

УДК 621.039.548

С.Н. Пельх, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
М.В. Максимов, д-р техн. наук, проф.,
Одес. нац. политехн. ун-т,
О.А. Назаренко, канд. техн. наук, доц., Одес. гос.
акад. стр-ва и архитектуры

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ СВОЙСТВАМИ ТВЭЛОВ В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА

С.М. Пельх, М.В. Максимов, О.А. Назаренко. **Метод управління властивостями твелів в нормальних умовах експлуатації легководного реактора.** Використовуючи енергетичний варіант теорії повзучості (ЕВТП), ЕВТП-метод розрахунку пошкодження оболонки твела, а також критеріальну модель ефективності управління властивостями твелів та імовірнісну модель параметрів нормальної експлуатації легководного реактора, синтезовано метод управління властивостями твелів, що враховує повзучість як основний фізичний механізм руйнування оболонки твела, всі чинники її експлуатації, які обмежують вимоги безпеки та ефективності.

Ключові слова: оболонка, твел, управління властивостями, легководний реактор.

С.Н. Пельх, М.В. Максимов, О.А. Назаренко. **Метод управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора.** Используя энергетический вариант теории ползучести (ЭВТП), ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки твэла, а также критериальную модель эффективности управления свойствами твэлов и вероятностную модель параметров нормальной эксплуатации легководного реактора, синтезирован метод управления свойствами твэлов, учитывающий ползучесть как основной физический механизм разрушения оболочки твэла, все факторы ее эксплуатации, ограничивающие требования к безопасности и эффективности.

Ключевые слова: оболочка, твэл, управление свойствами, легководный реактор.

S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, O.A. Nazarenko. **Method for controlling LWR fuel properties under normal operating conditions.** Using creep energy theory (CET), the CET-method of fuel element cladding damage calculation, a criterion model of efficiency of controlling fuel properties and a probabilistic model of LWR normal operation parameters, a method for controlling fuel properties taking into account creep as the main mechanism of cladding failure, all operation conditions as well as limiting safety and efficiency conditions, has been synthesized.

Keywords: cladding, fuel element, controlling properties, LWR.

Введение

Опыт эксплуатации легководных реакторов показал, что главным фактором, ограничивающим повышение энергонапряженности активной зоны (АКЗ), удлинение кампании и увеличение глубины выгорания топлива, является долговечность твэлов, зависящая прежде всего от развития напряжений и деформаций в оболочке из-за механического взаимодействия оболочки с топливной таблеткой. Для подтверждения выполнимости твэлами функциональных требований используются четыре обобщенных критерия приемки: прочностной (критерии SC1...SC5), деформационный, теплофизический и коррозионный [1]. Согласно существующему подходу к оценке долговечности оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000 в режиме нормальной эксплуатации, параметр, описывающий общую поврежденность материала оболочки твэла, оценивается по прочностному критерию SC4 через относительную длительность эксплуатации оболочки, когда компоненты поврежденности в результате стационарного и циклического переменного режимов эксплуатации рассматриваются отдельно, на основе принципа аддитивности. Этот подход имеет такие недостатки, как несоответствие между экспериментальными условиями,

при которых получены ограничивающие зависимости для компонентов критерия прочности и реальными условиями эксплуатации оболочки; не учитывается основной физической механизм (процесс ползучести) накопления поврежденности в оболочке; неопределенность оценки долговечности оболочки по SC4 вынуждает принимать высокий коэффициент запаса для данного критерия (10); ограничивающие зависимости для компонентов критерия прочности зависят от условий нагружения реактора, метода маневрирования мощностью, размещения регулирующих органов (РО) в АКЗ и амплитуды их перемещения при маневрировании, алгоритма перестановок тепловыделяющих сборок (ТВС) после каждой кампании и др.; ограничивающие компоненты критерия прочности не доступны в открытых источниках [1].

Целью статьи является разработка метода управления свойствами твэлов как на стадии проектирования, так и в нормальных условиях эксплуатации реакторной установки (РУ) с легководным реактором, основанного на энергетическом варианте теории ползучести (ЭВТП), что позволит значительно повысить эффективность и безопасность эксплуатации действующих и перспективных легководных реакторов за счет учета реальных условий эксплуатации твэла и корректной оценки развития напряжений и деформаций в оболочке путем обеспечения соответствия между экспериментальными условиями, при которых получены ограничивающие зависимости для компонентов критерия SC4 и реальными условиями эксплуатации оболочки; учета процесса ползучести как основного физического механизма накопления поврежденности в оболочке; снижения неопределенности оценки долговечности оболочки и расширения пределов безопасной эксплуатации РУ; учета условий нагружения и метода маневрирования мощностью РУ, размещения РО в АКЗ и амплитуды их перемещения при маневрировании, алгоритма перестановок ТВС после каждой кампании [2].

ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки твэла

Согласно ЭВТП критерий разрушения оболочки записывается в виде [2]

$$\omega(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau / A_0 = 1, \quad (1)$$

где $\omega(\tau)$ — поврежденность материала оболочки;

$A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau$ — удельная энергия рассеяния в момент времени τ , Дж/м³;

A_0 — удельная энергия рассеяния, характерная для разрушения материала, определяемая только свойствами самого материала и не зависящая от параметров нагружения материала;

$\sigma_e(\tau)$, $\dot{p}_e(\tau)$ — соответственно эквивалентное напряжение (Па) и скорость эквивалентной деформации ползучести (с⁻¹).

Метод расчета $\omega(\tau)$ на основе ЭВТП и соотношений модели изменения свойств твэла (ЭВТП-метод) позволил установить основные факторы, определяющие поврежденность оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора. ЭВТП-метод основан на следующих допущениях [2]:

— ограничивающее влияние на долговечность оболочки таких факторов, как механическое взаимодействие между топливом и оболочкой (МВТО) при малых выгораниях топлива, механическое повреждение оболочки вследствие коррозионного растрескивания под напряжением (КРН), коррозия в области глубоких выгораний, пластическая деформация оболочки может быть исключена путем оптимизации регламента эксплуатации и технологии производства оболочки;

— наиболее существенным для управления свойствами твэлов является корректное описание процесса разрушения оболочки, вызванного комбинацией многократных циклических и долговременных стационарных нагружений;

— поскольку ползучесть определяет процесс деформации оболочки твэла как при стационарных, так и переменных режимах нормальной эксплуатации легководного реактора, метод оценки условий разрушения оболочки при этих условиях должен быть построен на основе учета процесса ползучести как основного механизма деформации оболочки [1].

Согласно ЭВТП-методу:

- процессы разрушения и ползучести в оболочке протекают совместно и влияют друг на друга;
- в любой момент времени интенсивность разрушения оболочки оценивается через удельную энергию рассеяния A , накопленную на данный момент в процессе ползучести;
- лимитирующий компонент A_0 критерия разрушения оболочки не зависит от условий нагружения оболочки, в том числе от метода маневрирования мощностью РУ, последовательности уровней мощности, размещения РО в АКЗ, алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, и определяется исключительно свойствами материала оболочки;
- A_0 находится как $A(\tau)$, рассчитанная в момент начала разрушения оболочки τ_0 , когда выполняется предельное условие для самого внутреннего радиального элемента в анализируемом аксиальном сегменте (АС) оболочки:

$$\lim(dA/d\tau)^{-1} \rightarrow 0 \text{ при } \tau \rightarrow \tau_0. \quad (2)$$

В результате расчетов $A(\tau)$ по ЭВТП-методу для оболочки из циркалоя-4 при различных условиях нагружения твэла РУ с ВВЭР-1000 получено, что расчетные зависимости $A(\tau)$ для оболочки подобны экспериментальным и расчетным зависимостям, полученным для различных сплавов при различных условиях нагружения [3]. Величина A_0 , определенная по условию (2), составляет $A_0=55$ МДж/м³ и не меняется при значительном изменении условий нагружения оболочки, что соответствует ЭВТП. Напротив, при определении A_0 на основе прочностного критерия SC2

$$\sigma_e(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0(\tau_0), \quad (3)$$

где $\sigma_e(\tau_0)$ и $\sigma_0(\tau_0)$ — эквивалентное напряжение и предел текучести оболочки, Па;

η — числовой коэффициент, $\eta \leq 1$,

получено, что расчетная величина $A_0=[30...40]$ МДж/м³ и значительно отличается при значительном отличии условий нагружения оболочки: более напряженным условиям эксплуатации оболочки соответствуют большие значения A_0 , со средним арифметическим $\langle A_0 \rangle = 34,5$ МДж/м³ и диапазоном изменения $\Delta A_0 = 7,6\%$ от $\langle A_0 \rangle$. Таким образом, незначительное отличие значений A_0 , рассчитанных по (3), может использоваться в качестве определяющего признака незначительного отличия условий нагружения оболочки для альтернативных совокупностей параметров нормальной эксплуатации. Получено, что на основе (3) невозможно для всех альтернативных совокупностей параметров нормальной эксплуатации оболочки найти параметр η , при котором выполнялись бы одновременные условия

$$\sigma_e(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0(\tau_0); \eta = \text{idem } \forall \text{ совокупности параметров}; \omega(\tau) \leq 1. \quad (4)$$

Оценка A_0 по (3) консервативнее оценки по (2), но при этом не отвечает принципу независимости от условий нагружения материала оболочки, поэтому при управлении свойствами твэлов целесообразно определять A_0 на основе “консервативной ЭВТП-оценки”, т.е. совместного учета принципов независимости A_0 от условий нагружения оболочки и консервативности, принимая $A_0 = \text{const} = 30$ МДж/м³. Коэффициент запаса при такой оценке $K_{\text{норм}} = 55/30 \approx 2$, что в 5 раз меньше коэффициента запаса $K_{\text{норм}}=10$ при оценке условий разрушения оболочки по прочностному критерию SC4. “Консервативная ЭВТП-оценка” условий разрушения оболочки позволяет достичь независимости ограничивающих компонентов критерия разрушения оболочки от условий ее нагружения и предложить алгоритм управления свойствами твэлов, поэтому она предпочтительнее подхода на основе критериев SC2 и SC4 (остальные прочностные критерии также учитываются в ЭВТП-методе, но не являются ограничивающими в нормальных условиях эксплуатации) [2].

Основные факторы, детерминирующие $\omega(\tau)$ при нормальных условиях эксплуатации РУ с ВВЭР-1000, найдены путем определения усредненной относительной разницы $\delta A_{i,\pm}(\tau)$ между

удельной энергией рассеяния $A_{i,\pm}(\tau)$ для набора параметров $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0} \pm \Delta X_i, \dots, X_{k,0}\}$ и удельной энергией рассеяния $A_B(\tau)$ для базового набора параметров $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0}, \dots, X_{k,0}\}$:

$$\delta A_{i,\pm}(\tau) = \frac{|A_{i,+}(\tau) - A_B(\tau)| + |A_{i,-}(\tau) - A_B(\tau)|}{2 \cdot A_B(\tau) \cdot \Delta X_i}, \quad (5)$$

где τ — время (эф. сут.);

ΔX_i — отклонение i -го варьируемого параметра, %.

После вычисления значений $\delta A_{i,\pm}(\tau)$ для центрального АС средненагруженного твэла ВВЭР-1000 после непрерывной эксплуатации РУ в течение 2000 эф. сут. ($\tau \approx 5,48$ эф. лет) по комбинированному циклу нагружения [2] выделены детерминирующие разрушение оболочки факторы (ДФ), характеризуемые $\delta A_{i,\pm} \geq 0,35$ (при расчете $\delta A_{i,\pm}(\tau)$ не учитывались перестановки ТВС). В нормальных условиях эксплуатации легководного реактора наиболее значимыми ДФ являются максимальная линейная мощность в твэле $q_{l,\max}$ и температура теплоносителя на входе РУ $T_{т/н,вх}$ (см. таблицу).

Основные факторы, детерминирующие $\omega(\tau)$

| № | Детерминирующий фактор | Обозначение | $\delta A_{i,\pm}$ | Направленность |
|---|---|--------------|--------------------|---|
| 1 | Максимальная линейная мощность в твэле | $q_{l,\max}$ | 18,7 | если $q_{l,\max} \uparrow$, то $\omega(\tau) \uparrow$ |
| 2 | Температура теплоносителя на входе РУ | $T_{т/н,вх}$ | 5,6 | если $T_{вх} \uparrow$, то $\omega(\tau) \uparrow$ |
| 3 | Наружный диаметр оболочки | $d_{об}^H$ | 4,19 | если $d_{об}^H \uparrow$, то $\omega(\tau) \downarrow$ |
| 4 | Диаметр таблетки | $d_{таб}$ | 2,15 | если $d_{таб} \uparrow$, то $\omega(\tau) \uparrow$ |
| 5 | Толщина оболочки | a | 1,8 | если $a \uparrow$, то $\omega(\tau) \downarrow$ |
| 6 | Шаг решетки твэлов | δ | 0,83 | если $\delta \uparrow$, то $\omega(\tau) \downarrow$ |
| 7 | Скорость теплоносителя на входе РУ | $w_{т/н,вх}$ | 0,74 | если $w_{т/н,вх} \uparrow$, то $\omega(\tau) \downarrow$ |
| 8 | Диаметр центрального отверстия таблетки | $d_{отв}$ | 0,35 | если $d_{отв} \uparrow$, то $\omega(\tau) \downarrow$ |

Задавая размещение РО в АКЗ РУ с ВВЭР-1000 для случая усовершенствованного алгоритма (У-алгоритма) управления мощностью АКЗ, перестановки ТВС в АКЗ в ходе четырехлетней кампании и режим суточного маневрирования мощностью РУ, сделаны выводы:

— $\omega(\tau)$ максимальна в АС оболочки твэла, расположенном между координатами $z = 2,19$ и $2,63$ м, считая от нижнего края самой нижней топливной таблетки твэла;

— долговечность оболочки не ограничивается по прочностным критериям SC1 и SC5, а также по условию ограничения максимальной температуры на внешней поверхности окисной пленки оболочки твэла $T_{ок,н}^{\max} \leq 352$ °С;

— скорость роста $A(\tau)$ существенно зависит от алгоритма перестановок ТВС в АКЗ, что объясняется влиянием $q_{l,\max}$;

— поскольку алгоритм перестановок, характеризуемый меньшей $\omega(\tau)$, одновременно характеризуется меньшей эффективностью использования топлива, оцениваемой через глубину выгорания, целесообразно разработать метод управления перестановками ТВС на основе баланса между долговечностью оболочек твэлов и глубиной выгорания топлива [2].

Критериальная модель эффективности управления свойствами твэлов

Критериальная модель эффективности управления свойствами твэлов (КМ) разработана на основе следующих принципов:

Целью управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора является повышение эффективности эксплуатации РУ за счет снижения неопределен-

ности оценки условий разрушения оболочки твэла и, вследствие этого, расширения пределов безопасной эксплуатации РУ на основе использования ЭВТП-метода, а также за счет совместного учета поврежденности оболочек твэлов и экономико-технологических показателей эффективности эксплуатации РУ.

Управление свойствами твэлов осуществляется с учетом технических и эксплуатационных требований к свойствам, определения контролируемых параметров и ДФ.

Структура критерия эффективности управления свойствами твэлов одинакова для всех задач управления, однако компоненты критерия не являются инвариантными, что отражает специфику конкретной задачи.

Согласно КМ, при управлении свойствами твэлов определяются контролируемые параметры c_i ($i = [1, n_c]$, n_c — количество контролируемых параметров), и основные варьируемые факторы d_j , детерминирующие контролируемые параметры ($j = [1, n_d]$, n_d — количество ДФ). Принимается, что на основе технических и эксплуатационных требований к свойствам твэлов определяются оптимальные c_i^{opt} и предельно допустимые c_i^{lim} значения c_i , и для всех допустимых значений c_i справедливо

$$c_i^{\text{lim}} \leq c_i \leq c_i^{\text{opt}} \text{ либо } c_i^{\text{opt}} \leq c_i \leq c_i^{\text{lim}}. \quad (6)$$

После записи c_i, c_i^{lim} и c_i^{opt} в безразмерном виде

$$c_i^{\text{lim},*} \leq c_i^* \leq c_i^{\text{opt},*}, \text{ где } c_i^{\text{opt},*} = 1. \quad (7)$$

Максимум эффективности управления свойствами твэлов Eff определяется по критерию, имеющему следующую структуру:

$$\max \{ Eff = 1 - L / L^{\text{lim}} \}, \quad (8)$$

$$\text{где } L = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_i} (1 - c_{2i+1}^*)^2 + \sum_{j=1}^{n_j} k_{i,j} (1 - c_{2j}^*)^2}; \quad L^{\text{lim}} = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_i} (1 - c_{2i+1}^{\text{lim},*})^2 + \sum_{j=1}^{n_j} k_{i,j} (1 - c_{2j}^{\text{lim},*})^2}, \quad (9)$$

c_{2i+1}^* (c_{2j}^*) — безразмерные контролируемые параметры с нечетными (четными) индексами такие, что для любого из них справедливо условие: любое изменение размерного контролируемого параметра Δc_{2i+1} (Δc_{2j}) вызывает изменение ΔEff противоположного (того же) знака;

n_i (n_j) — количество контролируемых параметров, изменение каждого из которых вызывает ΔEff противоположного (того же) знака;

$k_{i,j}$ — весовые коэффициенты, учитывающие различие между $c_{2i+1}^{\text{lim},*}$ и $c_{2j}^{\text{lim},*}$, определяемые в случае $c_{2j}^{\text{lim},*} < c_{2i+1}^{\text{lim},*}$ как

$$k_{i,j} = \left[\frac{1 - c_{2i+1}^{\text{lim},*}}{1 - c_{2j}^{\text{lim},*}} \right]^2. \quad (10)$$

Физический смысл критерия (8):

— если $c_{2i+1} > c_{2i+1}^{\text{lim}}$ или $c_{2j} < c_{2j}^{\text{lim}}$, то этот контролируемый параметр вносит негативный вклад в Eff ;

— преимущество одной совокупности ДФ над другой определяется на основе принципа аддитивности, т.е. путем суммирования преимуществ, даваемых каждым из контролируемых параметров c_i .

Разработанная КМ дала возможность предложить алгоритм управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора на основе использования ЭВТП-метода, рассмотрения альтернативных совокупностей ДФ и итерационного расчета наилучшей с точки зрения требований к свойствам твэлов совокупности.

Метод управления конструкционными параметрами твэла

В соответствии с методом управления конструкционными параметрами твэла детерминирующими факторами являются факторы, перечисленные в таблице под номерами 3...8, а контролируемые параметрами являются $\omega(\tau)$ и параметр, описывающий экономическую эффективность эксплуатации твэлов (например, максимум массы M_U или глубины выгорания B_U топлива в ТВС). Ввиду огромного числа возможных сочетаний ДФ применяется метод выборок Монте-Карло. Частным случаем метода управления конструкционными параметрами твэла является метод аксиального профилирования диаметра центрального отверстия таблетки $d_{отв}$, характеризующийся высокой M_U при низкой $\omega(\tau)$. Изготавливая топливные таблетки наиболее напряженных АС твэла (№№ 4...7 при условном разбиении длины твэла на 8 равных АС) с центральными отверстиями, имеющими большие значения $d_{отв}$, а топливные таблетки менее напряженных АС — с меньшими значениями $d_{отв}$, либо без центрального отверстия, возможно достичь максимально высокой загрузки топлива в АКЗ без снижения надежности и долговечности твэлов. Контролируемыми параметрами являются $\omega(\tau)$ в 6-м АС (ω_6) и масса топлива в ТВС M_U , а варьируемым ДФ является $d_{отв}$ в АС №№ 4...7.

Компоненты критерия (8) записаны как

$$L = \sqrt{(1 - \omega_6^*)^2 + k_{m,\omega}(1 - M_U^*)^2}; \quad L^{\lim} = \sqrt{(1 - \omega_6^{\lim,*})^2 + k_{m,\omega}(1 - M_U^{\lim,*})^2}.$$

Пусть на основе технико-экономических требований, либо аналогично методу [5], заданы оптимальные и предельно допустимые значения контролируемых параметров

$$\omega_6^{\text{opr}} = 0,7; \quad \omega_6^{\lim} = 0,73; \quad M_U^{\text{opt}} = 511 \text{ кг}; \quad M_U^{\lim} = 491 \text{ кг}. \quad (11)$$

С учетом (11) безразмерные величины определяются как

$$0,9 \leq \omega_6^* \leq 1; \quad 0,96 \leq M_U^* \leq 1; \quad \omega_6^{\lim,*} = \frac{1 - \omega_6^{\lim}}{1 - \omega_6^{\text{opt}}} = 0,9; \quad \omega_6^* = \frac{1 - \omega_6}{1 - \omega_6^{\text{opt}}}; \quad M_U^{\lim,*} = \frac{M_U^{\lim}}{M_U^{\text{opt}}} = 0,96; \quad M_U^* = \frac{M_U}{M_U^{\text{opt}}}.$$

$$k_{m,\omega} = \left[\frac{1 - \omega_6^{\lim,*}}{1 - M_U^{\lim,*}} \right]^2.$$

Принимая $A_0 = 30 \text{ МДж/м}^3$; $d_{таб} = 0,757 \text{ см}$; $d_{отв} = 0,14 \text{ см}$ в АС № 1...3 и 8, для комбинированного цикла нагружения РУ с ВВЭР-1000 рассчитаны $\omega_6(\tau=6 \text{ эф. лет})$, M_U , Eff . При $d_{отв} = 0,112; 0,14$ и $0,168 \text{ см}$ в АС № 4...7, $Eff = -3,4; -1,3$ и $0,28$, соответственно. Сделаны выводы:

— цель аксиального профилирования $d_{отв}$ в АС № 4...7 достигнута при $d_{отв} = 0,168 \text{ см}$;

— метод аксиального профилирования $d_{отв}$ позволяет обеспечить баланс между требованиями к долговечности оболочек твэлов и к массе ядерного топлива в ТВС.

Метод управления температурным режимом теплоносителя

В соответствии с методом управления температурным режимом теплоносителя контролируемые параметрами являются $\omega_6(\tau)$ и максимальное расхождение графиков мгновенного и равновесного аксиального офсета (АО) ΔAO^{\max} , а варьируемым ДФ является программа изменения $T_{т/н, вх}$. Задавались требования (индекс “max” опущен):

$$\omega_6^{\text{opt}} = 3 \%; \quad \omega_6^{\lim} = 10 \%; \quad \Delta AO^{\text{opt}} = 1 \%; \quad \Delta AO^{\lim} = 5 \%. \quad (12)$$

Рассматривались программы с $T_{т/н, вх} = \text{const}$ (П1), с $< T_{т/н} > = \text{const}$ (П2) и промежуточная между П1 и П2 программа, согласно которой при снижении мощности РУ N от 100 до 80 % $N_{\text{ном}}$ $T_{т/н, вх}$ увеличивается на 1 °С (П3). Поскольку одной из важнейших задач управления нейтронным полем в АКЗ является предотвращение высотных ксеноновых колебаний энерговыделения, и У-алгоритм является одним из наиболее эффективных с точки зрения стабильности АО,

принималось допущение об использовании У-алгоритма. Получено, что задавая для П1, П2 и П3 одинаковую амплитуду перемещения РО $\Delta H^{\max} = 4\%$, ΔAO^{\max} по П1 ($\approx 1,9\%$) меньше, чем по П2 ($\approx 3\%$) и по П3 ($\approx 2,3\%$). После 500 суточных циклов нагружения РУ, при маневрировании по П2 среднее по всем твэлам АКЗ значение $\omega_6(\tau)$ на 10% больше, чем для П1, при прочих равных условиях. Записывая выражения КМ аналогично методу управления конструкционными параметрами твэла, для программ П1, П2 и П3, $Eff = 0,58; 0,41$ и $0,5$, соответственно. Сделаны выводы:

- цель управления температурным режимом теплоносителя достигнута при П1;
- метод управления температурным режимом теплоносителя позволяет предложить программу изменения $T_{т/н, вх}$ с $T_{т/н, вх} = \text{const}$, характеризующуюся высокой стабильностью АО при низкой поврежденности оболочек твэлов РУ с ВВЭР-1000.

Необходимо отметить, что

- $q_{l, \max}$ в твэле определяется как текущим уровнем мощности РУ, задаваемым энергоблоку объединенной энергосистемой (ОЭС), так и алгоритмом перестановок ТВС в АКЗ;
- расположение РО в АКЗ значительно влияет на эффективность стабилизации АО при изменении мощности РУ, зависящую от дистанции между поглощающими стержнями и свежими ТВС;
- задавая в качестве контролируемых параметров $\omega_6(\tau)$ и ΔAO^{\max} , на основе использования КМ возможно предложить метод управления расположением РО в АКЗ, где варьируемым ДФ является расположение РО;
- если принять, что используется У-алгоритм, а баланс между стационарным и переменным нагружением РУ определяется ОЭС, то для управления свойствами твэлов наиболее важно управление температурным режимом теплоносителя и перестановками ТВС.

Метод управления перестановками ТВС

Согласно методу управления перестановками ТВС, рассматривая ТВС, используемые при алгоритме перестановок j , максимальное ω_j^{\max} и среднее $\langle \omega \rangle_j$ значения поврежденности оболочек твэлов, минимальное значение выгорания топлива B_j^{\min} являются контролируемыми параметрами, а алгоритм перестановок ТВС является варьируемым ДФ. Задавая $A_0 = 30$ МДж/м³, используя модель перестановок ТВС во время перегрузок топлива [5], для различных алгоритмов перестановок выполнен расчет $\omega(1460 \text{ сут.})$ и выгорания топлива $B(1460 \text{ сут.})$ в АС 6, учитывая перемещение РО для У-алгоритма и программы П1. При рассмотрении сегмента АКЗ, включающего 1/6 всех ячеек АКЗ (для ТВС каждого года выделяются $m=7$ ячеек АКЗ), число возможных алгоритмов $N_{alg} = (7!)^3 = 128 \cdot 10^9$, поэтому применялся алгоритм случайного выбора ячеек с помощью функции MATLAB "rand". Считая $N_{alg} = 18$, анализировались 18 алгоритмов, содержащих 126 перестановок, в том числе 16 алгоритмов, содержащих 112 перестановок, выбирались случайным образом, тогда как два алгоритма ($j=17$ и 18) были использованы на 5-м энергоблоке ЗАЭС во время кампаний 22 и 23 [4]. Принималось, что все алгоритмы удовлетворяют требованиям к максимально допустимой величине коэффициента неравномерности энерговыделения в АКЗ. С учетом равной приоритетности требований по безопасности и эффективности эксплуатации РУ

$$\omega^{\text{lim},*} = \langle \omega \rangle^{\text{lim},*} = B^{\text{lim},*}. \quad (13)$$

Записывая выражения КМ аналогично [5], задавая требование $\omega^{\text{lim}} = 13\%$, Eff рассчитана для 18 алгоритмов. Получено:

- цель управления перестановками ТВС достигнута при $j=3$;

— кроме снижения ω_j^{\max} и $\langle \omega \rangle_j$, а также повышения B_j^{\min} , физический смысл повышения Eff состоит в уменьшении диапазонов изменения ω и B ;

— метод управления перестановками ТВС в АКЗ может применяться для выбора алгоритма, характеризующегося высокими показателями одновременно по долговечности оболочек твэлов и глубине выгорания топлива;

— задавая в качестве контролируемых параметров ω_j^{\max} , $\langle \omega \rangle_j$ и B_j^{\min} , возможно предложить метод управления балансом стационарного и переменного нагружения РУ, где варьируемым ДФ является N .

Вероятностная модель параметров эксплуатации легководного реактора

Разработана вероятностная модель (ВМ) расчетных параметров нормальной эксплуатации легководного реактора, учитывающая неопределенность в знании условий эксплуатации твэла, определяющих долговечность оболочки, и основанная на использовании закона нормального распределения и метода выборок Монте-Карло (МК) [5]. Основные допущения ВМ:

— расчетное значение j -го ДФ является средним соответствующей случайной величины d_j^{rand}

$$d_j \equiv \langle d_j^{\text{rand}} \rangle. \quad (14)$$

— контролируемые параметры c_i рассчитываются при $[\langle d^{\text{rand}} \rangle - \Delta d]$ и $[\langle d^{\text{rand}} \rangle + \Delta d]$, Δd – интервал изменения d^{rand} ($n_d = 1$);

— используя правило трех сигм нормального распределения, определяются средние величины $\langle c_i \rangle$ и стандартные отклонения $\sigma(c_i)$ для c_i ;

— получая на основе $\langle c_i \rangle$ и $\sigma(c_i)$ выборки МК, рассчитываются выборки $Eff\{c_i\}$, определяются средние $\langle Eff\{c_i\} \rangle$ и стандартные отклонения $\sigma(Eff\{c_i\})$ для альтернативных совокупностей ДФ;

— в координатах $\{\sigma(Eff\{c_i\}); \langle Eff\{c_i\} \rangle\}$ для альтернативных совокупностей ДФ строится кривая эффективности и осуществляется выбор наилучших из них на основе компромисса между $\sigma(Eff\{c_i\})$ и $\langle Eff\{c_i\} \rangle$, других дополнительных условий.

Оценка интервалов неопределенности Δd_j в знании ДФ выполнялась для $q_{l,j,\max}$ и $T_{т/н,вх}$.

Точность расчета $q_{l,j,\max}$ составляет 5 % [6], возможное отклонение $T_{т/н,вх}$ от номинального значения с учетом точности измерения и регулирования составляет + 2 °С [7]. Следовательно, неопределенность в знании $T_{т/н,вх}$ составляет менее 1 % и в 5 раз меньше неопределенности в знании $q_{l,j,\max}$. Поскольку учет неопределенности в знании двух ДФ ведет к значительному увеличению расчетного времени, принимая во внимание, что неопределенность в знании $q_{l,j,\max}$ в пять раз превышает соответствующую величину для $T_{т/н,вх}$, а также учитывая, что параметр $\delta A_{i,\pm}$ для $q_{l,j,\max}$ более чем в три раза превышает соответствующую величину для $T_{т/н,вх}$, учитывалась неопределенность в знании только $q_{l,j,\max}$, а неучет $T_{т/н,вх}$ компенсировался консервативностью задания интервала неопределенности в знании $q_{l,\max}$. Принималось, что расчетная величина $q_{l,j,\max}$ является средним случайной величины $q_{l,j,\max}^{\text{rand}}$

$$q_{l,j,\max} \equiv \langle q_{l,j,\max}^{\text{rand}} \rangle. \quad (15)$$

Рассчитаны $\omega(\tau)$ и B для перестановок ТВС алгоритмов 3, 4, 6, 8 и 14 ($N_{alg} = 5$), имеющих наибольшие значения Eff в детерминистическом случае, при $\langle q_{l,сн,\max}^{\text{rand}} \rangle - 10\%$ и $\langle q_{l,сн,\max}^{\text{rand}} \rangle + 10\%$, где $сн$ – номер соответствующей ячейки АКЗ. Перестановка k алгоритма j описывалась случайными величинами $\omega_{j,k}^{\text{rand}}$ и $B_{j,k}^{\text{rand}}$, где $\omega_j^{\max} = \max\{\omega_{j,k}^{\text{rand}}\}$; $\langle \omega \rangle_j = \langle \{\omega_{j,k}^{\text{rand}}\} \rangle$; $B_j^{\min} = \min\{B_{j,k}^{\text{rand}}\}$,

где $j = 1, \dots, N_{alg}$; $k = 1, \dots, 7$. Таким образом, 35 перестановок ТВС описывались $2 \cdot N_{alg} \cdot 7 = 70$ случайными величинами. Для $k = 1, \dots, 7$ и $j = 3, 4, 6, 8, 14$, используя правило трех сигм, вычислялись средние $\langle \omega_{j,k}^{rand} \rangle$, $\langle B_{j,k}^{rand} \rangle$ и стандартные отклонения $\sigma(\omega_{j,k}^{rand})$, $\sigma(B_{j,k}^{rand})$. Например, алгоритм 3 (9-19-21-8 + 5-41-68-43 + 55-22-10 + 13-11-20-6 + 3-30-54-1 + 4-32-18-42 + 2-31-12-29) описывался случайными величинами $\tau_{3,p,k}$, где $p=1$ обозначает $\omega_{3,k}^{rand}$ и $p=2$ обозначает $B_{3,k}^{rand}$:

$$\tau_{3,1,1} \equiv \omega_{9-19-21-8}^{rand}; \dots \tau_{3,1,7} \equiv \omega_{2-31-12-29}^{rand}; \tau_{3,2,1} \equiv B_{9-19-21-8}^{rand}; \dots \tau_{3,2,7} \equiv B_{2-31-12-29}^{rand}.$$

При большом количестве случайных переменных наиболее привлекательным с точки зрения эффективности расчетов является метод выборок МК [8]. Ряд нормально распределенных случайных величин $\tau_{j,p,k}$ получался подстановкой средних и стандартных отклонений случайных величин $\omega_{j,k}^{rand}$ и $B_{j,k}^{rand}$ в функцию MATLAB “normrnd”, и эффективность алгоритма j определялась, используя критерий (8) в виде

$$Eff_j = f(\theta_{j,1,1}, \theta_{j,1,2}, \theta_{j,2,1}), \quad (16)$$

где $j = 1, \dots, N_{alg}$; $\theta_{j,1,1} = \max\{\tau_{j,1,1}, \dots, \tau_{j,1,7}\}$; $\theta_{j,1,2} = \langle \{\tau_{j,1,1}, \dots, \tau_{j,1,7}\} \rangle$; $\theta_{j,2,1} = \min\{\tau_{j,2,1}, \dots, \tau_{j,2,7}\}$.

Необходимо отметить, что параметры ω^{opt} , $\langle \omega \rangle^{opt}$ и B^{opt} робастной КМ не равны соответствующим постоянным величинам детерминистической КМ. Если N_{alg} увеличивается, то ω^{opt} уменьшается, тогда как при увеличении числа ячеек АКЗ, используемых для управления перестановками ТВС, ω^{opt} увеличивается. Задавая требование $\omega^{lim} = 13\%$, на основе 100 выборок метода МК, в простейшем случае робастного управления перестановками ТВС, когда в сегменте АКЗ для ТВС каждого года кампании учитываются только две ячейки, а также для пяти самых эффективных алгоритмов перестановок, когда учитываются все ТВС сегмента АКЗ, получено, что результаты робастного анализа Eff в целом соответствуют аналогичным результатам детерминистического анализа. Однако, в робастном случае наиболее эффективен алгоритм 8, а не алгоритм 3, как в детерминистическом случае. Это объясняется тем, что в детерминистическом случае $\omega_3^{max} = 7,5\%$, тогда как $\omega_8^{max} = 7\%$. Поскольку $q_{l,j,max}$ влияет на $A(\tau)$ по нелинейному закону, при учете робастности $\langle Eff_8 \rangle > \langle Eff_3 \rangle$. Алгоритм 8 доминирует над всеми другими алгоритмами, имея одновременно более высокое значение $\langle Eff_j \rangle$ и более низкое $\sigma(Eff_j)$. Следовательно, в робастном случае цель управления перестановками ТВС достигнута при $j=8$ (рис. 1).

Обозначая методы управления конструкционными параметрами твэла, расположением РО в АКЗ, балансом стационарного и переменного нагружения РУ, температурным режимом теплоносителя и перестановками ТВС как М(1), М(2), М(3), М(4) и М(5), соответственно, на основе использования ЭВП-метода и М(1)...М(5) синтезирован метод управления свойствами твэлов легководного реактора, отличающийся учетом процесса ползучести как основного физического механизма разрушения оболочки твэла и всех факторов ее нормальной эксплуатации, а также учетом ограничивающих требований одновременно к безопасности и эффективности эксплуатации твэлов, на основе итерационного процесса задания основных факторов, детерминирующих контролируемые параметры, на стадиях проектирования и эксплуатации РУ (рис. 2).

Физический смысл метода управления свойствами твэлов состоит в снижении размерности векторов контролируемых параметров и ДФ за счет последовательного алгоритма управления свойствами твэлов по методам М(1)...М(5), что позволило учесть влияние всех наиболее значимых ДФ ($q_{l,max}$, $T_{т/н,вх}$, конструкционные параметры) на контролируемые параметры, описывающие безопасность и экономическую эффективность эксплуатации твэлов, а также максимально снизить размерность пространства случайных величин, описывающих свойства твэлов.

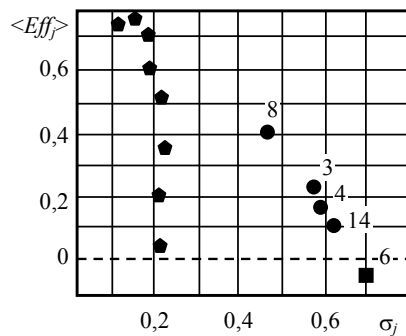


Рис. 1. Соотношение между $\langle Eff_j \rangle$ и $\sigma(Eff_j)$: (число) j , $A_0=30$ МДж/м³; (пятиугольник) случайный алгоритм простейшего робастного управления, $A_0=40$ МДж/м³

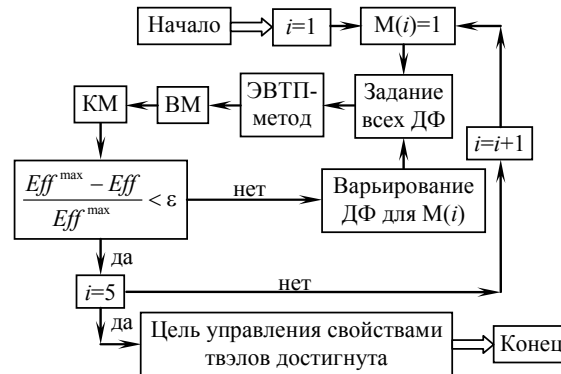


Рис. 2. Метод управления свойствами твэлов легководного реактора

Выводы

— Основными факторами, детерминирующими поврежденность оболочки твэла (ДФ) в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора, являются (в порядке убывания значимости): максимальная линейная мощность в твэле $q_{l,max}$, температура теплоносителя на входе РУ $T_{т/н,вх}$, наружный диаметр оболочки твэла, диаметр топливной таблетки, толщина оболочки, шаг решетки твэлов, скорость теплоносителя на входе РУ, диаметр центрального отверстия таблетки.

— На основе использования ЭВТП-метода, критериальной модели эффективности управления свойствами твэлов и вероятностной модели расчетных параметров нормальной эксплуатации легководного реактора синтезирован метод управления свойствами твэлов, отличающийся учетом процесса ползучести как основного физического механизма разрушения оболочки твэла и всех факторов ее нормальной эксплуатации, принимающий во внимание ограничивающие требования одновременно к безопасности и эффективности эксплуатации твэла, позволяющий снизить размерность векторов контролируемых параметров и варьируемых ДФ за счет последовательного алгоритма управления свойствами твэлов на основе итерационного процесса задания главных ДФ на стадиях проектирования и эксплуатации РУ, что позволило учесть влияние всех наиболее значимых ДФ и максимально снизить размерность пространства случайных величин, описывающих свойства твэлов.

Литература

1. Pelykh, S.N. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Nuclear Engineering and Design. — 2011. — Vol. 241, № 8. — P. 2956 — 2963.
2. Pelykh, S.N. Theory of fuel life control methods at Nuclear Power Plants (NPP) with Water- Water Energetic Reactor (WWER) / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Nuclear Reactors / Ed. A.Z. Mesquita. — Rijeca: InTech, 2012. pp. 197 — 230.
3. Соснин, О.В. Энергетический вариант теории ползучести / О.В. Соснин, Б.В. Горев, А.Ф. Никитенко. — Новосибирск: Ин-т термодинамики СО РАН, 1986. — 95 с.
4. Воробьев, Р.Ю. Альбомы нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора энергоблока № 5 ЗАЭС, кампании 20-23 / Р. Ю. Воробьев. — Энергодар: Запорож. АЭС, 2011. — 323 с.
5. Pelykh, S.N. A model of fuel rearrangement optimization for a VVER-1000 cycling unit considering reactor power growth up to 110 % / S. N. Pelykh // Пр. Одес. політехн. ун-ту — Одеса, 2012. — Вип. 1(38) — P. 112 — 117.

6. Филимонов, П.Е. Программа “Имитатор реактора” для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 / П.Е. Филимонов, В.В. Мамичев, С.П. Аверьянова // Атом. энергия. — 1998. — Т. 84, № 6. — С. 560 — 563.
7. Соколов, Д.А. Повышение мощности ВВЭР-1000 / Д.А. Соколов, В.В. Ким, В.И. Кузнецов // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одеса, 2007. — Вып. 2(28). — С. 60 — 64.
8. Parks, G.T. An intelligent stochastic optimization routine for nuclear fuel cycle design / G.T. Parks // Nuclear Technology. — 1990. — Iss. 2. — P. 233 — 246.

References

1. Pelykh, S.N. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov // Nuclear Engineering and Design. — 2011. — Vol. 241, № 8. — P. 2956 — 2963.
2. Pelykh, S.N. Theory of fuel life control methods at Nuclear Power Plants (NPP) with Water-Water Energetic Reactor (WWER) / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, pp. 197 — 230 — in the book: Nuclear Reactors / Edited by A.Z. Mesquita. — Rijeca: InTech, 2012. — 338 p.
3. Sosnin, O.V. Energeticheskiy variant teorii polzuchesti [Energy Variant of the Theory of Creep] / O.V. Sosnin, B.V. Gorev, A.F. Nikitenko. — Novosibirsk: The Siberian Branch of the Academy of Sciences of the USSR, 1986. — 95 p.
4. Vorobyev, R.Y. Al'bomy neitronno-fizicheskikh kharakteristik aktivnoy zony reaktora energobloka № 5 ZAES [Albums of neutron-physical characteristics of the reactor core, Unit 5, Zaporizhzhya NPP.] / R.Y. Vorobyev. — Energodar: Zaporizhzhya NPP, 2011. — 323 p.
5. Pelykh, S.N. A model of fuel rearrangement optimization for a VVER-1000 cycling unit considering reactor power growth up to 110 % / S. N. Pelykh // Odes'kyi Natsional'nyi Politechnichniy Universytet. Pratsi [Proceedings of the Odesa National Polytechnic University]. — 2012. — Iss. 1(38). — P. 112 — 117.
6. Philimonov, P.E. Programma “Imitator reaktora” dlya modelirovaniya manevrennykh rezhimov raboty VVER-1000 [The “reactor simulator” code for modelling of maneuvering VVER-1000 regimes] / P.E. Philimonov, V.V. Mamichev, S.P. Aver'yanova // Atomnaya Energiya [Atomic Energy]. — 1998. — Vol. 84, № 6. — P. 560 — 563.
7. Sokolov, D.A. Povysheniye moshchnosti VVER-1000 [Increase of VVER-1000 capacity] / D.A. Sokolov, V.V. Kim, V.I. Kuznetsov // Odes'kyi Natsional'nyi Politechnichniy Universytet. Pratsi [Proceedings of the Odesa National Polytechnic University]. — 2007. — № 2(28). — P. 60 — 64.
8. Parks, G.T. An intelligent stochastic optimization routine for nuclear fuel cycle design / G.T. Parks // Nuclear Technology. — 1990. — Iss. 2. — P. 233 — 246.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Кравченко В.П.

Поступила в редакцию 12 ноября 2012 г.