

де N_n – кількість діб простою РУ, що припадає на кожні 10 діб експлуатації ВВЕР-1000 при 100 % потужності; КВВП – коефіцієнт використання встановленої потужності РУ без врахування часу простоїв;

- інтегральну вірогідність безвідмовної роботи $P_{6/B}^*$ всіх систем керування, що забезпечують маневрування потужністю РУ:

$$P_{6/B}^* = \prod_{i=1}^M P_{6/B,i}^*, \quad (6)$$

де $P_{6/B,i}^*$ – інтегральна вірогідність безвідмовної роботи всіх систем керування РУ, що забезпечують маневрування її потужністю в ході i -ї оперативної дії (перемикання); M – необхідна кількість перемикань при маневруванні потужністю.

Зведені параметри використовуються як компоненти показника $\{\omega^*; AO^*; КВВП^*; P_{6/B}^*\}$ ефективності маневрування потужністю РУ, точка з координатами $\omega^* = 1; AO^* = 1; КВВП^* = 1; P_{6/B}^* = 1$ відповідає граничному найкращому змінному режимові експлуатації, а з координатами $\omega^* = 0; AO^* = 0; КВВП^* = 0; P_{6/B}^* = 0$ – граничному найгіршому змінному режимові.

Для діючих РУ ВВЕР-1000 або передбачаються проектом, або можуть бути визначені деякі мінімально допустимі з погляду надійності, безпеки і ефективності експлуатації РУ значення зведених параметрів ($\omega_{\min}^*; AO_{\min}^*; КВВП_{\min}^*; P_{6/B,\min}^*$). Таким чином, допустимі значення компонентів комплексного показника при експлуатації РУ в змінному режимі знаходяться в таких діапазонах:

$$\omega_{\min}^* \leq \omega^* \leq 1, \quad AO_{\min}^* \leq AO^* \leq 1, \quad (7)$$

$$КВВП_{\min}^* \leq КВВП^* \leq 1, \quad P_{6/B,\min}^* \leq P_{6/B}^* \leq 1.$$

Область допустимих значень компонентів комплексного показника при експлуатації ВВЕР-1000 у змінному режимі зручно зображати при максимальному значенні $P_{6/B}^* = 1$. Наприклад, компоненти комплексного показника обмежені такими мінімально допустимими значеннями в точці B (рис. 3):

$$\omega_{\min}^* = 0,5, \quad AO_{\min}^* = 0,95, \quad КВВП_{\min}^* = 0,75.$$

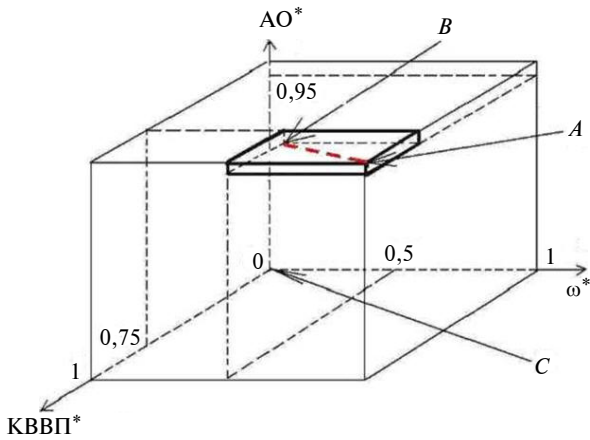


Рис. 3. Допустима область експлуатації ВВЕР-1000 при $P_{6/B}^* = 1$. Граничні змінні режими: найкращий (A); допустимий (B); найгірший (C)

Величини $(\omega_{\min}^*; AO_{\min}^*; KBVP_{\min}^*; P_{6/B,\min}^*)$, які визначають положення точки B, повинні задаватися з умови забезпечення взаємної незалежності величин ω^* , AO^* , $KBVP^*$ і $P_{6/B}^*$ в межах прямокутного об’єму, що задається діагоналлю AB. Очевидно, що вплив ω^* на AO^* і $KBVP^*$ можливий тільки при достатньо малих ω^* . Аналогічно, вплив AO^* на ω^* і $KBVP^*$ можливий тільки при достатньо малих AO^* .

Мірою ефективності E i-го алгоритму є близькість точки $(\omega_i^*; AO_i^*; KBVP_i^*; P_{6/B,i}^*)$ до точки A, яка визначається кількісно як

$$E_i = 1 - \frac{L_i}{L_{\max}}, \tag{8}$$

де

$$L_i = \sqrt{(1 - KBVP_i^*)^2 + (1 - \omega_i^*)^2 + (1 - AO_i^*)^2 + (1 - P_{6/B,i}^*)^2}, \tag{9}$$

$$L_{\max} = L_i(KBVP_{\min}^*, \omega_{\min}^*, AO_{\min}^*, P_{6/B,\min}^*). \tag{10}$$

Таким чином, показник $\{\omega^*; AO^*; KBVP^*; P_{6/B}^*\}$ дає можливість чисельно оцінювати ефективність алгоритму маневрування при аналізі стану РУ на чотирьох рівнях: елементарному, структурному, інтегральному економічному і рівні надійності системи керування, що дає

змогу одночасно враховувати вимоги цілісності ключових елементів, стабільності ключових фізичних процесів, економічності і керованості РУ. Розглядалися апробований алгоритм добового маневрування потужністю енергоблока з ВВЕР-1000, що проходив випробування на Хмельницькій АЕС 17–18 квітня 2006 р., і альтернативний алгоритм [5].

Апробований алгоритм – це зниження N до 80 % $N_{\text{ном}}$ за 1 год; робота при $N = 80\% N_{\text{ном}}$ протягом семи годин; підвищення N до $N_{\text{ном}}$ протягом двох годин за програмою регулювання (ПР) з постійним тиском p_2 пари в другому контурі. Для підтримки заданого рівня N при розвантаженні в момент отруєння реактора починали вводити “чистий конденсат”. Загальна кількість перемикачів M_1 при маневруванні потужністю N за апробованим алгоритмом [5] становила

$$M_1 = 140. \tag{11}$$

Альтернативний алгоритм – це зниження N до 90 % $N_{\text{ном}}$ введенням розчину борної кислоти протягом півгодини; подальше зниження N до 80 % $N_{\text{ном}}$ протягом двох з половиною годин за рахунок отруєння реактора; робота при $N = 80\% N_{\text{ном}}$ протягом чотирьох годин; підвищення N до $N_{\text{ном}}$ протягом двох годин, при цьому в діапазоні $N = 80\text{--}100\% N_{\text{ном}}$ вхідна температура теплоносія $T_1^{\text{вх}}$ постійна, а p_2 змінюється в межах 58–60 бар. Альтернативний алгоритм, що характеризується постійною $T_1^{\text{вх}}$ і помірною зміною середньої температури першого контура $T_1^{\text{сеп}}$ і p_2 при $N = 80\text{--}100\% N_{\text{ном}}$, тоді як при $N < 80\% N_{\text{ном}}$ використовується ПР з постійним p_2 , має переваги ПР з $T_1^{\text{сеп}} = \text{const}$. Разом з тим, за рахунок підтримки p_2 у регламентних межах цей алгоритм позбавлений недоліків, властивих ПР з $T_1^{\text{сеп}} = \text{const}$ [6]. При маневруванні потужністю за альтернативним алгоритмом загальна кількість оперативних дій M_2 [5] дорівнювала 40:

$$M_2 = 40. \tag{12}$$

На різних АЕС значення вірогідності $P_{6/B,i}^*$ може дуже відрізнитися одне від одного. Завдяки впровадженню організаційно-технічним заходам щодо контролю перемикачів на Запорізь-

Таблиця 1. Порівняння ефективності апробованого і альтернативного алгоритмів

$q_{l,max}$, Вт/см	Алгоритм	$ \Delta AO $, %	КВВП	A_0 , МДж/м ³	τ_0 , еф. діб	ω (1000 еф. діб)	E (1000 еф. діб)
248	Апробований	3,0	0,929	29,59	2228	0,351	0,220
	Альтернативний	0,3	0,942	30,29	2209	0,357	0,256
260	Апробований	3,0	0,929	32,04	2061	0,400	0,150
	Альтернативний	0,3	0,942	32,85	2044	0,407	0,179

Таблиця 2. Зміна ω^* і E при експлуатації ВВЕР-1000 згідно з альтернативним алгоритмом

N , еф. діб	ω^*	КВВП*	АО*	$P_{6/v}^*$	L	E
500	0,744	0,785	0,997	0,961	0,34	0,4
600	0,672	0,785	0,997	0,961	0,39	0,3
700	0,604	0,785	0,997	0,961	0,45	0,2
800	0,541	0,785	0,997	0,961	0,51	0,1
870	0,500	0,785	0,997	0,961	0,55	0,02

кій АЕС вірогідність відмови системи керування РУ (із врахуванням вірогідності помилок персоналу), що забезпечує маневрування потужністю, в ході одного перемикання дорівнює 0,001 [5]. Тоді для j -го алгоритму маневрування маємо

$$P_{6/v,i}^* = 0,999, \quad i = \overline{1, M_j}. \quad (13)$$

При використанні (6) вірогідність безвідмовної роботи системи керування, що забезпечує маневр потужністю РУ за апробованим і альтернативним алгоритмами, відповідно становить:

$$P_{6/v,1}^* \approx 0,869, \quad (14)$$

$$P_{6/v,2}^* \approx 0,961. \quad (15)$$

Нехай

$$\omega_{min}^* = 0,5, \quad AO_{min}^* = 0,95, \quad (16)$$

$$КВВП_{min}^* = 0,75, \quad P_{6/v,min}^* = 0,95.$$

Тоді відповідно до (10) матимемо

$$L_{max} \approx 0,56. \quad (17)$$

З використанням методу оцінки довговічності оболонки [3], програми "Імітатор реактора" [2] моделі оцінки ефективності алгоритму маневрування на основі комплексного показника [5], а також виразів (1)–(17) для циркулової оболонки і конструктивних характеристик ТВЗ-А при $N_n = 2$ отримана порівняльна оцінка ефективності описаних алгоритмів добового маневру потужністю ВВЕР-1000 для максимальної лінійної потужності в твелі $q_{l,max} = 248$ Вт/см і 260 Вт/см (табл. 1).

Альтернативний алгоритм характеризується більшою ефективністю порівняно з апробованим (див. табл. 1).

Допустима тривалість експлуатації реактора ВВЕР-1000 у змінному режимі

Оскільки для апробованого алгоритму $P_{6/v,1}^* < P_{6/v,min}^*$ (див. вирази (14), (16)), то допустима тривалість експлуатації ВВЕР-1000 у змінному режимі визначається з вимог $\omega^* \geq \omega_{min}^*$ і $E \geq 0$ при лінійній потужності $q_{l,max} = 298$ Вт/см, що відповідає максимально навантаженим твелям в АКЗ ВВЕР-1000, для альтернативного алгоритму (табл. 2).

Допустима тривалість експлуатації циркулової оболонки максимально навантаженого твела ТВЗ-А ВВЕР-1000 згідно з альтернативним алгоритмом становить близько 870 еф. діб (див. табл. 2). Дана оцінка є консервативною, оскільки швидкість повзучості сплаву Е-110, який застосовується в оболонках твелів ВВЕР-1000, дещо менша швидкості повзучості сплаву циркалой-4, властивості якого закладені в моделях, вживаних у програмі FEMAXI [4].

Висновки

Необхідність розгляду можливості еволюційного розвитку діючих АЕС в напрямку регулювання енергосистеми визначається інвестиційними труднощами в спорудженні пікових енергетичних установок і "Енергетичною стратегією України на період до 2030 р.", яка передбачає збереження частки вироблення електроенергії на АЕС на рівні близько 50 %.

Оскільки проект РУ В-320 передбачає її експлуатацію в базовому режимі, то прийнятні тільки такі зміни регламентних умов експлуатації РУ, які не знижують її надійність і безпеку, і, по-друге, зберігають на необхідному рівні економічну ефективність вироблення електроенергії.

Одним із шляхів вирішення протиріччя між економічною доцільністю і безпекою експлуатації РУ в змінному режимі є формалізація механізму впливу змінного навантаження РУ з ВВЕР-1000 на стан оболонки твела разом із визначенням її граничного стану з точки зору ядерної безпеки для прийняття рішення щодо методу регулювання потужності РУ в змінній частині графіка електричного навантаження.

Використання комплексного показника ефективності маневрування потужністю реактора ВВЕР-1000, що враховує ступінь ушкодження оболонки твела, стабільність енерговив-

ділення в активній зоні, коефіцієнт використання встановленої потужності і надійність системи керування РУ, дає змогу оцінювати допустиму тривалість експлуатації реактора в змінному режимі.

Альтернативний алгоритм добового навантаження ВВЕР-1000 характеризується більшою ефективністю порівняно з апробованим алгоритмом при максимальних лінійних потужностях твела, характерних для ВВЕР-1000. Допустима тривалість експлуатації циркалоєвої оболонки максимально навантаженого твела ТВЗ-А ВВЕР-1000 згідно з альтернативним алгоритмом становить близько 870 еф. діб.

На урядовому рівні необхідно затвердити програму випробувань у маневреному режимі одного або декількох блоків з ВВЕР-1000 для експериментального підтвердження безпеки експлуатації в цьому режимі РУ і всього енергоукомплектування АЕС.

С.Н. Пельх

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ АЛГОРИТМОВ МАНЕВРА МОЩНОСТЬЮ ВВЭР-1000

Выполнено сравнение эффективности алгоритмов маневра мощностью ВВЭР-1000 на основе комплексного показателя, учитывающего степень поврежденности оболочки твела, стабильность энерговыделения в активной зоне, коэффициент использования установленной мощности реактора, надежность системы управления реактора.

S.M. Pelykh

A COMPARISON OF ALGORITHMS EFFICIENCY FOR MANEUVERING POWER OF THE WWER-1000 REACTOR

The present paper compares the efficiency of algorithms for maneuvering power of the WWER-1000 reactor based on the integrated index. The comparison takes into account a cladding damage level of the fuel element, power stability in the active core, utilization factor of maximum capacity, and reliability of the control system.

1. Семишкин В.П. Расчетно-экспериментальные методы обоснования поведения твэлов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из первого контура РУ: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2007. – 48 с.
2. Максимов М.В., Пельх С.Н., Маслов О.В., Баскаков В.Е. Метод оценки эффективности алгоритма маневра мощностью энергоблока с реактором типа ВВЭР // Изв. вузов. Ядерная энергетика. – 2008. – № 4. – С. 128–139.
3. Maksimov M.V., Pelykh S.N., Maslov O.V., Baskakov V.E. Model of cladding failure estimation for a cycling nuclear unit // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – 239, N 12. – P. 3021–3026.
4. Suzuki M. Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-V (Ver.1): JAERI-Data/Code 2000-030. – Tokai: Japan atomic energy research institute, 2000. – 285 p.
5. Пельх С.Н., Баскаков В.Е., Цисельская Т.В. Комплексный критерий эффективности алгоритма маневрирования мощностью РУ с ВВЭР-1000 в переменном режиме // Тр. Одес. политехн. ун-та. – 2009. – Вып. 2 (32). – С. 48–52.
6. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС: Учеб. пособие. – СПб.: Энергоатомиздат, 1994. – 384 с.

Рекомендована Радою
теплоенергетичного факультету
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції
18 лютого 2010 року