

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ ОБОЛОНКИ ТВЕЛА ВВЕР-1000 В ЗМІННОМУ РЕЖИМІ НАВАНТАЖЕННЯ

© 2010 С. М. Пелих

Одеський національний політехнічний університет, Одеса

Подано основні принципи побудови математичної моделі зміни властивостей оболонки твела ВВЕР-1000 в змінному режимі навантаження нормальної експлуатації. Синтезована модель заснована на енергетичному варіанті теорії повзучості й використовує метод кінцевих елементів для сумісного вирішення рівнянь теплопровідності та механічної деформації компонентів твела. Запропонована математична модель дозволяє визначити вплив режимних параметрів ВВЕР-1000 і конструкційних характеристик тепловиділяючих збірок (ТВЗ) на зміну властивостей оболонки твела в різних режимах навантаження нормальної експлуатації, а також граничний стан оболонки в змінному режимі залежно від тривалості, глибини і кількості циклів.

Ключові слова: ВВЕР, змінний режим навантаження, міцність оболонки твела, параметр пошкодження оболонки, енергетичний варіант теорії повзучості.

Вступ

«Енергетична стратегія України на період до 2030 р.» визначає збереження частки вироблення електроенергії на АЕС близько 50 % [1]. Основою атомної енергетики країни є реакторні установки (РУ) з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР). Невідповідність між виробленням і споживанням електроенергії в енергосистемі України виникає через те, що пікові регулюючі потужності становлять 8 % сумарної потужності енергосистеми, тоді як для її стабільної роботи необхідно не менше 15 %. Більше 95 % енергоблоків теплової енергетики відпрацювали розрахунковий ресурс, усереднений залишковий ресурс роботи теплової енергетики України становить близько п'яти років [2, 3]. Існуючі інвестиційні труднощі в спорудженні пікових енергетичних установок визначають необхідність розвитку діючих АЕС у напрямку регулювання енергосистеми. Таким чином, є актуальним завдання експлуатації АЕС з ВВЕР-1000 в змінній частині графіка електричного навантаження енергосистеми (у маневровому режимі).

Проект РУ В-320 передбачає її експлуатацію в базовому режимі, хоча устаткування першого контуру розраховане на обмежену кількість циклів навантаження, що виникають у результаті експлуатації в режимі регулювання частоти й потужності в енергосистемі в межах (30...100) % від номінальної потужності [4]. За термін служби в межах цього діапазону допускається до 10 тис. циклів зміни навантаження [4].

Прийнятні тільки такі шляхи зміни умов експлуатації РУ, які не знижують її надійність і безпеку за всіма регламентними показниками. Одним із важливих завдань при експлуатації ВВЕР-1000 (В-320) у режимі змінного навантаження є прогнозування стану оболонки твела і

управління її ресурсом. Для управління ресурсом оболонки необхідно формалізувати механізм впливу змінного навантаження РУ на стан оболонки твела, включаючи визначення її граничного стану з точки зору ядерної безпеки. Для вирішення завдання аналізу зміни властивостей оболонки твела в змінному режимі навантаження необхідно розробити відповідну математичну модель.

Міцнісні критерії довговічності оболонки

Нормативний коефіцієнт запасу для критеріїв довговічності оболонки твела визначається як [5]

$$K_{\text{норм}} = \frac{R^{\text{max}}}{R}, \tag{1}$$

де R^{max} – граничне значення параметра; R – розрахункове значення параметра.

У групу міцнісних критеріїв довговічності оболонки входять критерії SC1...SC5 (табл. 1) [5].

Для оболонок твелів реактора ВВЕР-1000 виробництва корпорації ТВЕЛ параметр пошкодженості матеріалу оболонки оцінюється за допомогою критерію довговічності SC4 через відносну тривалість експлуатації оболонки, при роздільному розгляді стаціонарних і змінних режимів (методика ОКБ "Гидропрес") [6].

Можна виділити такі недоліки цього підходу: не враховується фізичний механізм процесу накопичення пошкоджень в оболонці (повзучість); не враховується реальна історія навантаження оболонки; невизначеність оцінки довговічності оболонки змушує приймати необгрунтовано високий нормативний коефіцієнт запасу $K_{\text{норм}} = 10$ (див. табл. 1); у відкритих джерелах відсутні дані по N_i^{max} і t_i^{max} для всіх можливих режимів навантаження.

Таблиця 1. Група міцнісних критеріїв довговічності оболонки

Критерій	Значення	$K_{\text{норм}}$
SC1	$\sigma_{\theta}^{\max} \leq 250$ МПа, де σ_{θ}^{\max} – максимальна тангенціальна напруга	1,2
SC2	$\sigma_e^{\max} < \sigma_0(T, \phi)$, де σ_e^{\max} – максимальна еквівалентна напруга, Па; σ_0 – межа текучості, Па; T – температура, К; ϕ – флюенс, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	–
SC3	$P_{\text{т/н}} \leq P_{\text{т/н}}^{\max}$, де $P_{\text{т/н}}^{\max}$ – тиск теплоносія, Па	1,5
SC4	$\omega = \sum_i \frac{N_i}{N_i^{\max}} + \int_0^{\tau} \frac{dt}{t^{\max}} < 1$, де $\omega(\tau)$ – параметр сумарного пошкодження матеріалу оболонки; N_i^{\max} – допустима кількість циклів i -го типу; t^{\max} – час до руйнування при даних параметрах стаціонарного навантаження	10
SC5	$\varepsilon_{\theta, pl}^{\max} \leq 0,5\%$, де $\varepsilon_{\theta, pl}^{\max}$ – гранична пластична деформація оболонки в тангенціальному напрямі	–

Математична модель зміни властивостей оболонки твела

Для оцінки міцності оболонки твела РУ з ВВЕР-1000 залежно від режиму змінного навантаження синтезована математична модель твела, що заснована на енергетичному варіанті теорії повзучості (ЕВТП) і використовує метод кінцевих елементів (МКЕ) для сумісного вирішення рівнянь теплопровідності та механічної деформації компонентів твела й дозволяє визначити граничний стан оболонки в змінному режимі залежно від тривалості, глибини та кількості циклів.

Для режиму змінного навантаження виділено три основні механізми руйнування оболонки: механічна взаємодія між паливом і оболонкою (МВПО) на ранніх стадіях опромінювання палива; корозія в області глибоких вигорянь (при вигорянні $B_U > 50$ МВт·діб/кг); руйнування від утомленості.

Вплив на міцність оболонки МВПО на ранніх стадіях опромінювання виключається виконанням регламентних вимог за допустимими значеннями лінійних навантажень і стрибків потужності РУ, а вплив корозії – оптимізацією сполуки й процесу термічної обробки сплавів.

При аналізі руйнування оболонки від утомленості в режимі змінних навантажень ключовим є аналіз МВПО при багатократних змінах рівня потужності, результатом якого є накопичена еквівалентна деформація повзучості матеріалу оболонки.

Для оцінки експлуатаційного ресурсу оболонки твела використовувався метод розрахунку параметра $\omega(\tau)$ сумарного пошкодження матеріалу оболонки на основі ЕВТП, що враховує взаємозв'язок процесів повзучості й накопичення пошкоджень. Для оцінки часу експлуатації оболонки (без аварійних режимів) при багатократних змінах потужності РУ необхідно обчислити роботу $A(\tau)$, накопичену в процесі повзучості до момен-

ту руйнування оболонки й витрачену на її руйнування. При руйнуванні оболонки твела справедливо [7]:

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0} = 1; A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot dt; \quad (2)$$

$$A_0 - \text{за умови: } \sigma_e^{\max}(\tau_0) = \sigma_0^{\max}(\tau_0),$$

де A_0 – питома енергія розсіяння $A(\tau)$ у момент втрати стійкості τ_0 матеріалу оболонки, при досягненні рівності між величинами еквівалентної напруги $\sigma_e^{\max}(\tau)$ та межі текучості $\sigma_0^{\max}(\tau)$ у точці оболонки з максимальною температурою; σ_e – еквівалентна напруга, Па; \dot{p}_e – швидкість еквівалентної деформації повзучості, с^{-1} .

У виразі (2) застосовуються критерії міцності оболонки SC2 і SC4. Крім того, враховуються обмеження по решті всіх критеріїв міцності (SC1, SC3, SC5), що дає змогу врахувати вплив змінних режимів на стан твела у всіх режимах нормальної експлуатації. Розрахунок σ_e , \dot{p}_e до вигоряння більше 50 МВт·діб/кг з урахуванням реальної послідовності змін потужності РУ і параметрів теплоносія здійснювався за допомогою програмного засобу (ПЗ) FEMAXI [8]. Довжина твела умовно ділилася на 10 аксіальних сегментів, для центральної точки кожного з яких задавалася своя лінійна потужність, пропорційна потужності РУ. Для стовпа паливних таблеток і оболонки проводилась дискретизація у циліндричній геометрії за допомогою кільцевих елементів. Кількість радіальних розрахункових ланок задавалася 10 і 4 для таблеток і оболонки відповідно.

У моделі оцінки міцності оболонки початковими даними є конструкційні параметри твела і режимні параметри АКЗ, а основними вихідними даними – розподіл температури, еквівалентного напруження і деформації повзучості в оболонці.

Аналіз напруження/деформації в циліндричній геометрії виконувався з використанням МКЕ, де чотирикутний елемент має чотири виміри свободи. Дві внутрішні ділянки моделюють матеріал оболонки, а дві зовнішні – шар окислу цирконію. Швидкість еквівалентної деформації повзучості оболонки \dot{p}_e записана у вигляді функції тангенціальної напруги в оболонці, температури оболонки і потоку швидких ($E > 1,0$ МеВ) нейтронів. Розрахунок характеристик теплопередачі та напруження здійснювався через цикл збіжності [8].

Розрахувавши $p_e(\tau)$ і $\sigma_e(\tau)$ для заданого режиму навантаження твела, знаходимо енергію необоротних деформацій повзучості і параметр $\omega(\tau)$ оболонки, що визначає її пошкодження в змінному режимі.

Прийmemo, що реактор у буденні дні тижня працює за добовим циклом навантаження, згідно з яким протягом перших 16 годин кожної розрахункової доби потужність N реактора дорівнює номінальній потужності $N_{\text{ном}}$, потім протягом однієї години N знижується до 75 % $N_{\text{ном}}$, протягом 6 годин $N = 75\% N_{\text{ном}}$, далі, протягом останньої години розрахункової 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 % $N_{\text{ном}}$ і залишається такою протягом шостої доби і 23 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 годин кожного тижня $N = 100, 75$ і 50 % $N_{\text{ном}}$ відповідно.

Результати числового аналізу

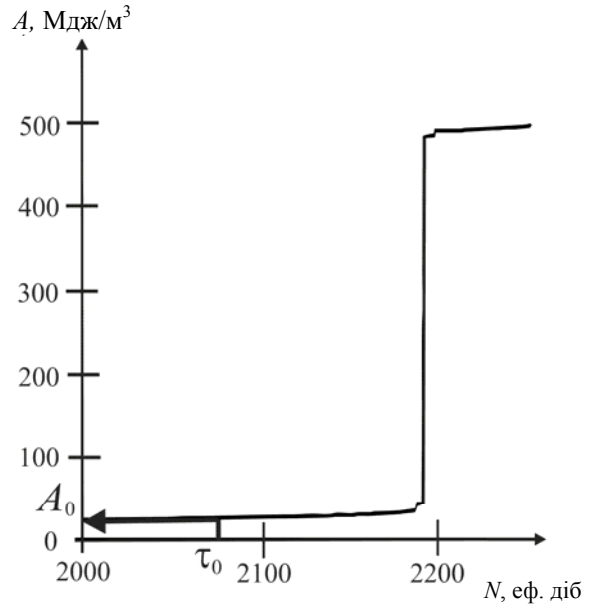
У результаті проведених розрахунків визначено вплив режимних параметрів АКЗ РУ і конструкційних характеристик ТВЗ на зміну властивостей оболонки твела в різних режимах навантаження.

Показано, що накопичена питома енергія розсіяння $A(N)$ оболонки твела ВВЕР-1000 залежить від режимних характеристик РУ [9]. Зменшення середньої по довжині твела лінійної потужності $\langle q_l \rangle$, при незмінних інших характеристиках, приводить до збільшення кількості циклів навантаження до початку прискореної повзучості.

Досліджені ТВЗ різних конструкцій на предмет руйнування оболонки твела при їхньому змінному навантаженні [10]. Розрахунок питомої енергії розсіяння $A(N)$ для оболонки ВВЕР-1000, виконаний для комбінованого циклу змінного навантаження на основі запропонованої математичної

моделі, показав, що $A(N)$ істотно залежить від конструкційних характеристик твела, наприклад від величини діаметра центрального отвору таблетки $d_{\text{табл}}^{\text{н.о.}}$ [10]. У момент втрати стійкості оболонки $\tau_0 = 2074$ еф. діб для $d_{\text{табл}}^{\text{н.о.}} = 0,112$ см досягається виконання умови $\sigma_e^{\text{max}}(\tau_0) = \sigma_0^{\text{max}}(\tau_0)$.

Отримавши для $d_{\text{табл}}^{\text{н.о.}} = 0,112$ см значення $\tau_0 = 2074$ еф. діб, відповідну величину $A_0 = 25,5$ МДж/м³ визначають на основі залежності $A(N)$ (рисунок).



Визначення величини A_0 для $d_{\text{табл}}^{\text{н.о.}} = 0,112$ см.

Розрахункова величина питомої енергії розсіяння $A(N)$ і час експлуатації оболонки твела ВВЕР-1000 до початку прискореної повзучості оболонки істотно залежать від режиму змінного навантаження. Використовуючи міцнісний критерій $\sigma_e^{\text{max}}(\tau_0) = \sigma_0^{\text{max}}(\tau_0)$ втрати стійкості оболонки твела через механізм «пластичного шарніра» (див. умову руйнування оболонки (2)), для різних величин максимальної (за довжиною твела) лінійної потужності q_l^{max} для постійного й комбінованого змінного режимів навантаження ВВЕР-1000 виконано оцінку часу втрати стійкості τ_0 оболонки, кількості циклів змінного навантаження $N_{\text{ц}}$ до втрати стійкості оболонки, питомої енергії розсіяння $A(\tau)$ у момент втрати стійкості τ_0 матеріалу оболонки, параметра пошкодження $\omega(\tau)$ оболонки твела після 1576 еф. діб (табл. 2) [9].

Відповідно до результатів розрахункової оцінки параметра ω після 1576 еф. діб робота ВВЕР-1000 в комбінованому режимі навантажен-

Таблиця 2. Параметр пошкодження ω (1576 еф. діб) для постійного і комбінованого режимів навантаження ВВЕР-1000

q_l^{\max} , Вт/см		248	258	263	273	298
$\langle\Phi\rangle$, 10^{14} см ⁻² ·с ⁻¹		1	1,04	1,06	1,1	1,2
Постійний режим навантаження	τ_0 , еф. діб	2211	2078	2016	1904	1631
	A_0 , МДж/м ³	33,37	35,66	36,87	39,74	47,64
	ω (1576 еф. діб), %	60	65	68	74	94
Комбінований режим навантаження	τ_0 , еф. діб	2246	2102	2032	1903	1576
	$N_{\text{ц}}$	1925	1802	1742	1631	1351
	A_0 , МДж/м ³	27,36	29,14	30,05	32,10	37,69
	ω (1576 еф. діб), %	57	64	67	74	100

ня має перевагу в порівнянні з роботою в стаціонарному режимі при $q_l^{\max} \leq 273$ Вт/см.

На основі запропонованої математичної моделі зміни властивостей оболонки твела РУ в циклічному режимі навантаження досліджено параметричну чутливість оцінки міцності до режимних характеристик АКЗ ядерного реактора і конструктивних параметрів твела ТВЗ ВВЕР-1000, що дало змогу визначити три групи характеристик і параметрів: які практично не впливають, слабо впливають і визначають умови руйнування оболонки [11].

Дослідження параметричної чутливості даних, що визначають умови руйнування оболонки, дозволило створити науково обгрунтовані передумови для розробки компромісно-комбінованого методу регулювання потужності РУ [12].

Таким чином, при розробленні математичної моделі зміни властивостей оболонки твела ВВЕР-1000 в змінному режимі навантаження вирішено завдання формалізації механізму впливу режимів навантаження РУ з ВВЕР-1000 на стан оболонки твела, включаючи її граничний стан.

Висновки

1. На базі вирішення системи рівнянь теплопровідності та механічної деформації методом кінцевих елементів запропоновано математичну модель зміни властивостей оболонки твела РУ,

яка відрізняється тим, що процеси повзучості й накопичення пошкоджень визначаються взаємопов'язано через роботу руйнування оболонки твела. Це дає можливість визначити умови зміни стану оболонки твела при будь-якому навантаженні РУ.

2. На основі енергетичного варіанта теорії повзучості вдосконалено метод аналізу міцності оболонки твела, що дозволяє враховувати вимоги всіх критеріїв міцності оболонки твела РУ з ВВЕР-1000 в єдиній розрахунковій моделі.

3. З точки зору довговічності оболонки максимально навантаженого твела робота ВВЕР-1000 в комбінованому режимі змінного навантаження має перевагу в порівнянні з роботою в стаціонарному режимі при максимальній (за довжиною твела) лінійній потужності $q_l^{\max} \leq 273$ Вт/см.

4. Для оцінювання допустимої тривалості експлуатації реактора ВВЕР-1000 у змінному режимі необхідно додатково: врахувати різницю між ТВЗ за максимальною лінійною потужністю та історією їхніх перестановок в АКЗ; визначити вплив зростання товщини окисного шару зовнішньої поверхні оболонки на час стійкості оболонки; врахувати вплив дефектів матеріалу оболонок на межу текучості оболонки твела; врахувати різницю в амплітуді стрибка потужності між аксіальними сегментами твела.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Енергетична стратегія України на період до 2030 року та подальшу перспективу* (Проект). - К.: Мінпаливенерго та НАН України, 2003. - 16 с.
2. *Прутула К.М.* Формирование энергетического баланса Украины // Региональная экономика. - 2006. - № 3. - С. 41.
3. *Підсумки роботи електроенергетики у 2003 р.* (Звіт). - К.: Мінпаливенерго України, 2003. - 8 с.
4. *Запорожская АЭС: блоки 5, 6 (расширение до 6000 МВт).* Проект. - М.: Ин-т "Атомтеплоэлектростроительство", 1985. - 214 с.
5. *Алексеев Е. Е.* Разработка методов расчета работоспособности твэлов ВВЭР в вероятностной и детерминистической постановке: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. - М., 2008. - 31 с.
6. *Новиков В.В., Медведев А.В., Богатырь С.М. и др.* Украинско-российский научно-практический семинар "Опыт эксплуатации и внедрения топлива ВВЭР нового поколения. Обеспечение работоспособности ядерного топлива в маневренных режимах". - Хмельницкий: ХАЭС, 2005. - 22 с.
7. *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. - Vol. 239, No. 12. - P. 3021 - 3026.*
8. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / Пер. с англ. С.Н. Пельх; под ред. М.В. Максимова. - Одесса: Астропринт, 2010. - 248 с.
 9. Максимов М.В., Пельх С.Н., Маслов О.В., Баскаков В.Е. Метод оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла ВВЭР-1000 в различных режимах нагружения // Атомная энергия.- 2010. - Т. 108, вып. 5. - С. 294 - 299.
 10. Максимов М.В., Пельх С.Н., Маслов О.В., Баскаков В.Е. Методика сравнения долговечности оболочек твэлов, работающих в переменном режиме // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - Харьков, 2009. - № 4/2. - С. 192 - 197.
 11. Максимов М.В., Пельх С.Н., Маслов О.В., Баскаков В.Е. Влияние неопределенности исходных данных на оценку долговечности оболочки твэла при переменном режиме эксплуатации // Ядерная и радиационная безопасность. - 2009. - № 2. - С. 13 - 18.
 12. 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. 53 - 58.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА ВВЭР-1000 В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ НАГРУЖЕНИЯ

С. Н. Пельх

Приведены основные принципы построения математической модели изменения свойств оболочки твэла ВВЭР-1000 в переменном режиме нагружения нормальной эксплуатации. Синтезированная модель основана на энергетическом варианте теории ползучести и использует метод конечных элементов для совместного решения уравнений теплопроводности и механической деформации компонентов твэла. Предложенная математическая модель позволяет определить влияние режимных параметров ВВЭР-1000 и конструктивных характеристик тепловыделяющих сборок на изменение свойств оболочки твэла в различных режимах нагружения нормальной эксплуатации, а также предельное состояние оболочки в переменном режиме в зависимости от продолжительности, глубины и количества циклов.

Ключевые слова: ВВЭР, переменный режим нагружения, долговечность оболочки твэла, параметр повреждения оболочки, энергетический вариант теории ползучести.

FUEL ELEMENT CLADDING STATE CHANGE MATHEMATICAL MODEL FOR A WWER-1000 PLANT OPERATED IN THE MODE OF VARYING LOADING

S. N. Pelykh

Main features of a fuel element cladding state change mathematical model for a WWER-1000 reactor plant operated in the mode of varying loading are listed. The integrated model is based on the energy creep theory, uses the finite element method for simultaneous solution of the fuel element heat conduction and mechanical deformation equations. Proposed mathematical model allows us to determine the influence of the WWER-1000 regime parameters and fuel assembly design characteristics on the change of cladding properties under different loading conditions of normal operation, as well as the cladding limiting state at variable loading depending on the length, depth and number of cycles.

Keywords: WWER, varying loading mode, cladding durability, cladding failure parameter, energy variant of creep theory.

Надійшла до редакції 08.07.10,
після доопрацювання - 29.10.10.