

## МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕСТАНОВКАМИ ТВС С УЧЕТОМ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ И ГЛУБИНЫ ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА

*С.Н. Пельх, М.В. Максимов*

*Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина*

*E-mail: 1@pelykh.net; тел. +38(066)187-21-45*

Изложен метод расчета поврежденности оболочки твэла легководного реактора, позволяющий снизить в пять раз коэффициент запаса при оценке долговечности оболочки по группе прочностных критериев. Разработаны критериальная модель эффективности управления свойствами твэлов и вероятностная модель расчетных параметров эксплуатации твэла. Предложен метод управления перестановками ТВС в АКЗ реактора типа ВВЭР-1000, позволяющий находить алгоритмы перестановок, характеризующиеся минимумом максимальной и средней поврежденности оболочек, при максимальной равномерности распределения поврежденности оболочек и глубины выгорания топлива среди ТВС внутри алгоритма перестановок.

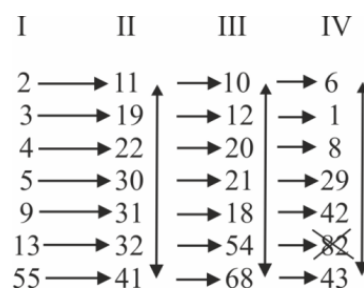
### ВВЕДЕНИЕ

В проектах легководных реакторных установок (РУ) IV поколения повышены энергонапряженность активной зоны (АКЗ), длительность кампании и глубина выгорания. Хотя целостность оболочек твэлов является главным фактором, ограничивающим повышение этих показателей, причины разгерметизации оболочек неизвестны в 20 % случаев [1]. В открытых источниках не обнаружено статистических данных по локализации областей разгерметизации оболочек в зависимости от условий нагружения твэлов. Если не рассматривать фреттинг-износ, характерны следующие основные причины разрушения оболочек твэлов: механическое взаимодействие между топливом и оболочкой (МВТО), особенно при малых выгораниях, и коррозионное растрескивание под напряжением (КРН); коррозия оболочек при глубоких выгораниях (> 50 (МВт·сут)/кг U); поврежденность оболочек, вызванная совместным действием процессов ползучести и усталости. Влияние МВТО-КРН на долговечность оболочки исключается введением ограничений по величине максимальной линейной мощности и ее скачков в твэле. Влияние коррозии при глубоких выгораниях исключается оптимизацией состава и технологии производства материала оболочки. Для управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации главное значение имеет корректный расчет поврежденности оболочек, вызванной совместным действием ползучести и усталости, так как этот фактор невозможно исключить указанными мерами.

Согласно действующему подходу к оценке поврежденности  $\omega(\tau)$  оболочки твэла ВВЭР-1000,  $\omega(\tau)$  оценивается по прочностному критерию SC4 через относительную длительность эксплуатации, когда компоненты поврежденности в стационарном и переменном режимах рассматриваются отдельно и суммируются. При оценке  $\omega(\tau)$  по SC4 усталостная составляющая деформации преобладает после двух лет эксплуатации РУ в маневренном режиме.

Недостатки этого подхода [2]: не учитывается последовательность условий нагружения оболочки при расчете  $\omega(\tau)$ ; ограничивающие компоненты SC4 зависят от условий нагружения и метода маневрирования мощностью РУ, размещения органов регулирования (ОР) в АКЗ и амплитуды их перемещения, алгоритма перестановок ТВС; в открытых источниках нет значений ограничивающих компонентов SC4 для каждого набора условий эксплуатации оболочки; условия, при которых получены ограничивающие компоненты SC4, не соответствуют меняющимся условиям эксплуатации оболочки; не учитывается главная роль ползучести в накоплении  $\omega(\tau)$  при частоте нагружения  $\nu \ll 1$  Гц [3]; неопределенность оценки  $\omega(\tau)$  по SC4 вынуждает принимать высокий коэффициент запаса (10) для SC4.

При моделировании перестановок ТВС в АКЗ использовался усовершенствованный алгоритм (У-алгоритм) управления мощностью АКЗ ВВЭР-1000 [2]. Рассматривался сегмент АКЗ, содержащий 1/6 всех ТВС (без учета центральной) и 1/6 ОР, используемых при маневрировании мощностью РУ. Распределение ТВС по годам кампании в сегменте АКЗ находилось по распределению шлаков. Обозначив арабскими цифрами номер ячейки сегмента АКЗ, а римскими цифрами I, II, III и IV – 1, 2, 3 и 4-й годы кампании соответственно, найдем распределение ТВС каждого года по ячейкам сегмента (рис. 1).



*Рис. 1. Модель перестановок ТВС в сегменте АКЗ*

При перестановках ТВС в сегменте АКЗ возможны два подхода [4]: 1) в центральной ячейке №82 размещается ТВС 4-го года; 2) в ячейке №82 размещается ТВС 1-го либо 2-го года. Последний подход обеспечивает оптимальное использование топлива при обеспечении необходимой длительности кампании, поэтому ячейка №82 не использовалась в модели перестановок ТВС. Для ТВС каждого года выделялось 7 ячеек, за исключением ТВС 4-го года, для которых выделялось 6 ячеек (см. рис. 1).

Модель изменения свойств твэла учитывает определяемые в двухгрупповом диффузионном приближении радиальное распределение энерговыделения в топливной таблетке и линейную мощность в аксиальных сегментах ТВС, растрескивание таблетки, испускание газообразных продуктов деления, течение газа в зазоре между таблеткой и оболочкой, толщину окисного слоя оболочки, МВТО в зависимости от следующих входных данных: конструктивных параметров и выгорания твэла, режимных параметров РУ с ВВЭР-1000, программы изменения мощности РУ, перемещения ОР СУЗ и перестановок ТВС [5]. Модель распределения поврежденности оболочки твэла в качестве исходных данных использует распределение напряжений и деформаций в оболочке, рассчитываемое с помощью программы FEMAXI [6].

## МЕТОД РАСЧЕТА ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА

Развитие деформаций в тонкой оболочке при термомеханических условиях, близких к условиям АКЗ, моделировалось в экспериментах [3]. Используя диаграмму напряжение–разрушение и анализируя структуру металла и наличие бороздок усталости на поверхности разрушения, обнаружено, что при  $\nu \ll 1$  Гц главной причиной деформации оболочки является ползучесть, усталостная деформация пренебрежимо мала.

Впервые в работе [7] предложено для расчета поврежденности оболочки твэла в нормальных условиях эксплуатации использовать энергетический вариант теории ползучести (ЭВТП) [8], позволяющий учесть ползучесть как главный процесс разрушения оболочки. Критерий разрушения оболочки на основе ЭВТП записывается в виде:

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

где  $\omega(\tau)$  – поврежденность оболочки;  $A(\tau)$ ,  $A_0$  – удельные энергии рассеяния в момент времени  $\tau$  и при разрушении оболочки, Дж/м<sup>3</sup> соответственно;  $A_0$  не зависит от параметров нагружения материала и определяется только его свойствами;  $\sigma_e(\tau)$ ,  $\dot{p}_e(\tau)$  – эквивалентное напряжение, Па и скорость эквивалентной деформации ползучести, с<sup>-1</sup> для самого внутреннего радиального элемента

анализируемого аксиального сегмента (АС) оболочки соответственно.

Экспериментальные данные [3], показывающие главную роль ползучести в деформационном разрушении оболочки при  $\nu \ll 1$  Гц, на качественном уровне соответствуют результатам экспериментов [8], согласно которым зависимости  $A(\tau)$  для переменных режимов нагружения тонкой оболочки при  $\nu \ll 1$  Гц подобны зависимостям  $A(\tau)$  для стационарного нагружения и характеризуются одной величиной  $A_0$ .

Имеем положения метода расчета поврежденности оболочки твэла: для безопасной эксплуатации твэлов необходимо контролировать поврежденность оболочек, накопленную в нормальных условиях эксплуатации и вызванную совместным действием ползучести и усталости. Поскольку ползучесть определяет деформацию оболочек при стационарных и переменных ( $\nu \ll 1$  Гц) режимах, метод расчета условий разрушения оболочки должен быть построен на основе ЭВТП, согласно которому процессы разрушения и ползучести в оболочке протекают совместно и влияют друг на друга. В любой момент  $\tau$  интенсивность разрушения оболочки оценивается через  $A(\tau)$ . Лимитирующий компонент  $A_0$  критерия разрушения оболочки не зависит от условий ее нагружения, определяется исключительно свойствами ее материала.  $A_0$  находится, как  $A(\tau)$  в момент  $\tau_0$  при выполнении предельного условия для самого внутреннего радиального элемента в АС:

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

Для различных условий АКЗ ВВЭР-1000 получены расчетные зависимости  $A(\tau)$ , подобные экспериментальным и расчетным зависимостям [8]. Величина  $A_0$ , определенная по (2), составляет 55 МДж/м<sup>3</sup> (рис. 2, даны номера ячеек АКЗ).

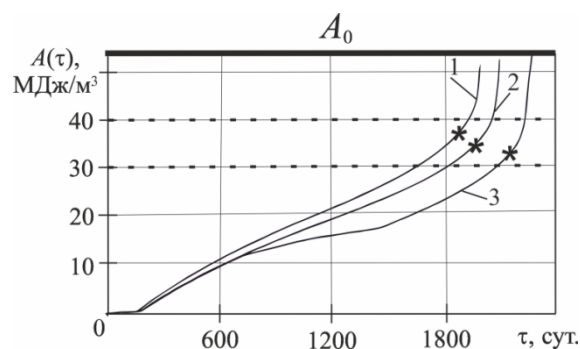


Рис. 2. Изменение  $A(\tau)$ : 1 – №55 ( $N=100\%$ ); 2 – №44 (дн. цикл); 3 – №55-44-10-43-44-44 (дн. цикл); \* –  $\tau_0$  по условию (3)

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 для самого внутреннего радиального элемента АС соответственно;  $\eta$  – числовой параметр ( $\eta \leq 1$ ). Получено, что

$A_0 = 30 \dots 40$  МДж/м<sup>3</sup> и отличается для различных условий нагружения оболочки: 37,12 (кривая 1), 34,44 (кривая 2) и 31,94 МДж/м<sup>3</sup> (кривая 3). На основе (3) невозможно для всех альтернативных совокупностей параметров эксплуатации найти параметр  $\eta$ , чтобы одновременно выполнялись условия:

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

Оценка  $A_0$  по условию (3) консервативнее оценки по (2), но не отвечает принципу независимости от условий нагружения оболочки, поэтому целесообразно определять  $A_0$  на основе совместного учета принципов независимости  $A_0$  от условий нагружения и консервативности, принимая  $A_0 = \text{const} = 30$  МДж/м<sup>3</sup>. Коэффициент запаса такой оценки  $K = 55/30 \approx 2$ , что в пять раз меньше коэффициента запаса при расчете  $\omega(\tau)$  по SC4.

Основные факторы, детерминирующие  $\omega(\tau)$ , найдены для комбинированного цикла переменного нагружения ВВЭР-1000 при вычислении 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  $\tau$  – время, эф. сут;  $\Delta X_i$  – отклонение  $i$ -го варьируемого параметра, %.

Вычислив  $\delta A_{i,\pm}(\tau)$  для центрального АС средненагруженного твэла после эксплуатации РУ в течение 5,48 эф. лет, выделены детерминирующие факторы (ДФ) с  $\delta A_{i,\pm} > 2$  (табл. 1).

Таблица 1

Основные детерминирующие факторы

ДФ	Обозначение	$\delta A_{i,\pm}$	Направленность
1. Максимальная линейная мощность в твэле	$q_{l,\max}$	18,7	при $q_{l,\max} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$
2. Температура теплоносителя на входе РУ	$T_{\text{вх}}$	5,6	при $T_{\text{вх}} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$
3. Наружный диаметр оболочки	$d_{\text{об}}^H$	4,19	при $d_{\text{об}}^H \uparrow, \omega(\tau) \downarrow$
4. Диаметр таблетки	$d_{\text{таб}}$	2,15	при $d_{\text{таб}} \uparrow, \omega(\tau) \uparrow$

Главным ДФ является  $q_{l,\max}$ , что создает научную предпосылку для управления свойствами твэлов перестановками ТВС. После непрерывной эксплуатации РУ по комбинированному циклу нагружения в течение 4,32 эф. лет  $A(\tau)$  в центральном АС оболочки средненагруженного твэла ТВС-А увеличивается с 15,6 до 37,69 МДж/м<sup>3</sup>, если  $q_{l,\max}$  увеличивается с 248 до 298 Вт/см [2].

Учитывая перестановки ТВС в АКЗ в ходе четырехлетней кампании и суточное маневрирование мощностью ВВЭР-1000 по альтернативному алгоритму, с помощью программного средства (ПС) «Имитатор реактора» (ИР) [9] рассчитаны амплитуды скачков линейной мощности в аксиальных сегментах средненагруженного твэла ТВС и получено, что поврежденность оболочек  $\omega(\tau)$  максимальна в аксиальных сегментах оболочки, расположенных между координатами  $z = 1,8$  и  $2,7$  м [2].

Получено, что если  $\nu \ll 1$  Гц и коэффициент использования установленной мощности РУ КИУМ = idem, то нет уменьшения  $\tau_0$  при увеличении  $\nu$  в 2...4 раза по сравнению с  $\nu = 1$  цикл/сут. При увеличении КИУМ от 0,9 до 1 получено значительное сокращение  $\tau_0$ . При  $N = 100$  %, для средненагруженного твэла ТВС ячеек №55; 31; 69; 82  $q_l^{\max}$  равна 236,8; 250,3; 171,9; 119,6 Вт/см соответственно. Следовательно, с точки зрения долговечности оболочек, алгоритм перестановок ТВС 55-31-55-55 является менее

благоприятным, чем алгоритм 55-31-69-82. Поскольку алгоритм перестановок ТВС, характеризуемый меньшей  $A(\tau)$ , одновременно характеризуется меньшей глубиной выгорания, целесообразно разработать метод управления перестановками ТВС с учетом баланса между поврежденностью оболочек и глубиной выгорания топлива [2].

### КРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ

Принципы построения критериальной модели (КМ) эффективности управления свойствами твэлов следующие: целью управления свойствами твэлов в нормальных условиях эксплуатации легководного реактора является повышение эффективности эксплуатации твэлов за счет совместного учета поврежденности оболочек твэлов и экономико-технологических показателей эффективности эксплуатации РУ; управление свойствами твэлов осуществляется на основе требований к свойствам твэлов и АКЗ, определения контролируемых параметров и ДФ; структура критерия эффективности управления свойствами твэлов одинакова для всех задач управления, однако компоненты критерия не инвариантны.

Определяются контролируемые параметры  $c_i$  ( $i = [1, n_c]$ ,  $n_c$  – количество контролируемых параметров), изменяемые факторы  $d_j$ , детерминирующие контролируемые параметры ( $j = [1, n_d]$ ,  $n_d$  – количество ДФ). На основе требований к свойствам твэлов определяются оптимальные  $c_i^{\text{opt}}$  и предельно допустимые  $c_i^{\text{lim}}$

значения  $c_i$ ; для допустимых значений  $c_i$  справедливо

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

После записи (6) в безразмерном виде

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

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

$$\max \{ Eff = 1 - L / L^{\text{lim}} \};$$

$$L = \sqrt{\sum_{i=0}^{n_i} (1 - c_{2i+1}^*)^2 + \sum_{j=1}^{n_j} k_{i,j} (1 - c_{2j}^*)^2}; \quad (8)$$

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

где  $c_{2i+1}^*$  ( $c_{2j}^*$ ) – безразмерные  $c_i$  с нечетными (четными) индексами такие, что для любого из них справедливо условие: любое изменение размерного контролируемого параметра  $\Delta c_{2i+1}$  ( $\Delta c_{2j}$ ) вызывает изменение  $\Delta Eff$  противоположного (того же) знака;  $n_i$  ( $n_j$ ) – количество  $c_i$ , изменение каждого из которых вызывает  $\Delta Eff$  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

$$k_{i,j} = \left[ \frac{1 - c_{2i+1}^{\text{lim},*}}{1 - c_{2j}^{\text{lim},*}} \right]^2. \quad (9)$$

Физический смысл критерия (8), если  $c_{2i+1}^{\text{lim}} > c_{2i+1}^*$  ( $c_{2i+1}^* < c_{2i+1}^{\text{lim}}$ ) или  $c_{2j}^{\text{lim}} < c_{2j}^*$  ( $c_{2j}^* < c_{2j}^{\text{lim}}$ ), то этот контролируемый параметр вносит негативный вклад в  $Eff$ ; преимущество одной совокупности ДФ над другой определяется путем суммирования преимуществ, даваемых каждым из  $c_i$ .

## МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕСТАНОВКАМИ ТВС В АКЗ

В методе управления перестановками ТВС учитываются  $\omega(\tau)$  и глубина выгорания топлива  $B(\tau)$ . При рассмотрении ТВС, используемых при алгоритме перестановок  $j$ , контролируемые параметрами являются максимальное  $\omega_j^{\text{max}}$  и среднее  $\langle \omega \rangle_j$  значения поврежденности, минимальное значение выгорания  $B_j^{\text{min}}$ , а варьируемым ДФ является алгоритм перестановок ТВС (рис. 3).



Рис. 3. Метод управления перестановками ТВС

Принималось, что  $A_0 = 30$  МДж/м<sup>3</sup>. Используя модель перестановок ТВС в АКЗ ВВЭР-1000 в ходе четырехлетней кампании и учитывая амплитуду перемещения ОР, необходимую для стабилизации аксиального офсета (АО) при суточном маневрировании мощностью РУ по альтернативному алгоритму [2], для различных алгоритмов перестановок ТВС рассчитаны  $\omega$  (1460 сут) и глубина выгорания топлива  $B$  (1460 сут) в АС 6. Анализировались 18 алгоритмов, содержащих 126 перестановок, в том числе 16 алгоритмов, содержащих 112 перестановок, выбирались случайным образом с помощью функции MATLAB “rand”, тогда как алгоритмы перестановок 17 и 18 использованы на 5-м энергоблоке ЗАЭС во время кампаний 22 и 23 соответственно [4]. Значения  $\omega$  (1460 сут),  $B$  (1460 сут) для случайного алгоритма 3 и алгоритма 18 показаны в табл. 2.

Таблица 2

Поврежденность оболочек и выгорание				
Алгоритм	Перестановка	$A$ , МДж/м <sup>3</sup>	$\omega(\tau)$ , %	$B$ , (МВт-сут)/кг
3	9-19-21-8	2,25	7,51	62,5
	5-41-68-43	1,39	4,64	60,5
	55-22-10	2,17	7,22	54,7
	13-11-20-6	1,42	4,74	56,8
	3-30-54-1	1,39	4,62	55
	4-32-18-42	1,72	5,74	62,7
	2-31-12-29	1,98	6,59	63,9
18	2-22-21-6	1,55	5,17	54,9
	3-41-68	1,18	3,93	48,8
	4-11-29-18	1,16	3,86	60,8
	5-19-20-1	1,45	4,83	54,6
	9-32-12-42	2,59	8,62	67,9
	13-30-10-43	2,55	8,50	67,7
	55-31-54-8	1,98	6,61	61,4

Введены требования:

$$\begin{aligned} \omega^{\text{opt}} &= \min\{\omega_j^{\text{max}}\}; \\ \langle \omega \rangle^{\text{opt}} &= \min\{\langle \omega \rangle_j\}; \\ B^{\text{opt}} &= \max\{B_j^{\text{min}}\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Примем  $\omega^{\text{lim}}$ ,  $\langle \omega \rangle^{\text{lim}}$  и  $B^{\text{lim}}$  в качестве пределов для контролируемых параметров:

$$\begin{aligned} \omega^{\text{opt}} \leq \omega_j^{\text{max}} \leq \omega^{\text{lim}}; \\ \langle \omega \rangle^{\text{opt}} \leq \langle \omega \rangle_j \leq \langle \omega \rangle^{\text{lim}}; \\ B^{\text{lim}} \leq B_j^{\text{min}} \leq B^{\text{opt}}. \end{aligned} \quad (11)$$

Отсюда следует:

$$\begin{aligned} \omega^{\text{lim,*}} \leq \omega_j^{\text{max,*}} \leq 1; \\ \langle \omega \rangle^{\text{lim,*}} \leq \langle \omega \rangle_j^* \leq 1; \\ B^{\text{lim,*}} \leq B_j^{\text{min,*}} \leq 1, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $\omega^{\text{lim,*}} = (1 - \omega^{\text{lim}})/(1 - \omega^{\text{opt}})$ ;

$$\begin{aligned} \omega_j^{\text{max,*}} &= (1 - \omega_j^{\text{max}})/(1 - \omega^{\text{opt}}); \\ \langle \omega \rangle^{\text{lim,*}} &= (1 - \langle \omega \rangle^{\text{lim}})/(1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}); \\ \langle \omega \rangle_j^* &= (1 - \langle \omega \rangle_j)/(1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}); \\ B^{\text{lim,*}} &= B^{\text{lim}}/B^{\text{opt}}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$B_j^{\text{min,*}} = B_j^{\text{min}}/B^{\text{opt}}.$$

Из условия равной приоритетности требований безопасности и экономичности эксплуатации твэлов имеем:

$$\omega^{\text{lim,*}} = \langle \omega \rangle^{\text{lim,*}} = B^{\text{lim,*}}. \quad (14)$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} \langle \omega \rangle^{\text{lim}} &= 1 - (1 - \omega^{\text{lim}})(1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}})/(1 - \omega^{\text{opt}}); \\ B^{\text{lim}} &= (1 - \omega^{\text{lim}})B^{\text{opt}}/(1 - \omega^{\text{opt}}). \end{aligned} \quad (15)$$

Критерий эффективности перестановок ТВС записан на основе (8) в виде [10]:

$$\begin{cases} \max\{Eff_j = 1 - L_j/L^{\text{lim}}\}; \\ L_j = \sqrt{(1 - \omega_j^{\text{max,*}})^2 + (1 - \langle \omega \rangle_j^*)^2 + (1 - B_j^{\text{min,*}})^2}; \\ L^{\text{lim}} = \sqrt{(1 - \omega^{\text{lim,*}})^2 + (1 - \langle \omega \rangle^{\text{lim,*}})^2 + (1 - B^{\text{lim,*}})^2}. \end{cases} \quad (16)$$

Принимая  $\omega^{\text{lim}} = 13\%$ , на основе (16) рассчитана  $Eff$  для 18 алгоритмов. Эффективности наихудшего алгоритма 2, первых пяти алгоритмов (3, 4, 6, 8, 14) с наибольшими  $Eff$ , а также практически использованных алгоритмов (17 и 18) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Эффективность алгоритмов перестановок ТВС

$j$	$\omega_j^{\text{max}}, \%$	$\langle \omega \rangle_j, \%$	$B_j^{\text{min}}, (\text{МВт}\cdot\text{сут})/\text{кг}$	$Eff_j$
2	8,84	5,86	47,6	-0,14
3	7,51	5,87	54,7	0,94
4	6,87	5,8	54,1	0,9
6	6,85	5,79	53,1	0,74
8	7,02	5,77	54,3	0,93
14	8,25	5,86	54,1	0,84
17	8,89	5,9	48,8	0,04
18	8,62	5,93	48,8	0,05

Алгоритмы 3 и 8 характеризуются высокими показателями одновременно по долговечности оболочки (определяемой через  $\omega_j^{\text{max}}, \langle \omega \rangle_j$ ) и глубине выгорания ( $B_j^{\text{min}}$ ), поэтому  $Eff_3$  и  $Eff_8$  – наибольшие. Алгоритмы 17 и 18 по сравнению с алгоритмами 3 и 8 характеризуются как большей  $\omega$  (1460 сут), так и меньшей  $B$  (1460 сут), в результате  $Eff_{17}$  и  $Eff_{18}$  близки к 0. Алгоритм 2 характеризуется  $\omega$  (1460 сут), близкой к соответствующей величине для алгоритмов 17 и 18, но  $B$  (1460 сут) значительно ниже соответствующих

величин для алгоритмов 17 и 18, в результате  $Eff_2 < 0$ . Цель управления перестановками ТВС достигнута при алгоритме 3. Кроме снижения  $\omega_j^{\text{max}}$  и  $\langle \omega \rangle_j$ , а также повышения  $B_j^{\text{min}}$ , физический смысл повышения эффективности алгоритма заключается в уменьшении интервалов изменения  $\Delta\omega_j$  (1460 сут) и  $\Delta B_j$  (1460 сут) внутри алгоритма (табл. 4).

Одновременное уменьшение  $\langle \omega \rangle_j$  и  $\Delta\omega_j$  уменьшает вероятность разрушения оболочек твэлов.

Таблица 4

Средние значения и интервалы изменения  $\omega$  и  $B$

$j$	$Eff$	$\langle \omega(\tau) \rangle, \%$	$\Delta\omega, \%$	$\langle B \rangle, (\text{МВт}\cdot\text{сут})/\text{кг}$	$\Delta B, (\text{МВт}\cdot\text{сут})/\text{кг}$
3	0,937	5,865	2,887	59,43	9,21
6	0,741	5,787	2,72	59,43	12,5
17	0,042	5,898	5,303	59,43	19,43
18	0,052	5,932	4,757	59,43	19,03

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим допущения вероятностной модели (ВМ) расчетных параметров эксплуатации твэла: 1) рассчитанное на основе модели изменения свойств твэла значение  $j$ -го ДФ  $d_j$  является средним значением соответствующей случайной величины  $d_j^{\text{rand}}$ .

$$d_j \equiv \langle d_j^{\text{rand}} \rangle; \quad (17)$$

2) контролируемые параметры  $c_i$  рассчитываются при  $[\langle d_j^{\text{rand}} \rangle - \Delta d]$  и  $[\langle d_j^{\text{rand}} \rangle + \Delta d]$ ,  $\Delta d$  – интервал изменения  $d_j^{\text{rand}}$  ( $n_d = 1$ ); 3) с использованием правила трех сигм нормального распределения определяются средние величины  $\langle c_i \rangle$  и стандартные отклонения  $\sigma(c_i)$ ; 4) получая на основе  $\langle c_i \rangle$  и  $\sigma(c_i)$  выборки метода Монте-Карло (МК), рассчитываются выборки  $Eff\{c_i\}$ , определяются средние  $\langle Eff\{c_i\} \rangle$  и стандартные отклонения  $\sigma(Eff\{c_i\})$  для совокупностей ДФ; 5) в координатах  $\{\sigma(Eff\{c_i\}), \langle Eff\{c_i\} \rangle\}$  строится кривая эффективности для совокупностей ДФ и осуществляется выбор наилучших из них.

Оценка интервалов неопределенности  $\Delta d$  выполнялась для наиболее значимых ДФ  $q_{l,\max}$  и  $T_{\text{вх}}$ . Точность расчета  $q_{l,\max}$  по ПС ИР составляет 5% [9]. С учетом точности измерения и регулирования возможное отклонение от номинального значения для мощности РУ  $N$  и  $T_{\text{вх}}$  составляет 4 и < 1% соответственно [11]. Поскольку неопределенность в знании  $q_{l,\max}$  в 5 раз превышает соответствующую величину для  $T_{\text{вх}}$ , параметр  $\delta A_{i,\pm}$  для  $q_{l,\max}$  более чем в 3 раза превышает соответствующую величину для  $T_{\text{вх}}$ , в ВМ учитывалась неопределенность в знании только  $q_{l,\max}$ , а неучет неопределенности в знании  $T_{\text{вх}}$  компенсировался консервативностью задания интервала неопределенности  $q_{l,\max}$ . Расчетная величина  $q_{l,j,\max}$  является средним значением случайной величины  $q_{l,j,\max}^{\text{rand}}$ , т.е.

$$q_{l,j,\max} \equiv \langle q_{l,j,\max}^{\text{rand}} \rangle. \quad (18)$$

При  $\langle q_{l,n,\max}^{\text{rand}} \rangle > -10\%$  и  $\langle q_{l,n,\max}^{\text{rand}} \rangle > +10\%$  рассчитаны  $\omega(\tau)$  и  $B$  для перестановок алгоритмов 3, 4, 6, 8 и 14, имеющих наибольшие значения  $Eff$ , где  $n$  – номер ячейки АКЗ для соответствующего года кампании. Использование детерминистского критерия (16) позволило уменьшить количество анализируемых алгоритмов  $N_{\text{alg}}$  с 18 до 5. В робастном случае каждая перестановка  $k$  алгоритма  $j$  описывается случайными величинами  $\omega_{j,k}^{\text{rand}}$  и  $B_{j,k}^{\text{rand}}$ ;  $\omega_j^{\max} = \max\{\omega_{j,k}^{\text{rand}}\}$ ;  $\langle \omega \rangle_j = \langle \{\omega_{j,k}^{\text{rand}}\} \rangle$ ;  $B_j^{\min} = \min\{B_{j,k}^{\text{rand}}\}$ , где  $j = 1, \dots, N_{\text{alg}}$ ;  $k = 1, \dots, 7$ . При  $N_{\text{alg}} = 5$  35 перестановок ТВС описываются  $2 \cdot N_{\text{alg}} \cdot 7 = 70$  случайными величинами. Для

$k = 1, \dots, 7$  и  $j = 3, 4, 6, 8, 14$ , используя правило трех сигм, вычислялись средние  $\langle \omega_{j,k}^{\text{rand}} \rangle$ ,  $\langle B_{j,k}^{\text{rand}} \rangle$  и стандартные отклонения  $\sigma(\omega_{j,k}^{\text{rand}})$ ,  $\sigma(B_{j,k}^{\text{rand}})$  случайных величин  $\omega_{j,k}^{\text{rand}}$  и  $B_{j,k}^{\text{rand}}$ . 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  $\tau_{j,p,k}$ , где  $p = 1$  обозначает  $\omega_{j,k}^{\text{rand}}$  и  $p = 2$  обозначает  $B_{j,k}^{\text{rand}}$ :

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

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

Для перестановки 9-19-21-8 алгоритма 3 случайные величины  $\tau_{3,1,1}$  и  $\tau_{3,2,1}$  описываются через  $\{\langle \omega_{3,1}^{\text{rand}} \rangle, \sigma(\omega_{3,1}^{\text{rand}})\}$  и  $\{\langle B_{3,1}^{\text{rand}} \rangle, \sigma(B_{3,1}^{\text{rand}})\}$  соответственно. При большом количестве случайных переменных наиболее привлекательным с точки зрения эффективности расчетов является метод выборок МК [10]. Ряд нормально распределенных случайных величин  $\tau_{j,p,k}$  получался подстановкой средних и стандартных отклонений случайных величин  $\omega_{j,k}^{\text{rand}}$  и  $B_{j,k}^{\text{rand}}$  в функцию MATLAB “normrnd”. Критерий (16) записан в виде

$$\max\{Eff_j = f(\theta_{j,1,1}, \theta_{j,1,2}, \theta_{j,2,1})\}, \quad (19)$$

где

$$\theta_{j,1,1} = \max\{\tau_{j,1,1}, \dots, \tau_{j,1,7}\};$$

$$\theta_{j,1,2} = \langle \{\tau_{j,1,1}, \dots, \tau_{j,1,7}\} \rangle;$$

$$\theta_{j,2,1} = \min\{\tau_{j,2,1}, \dots, \tau_{j,2,7}\}.$$

Переменные  $\omega^{\text{opt}}$ ,  $\langle \omega \rangle^{\text{opt}}$ ,  $B^{\text{opt}}$  и  $L^{\text{lim}}$  робастной КМ не равны соответствующим константам детерминистской КМ. Если  $N_{\text{alg}}$  увеличивается, то  $\omega^{\text{opt}}$  уменьшается. Если число ячеек, используемых для управления перестановками, увеличивается, то и  $\omega^{\text{opt}}$  увеличивается. На основе 100 выборок МК, при  $\omega^{\text{lim}} = 13\%$ , связь между  $\langle Eff_j \rangle$  и  $\sigma(Eff_j)$  для 5 самых эффективных алгоритмов ( $A_0 = 30$  МДж/м<sup>3</sup>) и для 8 случайных алгоритмов в простейшем случае управления, когда для каждого года учитываются 2 ячейки АКЗ ( $A_0 = 40$  МДж/м<sup>3</sup>), показана на рис. 4.

Наибольшую эффективность в детерминистском случае имеет алгоритм 3, тогда как в робастном – алгоритм 8. Это объясняется тем, что в детерминистском случае  $\omega_3^{\max} - \omega_8^{\max} = 0,5\%$ . Поскольку  $q_{l,j,\max}$  влияет на  $A(\tau)$  по нелинейному закону, при учете робастных условий  $\langle Eff_3 \rangle < \langle Eff_8 \rangle$ . Кроме того,  $\sigma(Eff_3) > \sigma(Eff_8)$  и нет неопределенности в выборе между этими двумя вариантами. Поскольку алгоритм 8 доминирует над всеми другими, имея одновременно более высокое значение  $\langle Eff_j \rangle$  и более низкое  $\sigma(Eff_j)$ , цель управления перестановками ТВС в робастном случае достигнута при алгоритме 8.

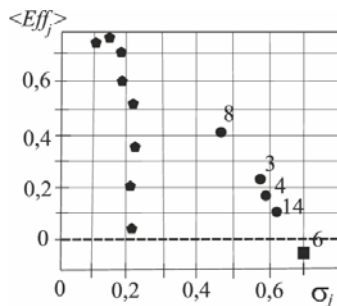


Рис. 4. Связь между  $\langle Eff_j \rangle$  и  $\sigma(Eff_j)$ :

числами обозначены алгоритмы перестановок;

● – алгоритмы простейшего управления

### ВЫВОДЫ

Предложенный метод расчета поврежденности оболочки твэла легководного реактора позволяет снизить в пять раз коэффициент запаса при оценке долговечности оболочки по группе прочностных критериев.

Разработана критериальная модель эффективности управления свойствами твэлов, позволяющая учитывать баланс безопасности и экономичности эксплуатации твэла. Разработана вероятностная модель расчетных параметров эксплуатации твэла, позволяющая учитывать робастные условия эксплуатации при минимальной размерности вектора случайных величин, описывающих условия эксплуатации.

Разработанный метод управления перестановками ТВС в АКЗ позволяет находить алгоритмы перестановок, характеризующиеся минимумом максимальной и средней поврежденности оболочек, при максимальной равномерности распределения поврежденности оболочек и глубины выгорания топлива среди ТВС внутри алгоритма перестановок.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. R. Yang, B. Cheng, J. Deshon, et al. Fuel R & D to Improve Fuel Reliability // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2006, v. 43, N9, p. 951-959.

2. S.N. Pelykh, M.V. Maksimov. *Nuclear Reactors*. Rijeka: "Intech", 2012, p. 197-230.

3. J.H. Kim, M.H. Lee, B.K. Choi, Y.H. Jeong. Deformation behavior of Zircaloy-4 cladding under cyclic pressurization // *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2007, v. 44, N10, p. 1275-1280.

4. Р.Ю. Воробьев. Альбомы нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора энергоблока №5 ЗАЭС, кампании 20-23. Энергодар: «Запорожская АЭС», 2011, 323 с.

5. S.N. Pelykh, M.V. Maksimov. Cladding rupture life control methods for a power-cycling WWER-1000 nuclear unit // *Nuclear Engineering and Design*. 2011, v. 241, N8, p. 2956-2963.

6. М. Сузуки. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения. Одесса: «Астропринт», 2010, 248 с.

7. S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, V.E. Baskakov. Model of cladding failure estimation under multiple cyclic reactor power changes // *Proc. of the 2-nd int. conf. "Current problems of nuclear physics and atomic energy"*, Kyiv, Institute for Nuclear Research. 2008, p. 638-641.

8. О.В. Соснин, Б.В. Горев, А.Ф. Никитенко. Энергетический вариант теории ползучести. Новосибирск: «Ин-т термодинамики СО АН СССР», 1986, 95 с.

9. П.Е. Филимонов, В.В. Мамичев, С.П. Аверьянова. Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 // *Атомная энергия*. 1998, т. 84, №6, с. 560-563.

10. S.N. Pelykh. A model of fuel rearrangement optimization for a VVER-1000 cycling unit considering reactor power growth up to 110 % // *Odes'kyi Natsional'nyi Politechnichniy Universytet. Pratsi*. 2012, N1, p. 112-117.

11. Д.А. Соколов, В.В. Ким, В.И. Кузнецов. Повышение мощности ВВЭР-1000 // *Труды Одесского политехн. ун-та*. 2007, №2, с. 60-64.

Статья поступила в редакцию 28.01.2013 г.

### МЕТОД УПРАВЛІННЯ ПЕРЕСТАВЛЕННЯМИ ТВЗ ЗВАЖАЮЧИ НА ПОШКОДЖЕННЯ ОБОЛОНОК ТВЕЛІВ І ГЛИБИНУ ВИГОРАННЯ ПАЛИВА

С.М. Пелих, М.В. Максимов

Викладено метод розрахунку пошкодження оболонки твэла легководного реактора, що дає змогу знизити в п'ять разів коефіцієнт запаса при оцінюванні довговічності оболонки за групою міцностних критеріїв. Розроблено критериальну модель ефективності управління властивостями твэлів та імовірнісну модель розрахункових параметрів експлуатації твэла. Запропоновано метод управління переставленнями ТВЗ в АКЗ реактора типу ВВЕР-1000, що дозволяє знаходити алгоритми переставлень з мінімумом максимального та середнього пошкоджень оболонки, при максимальній рівномірності розподілу пошкодження оболонки і глибини вигорання палива між ТВЗ в середині алгоритму переставлень.

### A METHOD OF FUEL REARRANGEMENT CONTROL CONSIDERING FUEL ELEMENT CLADDING DAMAGE AND BURNUP

S.N. Pelykh, M.V. Maksimov

A method of LWR fuel element (FE) cladding damage calculation which allows us to reduce safety factor five times, when estimating cladding durability according to the strength criteria, has been described. A criterion model of FE properties control efficiency and a probabilistic model of FE operating calculated parameters, have been developed. A method of VVER-1000 fuel rearrangement control which allows us to find rearrangement algorithms having minimum values of maximum and average cladding damage, as well as maximum uniformity of damage and burnup among all the FAs for a rearrangement algorithm, has been proposed.