

С. Н. Пелых, М. В. Максимов, М. В. Никольский

*Одесский национальный политехнический университет, Одесса***МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ ВВЭР**

Рассматривая усредненный по тепловыделяющей сборке ВВЭР-1000 твэл, найдена вероятность разгерметизации оболочек твэлов исходя из принятой предельно допустимой поврежденности оболочек и доказана возможность прогнозирования надежности оболочек путем управления факторами, определяющими свойства твэлов. Показана целесообразность инновационной разработки автоматизированного программно-технического комплекса для управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР, что позволит снизить вероятность разгерметизации оболочек твэлов с одновременным повышением экономичности эксплуатации ВВЭР.

*Ключевые слова:* ВВЭР, оболочка твэла, прогнозирование надежности оболочек.

**Введение**

Согласно прогнозу НАЭК «Энергоатом» по развитию электроэнергетики Украины, в ближайшие 40 лет генерация электроэнергии на АЭС будет составлять около 50 % от общей генерации, основой ядерной энергетики останутся реакторные установки (РУ) с реакторами ВВЭР [1].

Эволюционное развитие ядерной энергетики в Украине связано с переходом на использование реакторов, характеризующихся значительно более жесткими условиями эксплуатации твэлов по сравнению с существующими ВВЭР, а также с переводом АЭС на эксплуатацию в маневренном режиме. Актуальным запросом практики является одновременное повышение безопасности, надежности и экономичности эксплуатации реактора типа ВВЭР. Главным фактором, ограничивающим повышение эффективности эксплуатации ВВЭР, является герметичность оболочек твэлов. При достигнутом уровне понимания процесса разгерметизации оболочек твэлов в нормальных условиях ВВЭР механизм разгерметизации оболочек примерно в 20 % случаев неизвестен [2].

В нормативных документах не регламентируется изменение поврежденности оболочек твэлов при нормальных условиях эксплуатации и не сказано, каким образом можно управлять этим изменением. Не определяется методика расчета накопленной при эксплуатации твэлов поврежденности их оболочек, приводящей к разгерметизации оболочек, с учетом последовательности совокупностей условий эксплуатации твэлов для каждой тепловыделяющей сборки (ТВС) [3].

Вследствие этого на действующих реакторах ВВЭР-1000 НАЭК «Энергоатом» нет технических средств и не предусмотрено процедур для локализации разрушенного твэла в ТВС, локали-

зации аксиального сегмента (АС) оболочки твэла, в котором произошла разгерметизация, а также для учета последовательности перестановок в активной зоне (АКЗ) ТВС, содержащих разгерметизированные твэлы. На АЭС не ведется статистики по локализации областей разгерметизации оболочки и последовательности перестановок ТВС, содержащих разрушенные твэлы.

Следовательно, для повышения безопасности, надежности и экономичности эксплуатации твэлов ВВЭР необходимо регламентировать контроль и управление процессом накопления поврежденности оболочек твэлов каждой ТВС в зависимости от последовательности совокупностей условий эксплуатации этой ТВС.

Управление процессом накопления поврежденности оболочек должно осуществляться на основе нормативных требований по ограничению количества негерметичных твэлов в АКЗ без необоснованно высокой консервативности, ведущей к снижению конкурентоспособности ВВЭР. Управление накопленной в нормальных условиях поврежденностью оболочек твэлов подразумевает учет требований экономичности эксплуатации твэлов, а также внедрение мероприятий, обеспечивающих неуклонное снижение удельного веса таких факторов разгерметизации оболочек, как механическое взаимодействие топлива с оболочкой при низких глубинах выгорания топлива, коррозионное растрескивание под напряжением, а также коррозия оболочек в области глубоких выгораний [4].

Оценка поврежденности оболочки твэла на основе нормативного прочностного критерия SC4 является неопределенной вследствие неполноты и неадекватности модели накопления поврежденности, что отражается в коэффициенте запаса  $K = 10$ , на порядок превышающем коэффициент запаса для других прочностных критериев.

С учетом этого на основе энергетического варианта теории ползучести (ЭВТП) был разработан ЭВТП-метод расчета поврежденности оболочки твэла, в котором учитывается влияние последовательности совокупностей условий эксплуатации твэла на накопление поврежденности, а также ползучесть как основной физический процесс накопления поврежденности при частоте нагружения оболочки  $\ll 1$  Гц, характерной для реальных режимов эксплуатации ВВЭР [5]. ЭВТП-критерий разгерметизации оболочки записывается в виде [4]

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

где  $\omega(\tau)$  – поврежденность оболочки;  $A_0$  – удельная энергия рассеяния  $A(\tau)$  в момент начала разрушения оболочки  $\tau_0$ , МДж/м<sup>3</sup>;  $\sigma_e(\tau)$ ,  $\dot{p}_e(\tau)$  – эквивалентное напряжение (Па) и скорость эквивалентной деформации ползучести (с<sup>-1</sup>) соответственно.

$A_0$  находится по предельному условию для самого напряженного радиального элемента в анализируемом АС оболочки:

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

Для циркалоя-4  $A_0 = 55$  МДж/м<sup>3</sup>.

Применение ЭВТП-критерия позволяет значительно снизить неопределенность оценки условий разгерметизации оболочки твэла, что отражается в снижении в 5 раз коэффициента запаса для этого критерия по сравнению с прочностным критерием SC4 [4].

Кроме того, ограничивающий компонент  $A_0$  ЭВТП-критерия не зависит от последовательности совокупностей условий нагружения оболочки, что выгодно отличает ЭВТП-критерий от критерия SC4 и обуславливает целесообразность применения ЭВТП-критерия при прогнозировании надежности оболочек твэлов [6].

### Модель эффективности управления свойствами твэлов

Для учета требований одновременно к безопасности и экономичности эксплуатации твэлов разработана критериальная модель (КМ) эффективности управления свойствами твэлов [7]. Принципы КМ:

1) целью управления свойствами твэлов ВВЭР является повышение эффективности нормальной эксплуатации твэлов за счет совместного учета поврежденности оболочек твэлов  $\omega(\tau)$  и эконо-

мико-технологических показателей эффективности эксплуатации РУ;

2) управление свойствами твэлов осуществляется на основе априорных требований к свойствам твэлов и АКЗ, определения контролируемых параметров и детерминирующих факторов (ДФ);

3) структура критерия эффективности управления свойствами твэлов одинакова для всех задач управления, однако контролируемые параметры и варьируемые ДФ не инвариантны. Таким образом, контролируемые параметры  $c_i$  ( $i = [1, n_c]$ ,  $n_c$  – количество контролируемых параметров) и изменяемые факторы  $d_j$ , детерминирующие контролируемые параметры ( $j = [1, n_d]$ ,  $n_d$  – количество ДФ), определяются для конкретной задачи управления. На основе априорных требований к свойствам твэлов и АКЗ определяются оптимальные  $c_i^{opt}$  и предельно допустимые  $c_i^{lim}$  значения контролируемых параметров  $c_i$ .

### Метод управления свойствами твэлов

Максимум эффективности  $Eff$  управления свойствами твэлов определяется по критерию, наиболее общий вид которого приведен в [4, 6, 7]. КМ дала возможность предложить алгоритм управления свойствами твэлов на основе ЭВТП-метода и организации итерационного расчета наилучшей совокупности ДФ, с точки зрения удовлетворения требований к свойствам твэлов (рис. 1).

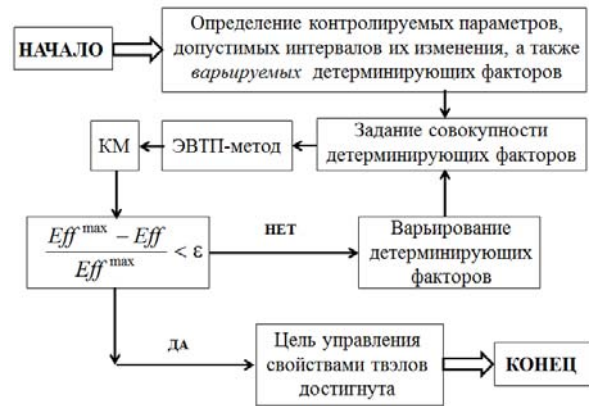


Рис. 1. Алгоритм управления свойствами твэлов.

Помимо КМ, в рамках ЭВТП-метода была также разработана вероятностная модель (ВМ), учитывающая неопределенность в знании ДФ, что позволило предложить обобщенный метод управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР [4]. В этом наиболее общем итерационном алгоритме управления свойствами твэлов используются:

М(1) – метод управления конструкционными параметрами твэла;

М(2) – метод управления расположением регулирующей группы системы управления и защиты (СУЗ) в АКЗ;

М(3) – метод управления балансом стационарного и переменного нагружения РУ;

М(4) – метод управления температурным режимом теплоносителя;

М(5) – метод управления перестановками ТВС в АКЗ – рис. 2 [4].

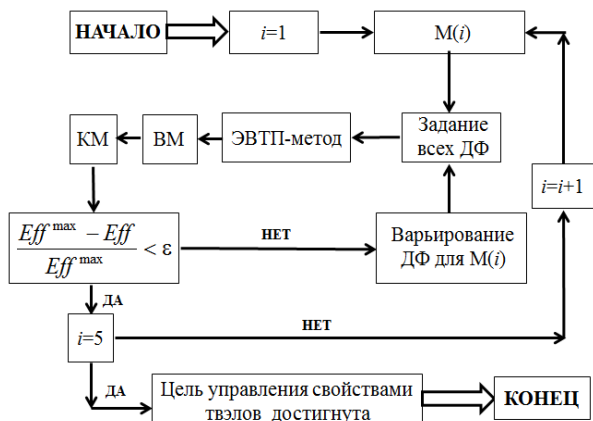


Рис. 2. Метод управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР.

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). Это позволяет учесть влияние главных ДФ (максимальная линейная мощность в твэле  $q_{l,max}$ , входная температура теплоносителя  $t_{вх}$ , конструкционные параметры твэла, режимные параметры АКЗ) на контролируемые параметры: поврежденность оболочки твэла  $\omega$  (описывает безопасность эксплуатации твэлов) и глубину выгорания топлива  $B$  (описывает экономичность эксплуатации твэлов), максимально снизить размерность пространства случайных величин, описывающих свойства твэлов.

### Метод прогнозирования надежности оболочек твэлов

Метод прогнозирования надежности оболочек твэлов является развитием метода управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР, поскольку при управлении величиной поврежденности оболочек по каждому из методов М(1)...М(5) одновременно происходит изменение прогнозируемой вероятности разгерметизации оболочек твэлов.

Метод прогнозирования надежности оболочек твэлов включает:

- 1) применение последовательного алгоритма

управления свойствами твэлов по методам М(1)...М(5) и определение вариантов совокупностей ДФ, характеризующихся наибольшими значениями параметра  $Eff$ ;

2) расчет вероятности разгерметизации оболочек для этих вариантов с наибольшими значениями  $Eff$ ;

3) выбор наилучшего варианта совокупностей ДФ исходя из условия обеспечения минимума вероятности разгерметизации оболочек твэлов.

Примем допущения:

1) рассматривается твэл, усредненный по ТВС ВВЭР-1000 проекта В-320; тип ТВС – ТВС-А; материал оболочки твэла – циркалой-4;

2) применяется «альтернативный» алгоритм суточного маневра мощностью ЛРУ:  $100\% N_{ном} \rightarrow 80\% N_{ном} \rightarrow 100\% N_{ном}$ , с постоянной входной температурой теплоносителя  $t_{вх} = const$  и размещением органов регулирования (ОР) СУЗ в АКЗ по У-алгоритму управления мощностью АКЗ [7];

3) для прогнозирования надежности оболочек твэлов ВВЭР используется М(5) – метод управления перестановками ТВС в АКЗ.

### Модель перестановок ТВС

При моделировании перестановок ТВС в АКЗ рассматривался сектор симметрии – сегмент АКЗ, содержащий 1/6 всех ТВС (без учета центральной), а также 1/6 всех ОР, используемых при маневрировании  $N$ .

В выделенном секторе АКЗ присутствует максимум 7 ТВС каждого года топливной кампании. В соответствии с распределением долгоживущих и стабильных продуктов деления, вызывающих шлакование АКЗ, обозначив числом номер ячейки АКЗ, а римской цифрой I, II, III и IV – 1, 2, 3 и 4-й год кампании соответственно, найдено распределение ТВС каждого года по ячейкам сектора АКЗ (рис. 3).

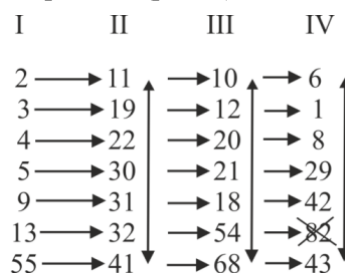


Рис. 3. Схема распределения ТВС по ячейкам.

Принято, что после перегрузки топлива ТВС размещены в ячейках выделенного сектора АКЗ в соответствии с показанным на рис. 3 распределением, рассчитанным по программе оптимизации размещения ТВС в ячейках АКЗ на основе минимизации радиальной неравномерности энерговыделения [8].

В результате анализа подходов к перестановкам ТВС в пределах сектора АКЗ выявлено, что только в одном из имеющихся шести секторов для ТВС каждого года выделяется по семь ячеек. В остальных пяти секторах для ТВС 1, 2 и 3-го года выделяется по семь ячеек, тогда как для ТВС 4-го года выделяется шесть ячеек [9]. При этом применяются два основных подхода: 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 наиболее характерным вариантом перестановок ТВС в секторе АКЗ является случай, когда ячейка 82 не рассматривается при моделировании перестановок, и для ТВС каждого года выделяется по семь ячеек, за исключением ТВС 4-го года, для которых выделяется шесть ячеек (см. рис. 3).

**Метод управления перестановками ТВС**

На основе ЭВТП-метода и КМ предложен метод управления перестановками ТВС, отличающийся учетом  $\omega(\tau)$  и  $B(\tau)$ . Рассматривая ТВС, используемые при алгоритме перестановок  $j$ , контролируруемыми параметрами являются максимальное  $\omega_j^{\max}$  и среднее  $\langle \omega \rangle_j$  значения поврежденности, минимальное значение выгорания  $B_j^{\min}$ , а варьируемым ДФ является алгоритм перестановок ТВС (рис. 4) [6].

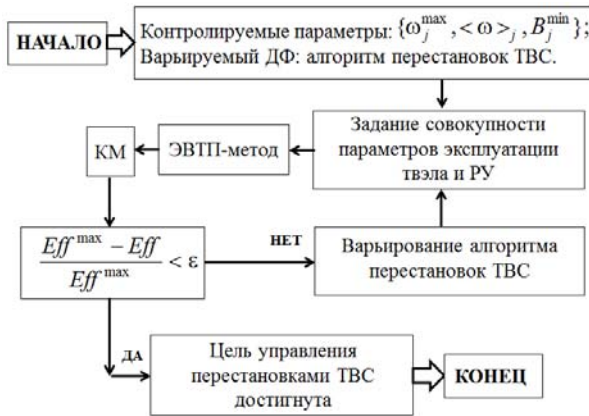


Рис. 4. Метод управления перестановками ТВС.

Применялся алгоритм случайного выбора ячеек в выделенном секторе АКЗ ВВЭР-1000 с помощью функции MATLAB «rand» [10].

Используя модель перестановок ТВС во время перегрузок топлива (см. рис. 3), учитывая необходимую для стабилизации аксиального оффсета (АО) амплитуду перемещения ОР, выполнен расчет  $\omega(\tau)$  и  $B(\tau)$  в наиболее нагруженном АС

оболочки по следующей процедуре:

1) используя программное средство (ПС) «Имитатор реактора» (ИР) [11], при  $N = 80$  и  $100\% N_{\text{ном}}$  рассчитывались коэффициенты относительной мощности для всех АС всех ячеек выделенного сектора АКЗ;

2) используя ПС FEMAXI [12], ЭВТП-критерий при  $A_0 = 30 \text{ МДж/м}^3$ , модель коррозии оболочки MATPRO-A [13], находился наиболее нагруженный АС твэла – АС 6, для АС 6 рассчитывались  $\omega(1460 \text{ сут})$  и  $B(1460 \text{ сут})$ .

Анализировались 18 алгоритмов перестановок ТВС, содержащих 126 перестановок: 16 алгоритмов, содержащих 112 перестановок, выбирались случайно, тогда как алгоритмы 17 и 18 были использованы на 5-м энергоблоке Запорожской АЭС во время годовых кампаний 22 и 23 [9]. Алгоритмы 17 и 18, а также три случайных алгоритма (2, 3 и 6) показаны в табл. 1.

Введены требования:

$$\omega^{\text{opt}} = \min \{ \omega_j^{\max} \}; \quad \langle \omega \rangle^{\text{opt}} = \min \{ \langle \omega \rangle_j \};$$

$$B^{\text{opt}} = \max \{ B_j^{\min} \}. \quad (3)$$

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

$$\omega^{\text{opt}} \leq \omega_j^{\max} \leq \omega^{\text{lim}}; \quad B^{\text{lim}} \leq B_j^{\min} \leq B^{\text{opt}};$$

$$\langle \omega \rangle^{\text{opt}} \leq \langle \omega \rangle_j \leq \langle \omega \rangle^{\text{lim}}. \quad (4)$$

Отсюда

$$\omega^{\text{lim},*} \leq \omega_j^{\max,*} \leq 1; \quad B^{\text{lim},*} \leq B_j^{\min,*} \leq 1;$$

$$\langle \omega \rangle^{\text{lim},*} \leq \langle \omega \rangle_j^* \leq 1, \quad (5)$$

где 
$$\omega^{\text{lim},*} = \frac{1 - \omega^{\text{lim}}}{1 - \omega^{\text{opt}}}; \quad \omega_j^{\max,*} = \frac{1 - \omega_j^{\max}}{1 - \omega^{\text{opt}}}; \quad (6)$$

$$B^{\text{lim},*} = B^{\text{lim}} / B^{\text{opt}}; \quad B_j^{\min,*} = B_j^{\min} / B^{\text{opt}};$$

$$\langle \omega \rangle^{\text{lim},*} = \frac{1 - \langle \omega \rangle^{\text{lim}}}{1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}}; \quad \langle \omega \rangle_j^* = \frac{1 - \langle \omega \rangle_j}{1 - \langle \omega \rangle^{\text{opt}}}.$$

Критерий эффективности управления свойствами твэлов записан в виде [7]

$$\max \{ Eff_j \}, \quad (7)$$

где

$$Eff_j = 1 - \frac{\sqrt{(1 - \omega_j^{\max,*})^2 + (1 - \langle \omega \rangle_j^*)^2 + (1 - B_j^{\min,*})^2}}{\sqrt{3} |1 - \omega^{\text{lim},*}|}.$$

Физический смысл критерия (7):

1) если  $\omega_j^{\max} > \omega^{\lim}$  или  $\langle \omega \rangle_j > \langle \omega \rangle^{\lim}$ , или  $B_j^{\min} < B^{\lim}$ , то соответствующий компонент вносит негативный вклад в  $Eff_j$ ;

2) преимущество одного алгоритма перестановок ТВС над другим определяется на основе суммирования преимуществ, даваемых каждым из параметров  $\omega_j^{\max}$ ,  $\langle \omega \rangle_j$  и  $B_j^{\min}$  [6].

Таблица 1. Поврежденность оболочек и выгорание в АС 6-го твэла

Алгоритм	Перестановка	$A$ , МДж/м <sup>3</sup>	$\omega(\tau) = A / A_0$ , %	$B$ , МВт·сут/кг
2	5-30-10-43	1,838	6,127	63,04
	9-11-20-1	1,443	4,81	57,26
	3-22-54-29	1,843	6,143	63,89
	13-19-21-42	2,652	8,84	68,13
	2-31-18	1,209	4,03	47,61
	55-41-12-6	1,955	6,517	59,1
	4-32-68-8	1,368	4,56	57,02
3	9-19-21-8	2,253	7,51	62,49
	5-41-68-43	1,391	4,637	60,47
	55-22-10	2,167	7,223	54,67
	13-11-20-6	1,421	4,737	56,8
	3-30-54-1	1,387	4,623	55,04
	4-32-18-42	1,722	5,74	62,69
	2-31-12-29	1,976	6,587	63,88
6	55-11-18-43	1,568	5,227	63,84
	13-32-20	2,019	6,73	54,19
	3-31-10-8	1,816	6,053	59,65
	9-19-68-42	2,054	6,847	65,55
	4-41-12-29	1,935	6,45	64,93
	2-30-21-6	1,522	5,073	54,82
	5-22-54-1	1,238	4,127	53,05
17	2-22-12-6	1,463	4,877	54,35
	3-41-29	1,184	3,947	48,8
	4-11-68-43	1,078	3,593	60,63
	5-19-10-8	1,498	4,993	57,18
	9-30-20-1	2,058	6,86	59,39
	13-32-21-42	2,667	8,89	68,23
	55-31-54-18	2,437	8,123	67,45
18	2-22-21-6	1,55	5,167	54,86
	3-41-68	1,18	3,933	48,83
	4-11-29-18	1,159	3,863	60,84
	5-19-20-1	1,449	4,83	54,55
	9-32-12-42	2,586	8,62	67,86
	13-30-10-43	2,551	8,503	67,73
	55-31-54-8	1,982	6,607	61,37

Для алгоритмов перестановок ТВС 2, 3, 6, 17, 18 из выражения (3) следует

$$\omega^{\text{opt}} = 6,85 \%$$

Принимая  $\omega^{\lim} = 8,5 \%$ , из выражения (6) следует

$$\omega^{\lim,*} = 0,982.$$

Далее по критерию (7) рассчитана эффективность управления свойствами твэлов  $Eff$  для 18 алгоритмов. В табл. 2. приведены  $Eff_2 = \min\{Eff_j\}$ ,  $Eff_3 = \max\{Eff_j\}$ ,  $Eff_6 \in [Eff_2, Eff_3]$ ,  $Eff_{17}$  и  $Eff_{18}$ .

Цель управления перестановками ТВС в детерминистической постановке достигнута при

алгоритме 3. Физический смысл повышения эффективности алгоритма заключается в уменьшении (для ТВС алгоритма) интервалов разброса значений поврежденности оболочки  $2 \cdot \Delta\omega$  (1460 сут) и выгорания топлива  $2 \cdot \Delta B$  (1460 сут) в наиболее нагруженном АС усредненного по ТВС твэла (табл. 3).

Метод управления свойствами твэлов разработан для твэла, усредненного по ТВС. Данный подход оправдан, так как позволяет найти закономерности управления свойствами твэлов. В рамках этого подхода наиболее важное значение имеет ЭВП-критерий. Использование ЭВП-критерия подразумевает учет ограничений по всем существующим нормативным критериям приемки твэла, за исключением SC4.

Таблица 2. Эффективность алгоритмов перестановок ТВС

$j$	$\omega_j^{\max}, \%$	$\langle \omega \rangle_j, \%$	$B_j^{\min}, \text{МВт} \cdot \text{сут/кг}$	$\omega_j^{\max,*}$	$\langle \omega \rangle_j^*$	$B_j^{\min,*}$	$Eff_j (\omega^{\lim} = 8,5 \%)$
2	8,84	5,86	47,6	0,979	0,999	0,871	-3,2
3	7,51	5,87	54,7	0,993	0,999	1	0,77
6	6,85	5,79	53,1	1	1	0,970	0,039
17	8,89	5,9	48,8	0,978	0,999	0,893	-2,5
18	8,62	5,93	48,8	0,981	0,998	0,893	-2,48

Таблица 3. Разброс значений поврежденности и выгорания в алгоритме  $j$

$j$	$Eff_j (\omega^{\lim} = 8,5 \%)$	$\langle \omega \rangle_j, \%$	$2 \cdot \Delta \omega_j, \%$	$\langle B \rangle, \text{МВт} \cdot \text{сут/кг}$	$2 \cdot \Delta B_j, \text{МВт} \cdot \text{сут/кг}$
2	-3,2	5,86	4,81	59,43	20,52
3	0,77	5,87	2,887		9,21
6	0,039	5,79	2,72		12,5
17	-2,5	5,9	5,3		19,43
18	-2,48	5,93	4,757		19,03

Расчеты поврежденности оболочек твэлов ВВЭР-1000 по ЭВТП-методу показали, что если не учитывать неравномерность распределения энерговыделения и скачков мощности по твэлам ТВС, то для нормальных условий эксплуатации прочностной критерий SC1 не играет существенной ограничивающей роли при управлении поврежденностью оболочек. Если учесть неравномерность распределения энерговыделения и скачков мощности по твэлам ТВС, следует ожидать повышения роли SC1 при управлении поврежденностью оболочек твэлов.

**Метод расчета вероятности разгерметизации оболочек твэлов**

Поврежденность оболочки усредненного по ТВС твэла для  $j$ -го алгоритма перестановок ТВС рассматривалась как случайная величина  $\omega_j^{\text{rand}}$ ,

распределенная по нормальному закону в интервале  $[\langle \omega_j^{\text{rand}} \rangle - \Delta \omega_j^{\text{rand}}; \langle \omega_j^{\text{rand}} \rangle + \Delta \omega_j^{\text{rand}}]$ ,  $j = \{2; 3; 6; 17; 18\}$ .

Учитывая правило трех сигм нормального распределения и используя данные табл. 1, находились стандартные отклонения  $\sigma(\omega_j^{\text{rand}})$  случайной величины  $\omega_j^{\text{rand}}$ .

Для  $j$ -го алгоритма перестановок ТВС рассчитана вероятность  $P_j$  разгерметизации оболочки усредненного по ТВС твэла по следующему выражению (табл. 4):

$$P_j = \int_{\omega_j^{\min}}^{\omega_j^{\max}} \frac{\exp\left[-\frac{(\omega_j^{\text{rand}} - \langle \omega_j^{\text{rand}} \rangle)^2}{2[\sigma(\omega_j^{\text{rand}})]^2}\right] \cdot d\omega_j^{\text{rand}}}{\sigma(\omega_j^{\text{rand}})\sqrt{2\pi}} \quad (8)$$

Таблица 4. Вероятность  $P_j$  разгерметизации оболочки твэла в  $j$ -м алгоритме

$j$	$\omega^{\lim}, \%$	$\langle \omega_j^{\text{rand}} \rangle, \%$	$2 \cdot \Delta \omega_j^{\text{rand}}, \%$	$\omega_j^{\min}, \%$	$\omega_j^{\max}, \%$	$\sigma(\omega_j^{\text{rand}}), \%$	$P_j$
2	8,5	6,435	4,81	4,03	8,84	0,8017	0,0035
3		6,067	2,887	4,623	7,51	0,4812	0
6		5,487	2,72	4,127	6,847	0,4533	0
17		6,242	5,3	3,593	8,89	0,8833	0,0039
18		6,242	4,757	3,863	8,62	0,7928	0,00085

Выражение (8) характеризуется погрешностью, связанной с тем, что  $\langle \omega_j^{\text{rand}} \rangle \neq \langle \omega \rangle_j$  (см. табл. 3 и 4):

$$\max \left\{ \frac{|\langle \omega_j^{\text{rand}} \rangle - \langle \omega \rangle_j|}{\langle \omega \rangle_j} \right\} = 10 \%$$

Повысить точность расчета вероятности разгерметизации оболочки твэла можно путем модификации выражения (8) за счет использования комбинации усеченных нормальных распределений.

Поскольку в пределах сектора симметрии АКЗ в алгоритме перестановок ТВС используются 6 ТВС 4-го года кампании, суммарное число твэлов в ТВС 4-го года составляет  $312 \cdot 6 = 1872$ . Зная вероятность  $P_j$  разгерметизации оболочки усредненного по ТВС твэла в  $j$ -м алгоритме, по формуле Бернулли рассчитывается вероятность разгерметизации  $k$  твэлов из  $n = 1872$  твэлов, содержащихся в 6 ТВС, эксплуатировавшихся четыре года:

$$P_{j,1872}(k) = C_{1872}^k \cdot (P_j)^k \cdot (1 - P_j)^{1872-k}, \quad (9)$$

$$\text{где } C_{1872}^k = \frac{1872!}{k! \cdot (1872 - k)!}.$$

Если рассматривать 6 тождественных секторов симметрии АКЗ, то событие «разгерметизация оболочки твэла» в каком-либо секторе АКЗ означает одновременную разгерметизацию обо-

лочки соответствующего твэла в остальных пяти секторах симметрии АКЗ, поэтому из выражения (9) следует выражение для вероятности разгерметизации  $6 \cdot k$  твэлов из  $n = 11232$  твэлов, содержащихся в 36 ТВС, эксплуатировавшихся в течение четырех лет во всех секторах симметрии АКЗ (табл. 5):

$$P_{j,11232}(6 \cdot k) = C_{1872}^k \cdot (P_j)^k \cdot (1 - P_j)^{1872-k}, \quad (10)$$

Таблица 5. Вероятность разгерметизации оболочек в алгоритме  $j$ , %

$j$	Количество разгерметизированных оболочек $6 \cdot k$ ( $k = 0, 1, 2, \dots, 12$ )												
	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72
	Вероятность разгерметизации $6 \cdot k$ оболочек, %												
2	0,14	0,93	3	6,55	10,9	14,3	15,7	14,7	12	8,76	5,72	3,41	1,85
3	100	0											
6	100	0											
17	0,07	0,49	1,79	4,36	7,97	11,6	14,2	14,8	13,5	11	8	5,3	3,22
18	20,4	32,4	25,8	13,7	5,44	1,72	0,46	0,1	0				

Алгоритмы 3 и 6 доминируют над всеми остальными вариантами перестановок ТВС, в том числе над практически использованными алгоритмами 17 и 18, поскольку имеют нулевую вероятность разгерметизации оболочек твэлов при принятом предельно допустимом значении поврежденности оболочек  $\omega^{\text{lim}} = 8,5$  %.

Вероятность разгерметизации  $< 18$  твэлов для практически использованных алгоритмов перестановок 17 и 18 составила 2,4 и 78,6 % соответственно. Вероятность разгерметизации 18 – 72 твэлов для алгоритмов 17 и 18 составила 94 и 21,4 % соответственно. Вероятность разгерметизации  $> 72$  твэлов для алгоритмов 17 и 18 составила 3,6 и 0 % соответственно.

### Выводы

1. Рассматривая усредненный по ТВС ВВЭР-1000 твэл, разработан метод расчета вероятности разгерметизации оболочек твэлов в зависимости от последовательности совокупностей факторов, определяющих поврежденность оболочек. Доказана возможность прогнозирования надежности оболочек твэлов путем управления факторами, определяющими поврежденность оболочек.

2. Учитывая все ТВС, эксплуатировавшиеся в АКЗ четыре года, принимая  $\omega^{\text{lim}} = 8,5$  % как предельно допустимое значение поврежденности оболочек твэлов, вероятность разгерметизации  $\geq 18$  твэлов для практически использованных алгоритмов 17 и 18 составила 97,6 и 21,4 % соответственно. Найдены алгоритмы перестановок ТВС № 3 и № 6, имеющие нулевую вероятность разгерметизации оболочек твэлов при принятом  $\omega^{\text{lim}}$ .

3. Возможно значительно повысить корректность расчета вероятности разгерметизации оболочек твэлов путем учета неоднородности распределения энерговыделения по твэлам внутри ТВС, а также учета неопределенности в задании факторов, детерминирующих поврежденность оболочек.

4. Для снижения вероятности разгерметизации оболочек твэлов, с одновременным повышением экономичности эксплуатации ВВЭР, целесообразно разработать автоматизированный программно-технический комплекс, управляющий свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Власенко Н.И., Кухарчук Н.П., Годун О.В. и др. Оценка развития атомной энергетики Украины на долгосрочную перспективу // Тр. XX Междунар. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению. - Алушта: ННЦ «Харьковский физико-технический институт», 10 - 15 сент. 2012. - С. 7 - 8.
2. Yang R., Cheng B., Deshon J. et al. FuelR & D to Improve Fuel Reliability // J. of Nucl. Sci. and Technology. - 2006. - Vol. 43, No. 9. - P. 951 - 959.
3. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций НП-082-07 (взамен ПНАЭ Г-1-024-90, ПБЯ РУ АС-89).- М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2008. - 21 с.
4. Пелых С.Н. Основы управления свойствами твэлов ВВЭР. -Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. - 168 с.

5. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Baskakov V.E. Grounds of VVER-1000 fuel cladding life control // *Annals of Nuclear Energy*. - 2013. - Iss. 58. - P. 188 - 197.
6. Пельх С.Н., Максимов М.В. Метод управления перестановками ТВС с учетом поврежденности оболочек твэлов и глубины выгорания топлива // *Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. - 2013. - Вып. 5(87). - С. 84 - 90.
7. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Parks G.T. A method for VVER-1000 fuel rearrangement optimization taking into account both fuel cladding durability and burnup // *Nuclear Engineering and Design*. - 2013. - Vol. 257, No. 4. - P. 53 - 60.
8. База данных по ЯППУ для анализа проектных аварий ЮУ АЭС, энергоблок № 1. - Южноукраинск: ЮУ АЭС, 1999. - 643 с.
9. Воробьев Р.Ю. Альбомы нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора энергоблока № 5 ЗАЭС, кампании 20-23. - Энергодар: Запорожская АЭС, 2008 - 2011. - 323 с.
10. *MATLAB* Version 7.10.0. - Natick. Massachusetts: The Math Works Inc., 2010. - 512 p.
11. Филимонов П.Е., Мамичев В.В., Аверьянова С.П. Программа «Имитатор реактора» для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 // *Атомная энергия*. - 1998. - Т. 84, № 6. - С. 560 - 563.
12. Suzuki M. Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-V (Ver.1). JAERI-Data/Code 2000-030. - Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. - 285 p.
13. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / Пер. с англ. С.Н. Пельх. - Одесса: Астропринт, 2010. - 218 с.

**С. М. Пелих, М. В. Максимов, М. В. Нікольский**

*Одеський національний політехнічний університет, Одеса*

### МЕТОД ПРОГНОЗУВАННЯ НАДІЙНОСТІ ОБОЛОНОК ТВЕЛІВ ВВЕР

Розглядаючи усереднений по тепловиділяючій збірці ВВЕР-1000 твел, знайдено ймовірність розгерметизації оболонок твелів виходячи з прийнятого гранично допустимого пошкодження оболонок та доведено можливість прогнозування надійності оболонок шляхом керування факторами, що визначають властивості твелів. Показано доцільність інноваційної розробки автоматизованого програмно-технічного комплексу для керування властивостями твелів на стадіях проектування та експлуатації ВВЕР, що дасть змогу знизити ймовірність розгерметизації оболонок твелів з одночасним підвищенням економічності експлуатації ВВЕР.

*Ключові слова:* ВВЕР, оболонка твела, прогнозування надійності оболонок.

**S. M. Pelykh, M. V. Maksimov, M. V. Nikolsky**

*Odessa National Polytechnic University, Odessa*

### A METHOD FOR VVER FUEL ELEMENT CLADDING RELIABILITY PREDICTION

Considering a VVER-1000 fuel assembly averaged fuel element (FE), based on the accepted FE cladding damage limit value, the FE cladding failure probability was determined, thus the possibility of this reliability prediction by means of controlling the factors determining the FE properties has been proved. The appropriateness of innovation development of the automated program-technical complex controlling the FE properties at VVER design and operation stages, lowering the FE cladding failure probability and, at the same time, increasing the VVER operation economic efficiency, has been proved.

*Keywords:* VVER, fuel element cladding, cladding reliability prediction.

### REFERENCES

1. Vlasenko N.I., Kukharchuk N.P., Godun O.V. et al. // Tr. XX Mezhdunar. konf. po fizike radiatsionnykh yavlenij iradiatsionnomu materialovedeniyu. - Alushta: NNTs "Khar'kovskij fiziko-tehnicheskij institut", 10 - 15 sent. 2012. - P. 7 - 8. (Rus)
2. Yang R., Cheng B., Deshon J. et al. // *J. of Nucl. Sci. and Technology*. - 2006. - Vol. 43, No. 9. - P. 951 - 959.
3. Nuclear safety terms of nuclear power plants NP-082-07 nuclear reactor facility (instead of ПНАЭ Г-1-024-90, ПБЯРУАС-89). - Moskva: Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru, 2008. - 21 p. (Rus)
4. Pelykh S.N. Basic management of VVER fuel elements properties. - Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. - 168 p. (Rus)
5. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Baskakov V.E. // *Annals of Nuclear Energy*. - 2013. - Iss. 58. - P. 188 - 197.
6. Pelykh S.N., Maksimov M.V. // *Voprosy atomnoj nauki i tekhniki. Ser. Fizika radiatsionnykh povrezhdenij i radiatsionnoe materialovedenie*. - 2013. - Iss. 5(87). - P. 84 - 90. (Rus)
7. Pelykh S.N., Maksimov M.V., Parks G.T. // *Nuclear*



- Engineering and Design. - 2013. - Vol. 257, No. 4. - P. 53 - 60.
8. *Database on NSSS for SU NPP design accidents analysis, unit No. 1.* - Yuzhnoukrainsk: YuU AES, 1999. - 643 p. (Rus)
  9. *Vorob'ev R.Yu.* Albums of neutron-physical characteristics of the reactor core unit No. 5 of Zaporozhzhhe AES, campaigns 20-23. - Energodar: Zaporozhskaya AES, 2008 - 2011. - 323 p. (Rus)
  10. *MATLAB Version 7.10.0.* - Natick. Massachusetts: The Math Works Inc., 2010. - 512 p.
  11. *Filimonov P.E., Mamichev V.V., Aver'yanova S.P.* // *Atomnaya energiya.* - 1998. -Vol. 84, No. 6. - P. 560 - 563. (Rus)
  12. *Suzuki M.* Light water reactor fuel analysis code FEMAXI-V (Ver.1). JAERI-Data/Code 2000-030. - Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. - 285 p.
  13. *Suzuki M.* Modeling of fuel elements behavior of light water reactor in various loading conditions / Translated from English by S. N. Pelykh. - Odessa: Astroprint, 2010. - 218 p. (Rus)

Надійшла 17.02.2014  
Received 17.02.2014