

УДК 621.039.548.5

С.Н. Пельх, д-р техн. наук, ст. науч. сотр.,
М.В. Никольский, магистр,
Одес. нац. политехн. ун-т,
С.Д. Рябчиков, магистр,
Харьков. физ.-техн. ин-т

МЕТОД ОГРАНИЧЕНИЯ ВЕРОЯТНОСТИ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ВВЭР

Введение. Актуальным запросом практики является повышение безопасности, надежности и экономичности эксплуатации реактора типа ВВЭР. Главным фактором, ограничивающим повышение эффективности эксплуатации ВВЭР, является герметичность оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов). Хотя в нормативных документах и регламентируется изменение поврежденности $\omega(\tau)$ оболочек ТВЭЛов при нормальных условиях эксплуатации [1], методика расчета величины $\omega(\tau)$, накопленной к моменту разгерметизации оболочки с учетом последовательности совокупностей условий эксплуатации ТВЭЛов для каждой тепловыделяющей сборки (ТВС), не определяется. В нормативных документах не сказано, каким образом можно управлять изменением поврежденности в процессе эксплуатации ТВЭЛов. На действующих реакторах ВВЭР-1000 НАЭК “Энергоатом” не предусмотрены процедуры для локализации разрушенного ТВЭЛ в ТВС, локализации аксиального сегмента оболочки ТВЭЛ, в котором произошла разгерметизация, а также для учета последовательности перестановок в активной зоне (АКЗ) ТВС, содержащих разгерметизированные ТВЭЛы. Вследствие этого на АЭС НАЭК “Энергоатом” не ведется соответствующая статистика.

Для повышения безопасности и экономичности эксплуатации ТВЭЛов ВВЭР необходимо регламентировать управление процессом накопления поврежденности оболочек ТВЭЛов каждой ТВС в зависимости от последовательности совокупностей условий нормальной эксплуатации. Управление этим процессом должно осуществляться на основе нормативных требований по ограничению количества негерметичных ТВЭЛов в АКЗ, однако без необоснованно высокой консервативности, ведущей к снижению конкурентоспособности ВВЭР. Управление процессом накопления поврежденности оболочек подразумевает учет требований экономичности эксплуатации ТВЭЛов, а также внедрение уже разработанных мероприятий, снижающих удельный вес таких факторов разгерметизации оболочек, как механическое взаимодействие топлива с оболочкой при низких глубинах выгорания топлива, коррозионное растрескивание под напряжением, коррозия в области глубоких выгораний [2].

Анализ последних исследований и публикаций. ЭВТП-метод расчета поврежденности $\omega(\tau)$ оболочки ТВЭЛ позволяет преодолеть недостатки подхода к оценке $\omega(\tau)$ на основе прочностного критерия SC4, в числе которых: высокая неопределенность оценки, неучет влияния конкретной истории нагружения ТВЭЛ на величину $\omega(\tau)$, неучет ползучести как превалирующего процесса, определяющего скорость накопления $\omega(\tau)$ при частотах циклического нагружения ТВЭЛ $\ll 1$ Гц.

Предложенный в рамках ЭВТП-метода критерий разгерметизации оболочки содержит лимитирующий компонент A_0 ($A_0=55$ МДж/м³ для циркалоя-4), рассчитываемый как удельная энергия рассеяния $A(\tau)$ в момент начала разгерметизации оболочки τ_0 . Поскольку A_0 не зави-

DOI 10.15276/opus.2.44.2014.16

© С.Н. Пельх, М.В. Никольский, С.Д. Рябчиков, 2014

сит от истории нагружения твэла, и коэффициент запаса для ЭВТП-критерия равен 2, что в 5 раз меньше коэффициента запаса для SC4, ЭВТП-критерий предпочтительнее SC4 при прогнозировании долговечности оболочек твэлов [2].

В критериальной модели эффективности управления свойствами твэлов учитываются совместно $\omega(\tau)$ и экономико-технологические показатели эксплуатации реакторной установки (РУ), что позволяет повысить эффективность нормальной эксплуатации твэлов путем управления их свойствами. Это управление производится с учетом априорных требований к свойствам твэлов и АКЗ, задания детерминирующих факторов (ДФ) и контролируемых параметров, определения оптимальных и предельно допустимых значений контролируемых параметров. Совокупность детерминирующих факторов, обеспечивающая наилучшее удовлетворение требований к свойствам твэлов, определяется в результате итерационного расчета по максимуму критерия эффективности Eff управления свойствами твэлов [2].

В обобщенном алгоритме управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР применяются следующие методы управления: конструктивными параметрами твэла (M_1); расположением в АКЗ регулирующей группы системы управления и защиты (M_2); балансом стационарного и переменного нагружения РУ (M_3); температурным режимом теплоносителя (M_4); перестановками ТВС в АКЗ (M_5) [3].

Перестановки ТВС моделируются в условно выделенном секторе АКЗ, включающем 1/6 всех ТВС (кроме центральной) и 1/6 всех органов регулирования, задействованных при управлении распределением нейтронного поля в АКЗ в процессе маневра мощностью РУ.

Наиболее характерным вариантом перестановок ТВС в секторе АКЗ является случай, когда ячейка 82 не рассматривается при моделировании перестановок, и для ТВС каждого года выделяется семь ячеек, за исключением ТВС 4-го года кампании, для которых выделяется шесть ячеек. На основании применяемых на практике схем компоновки топлива в АКЗ принято распределение ТВС по ячейкам сектора (рис. 1) [4, 5].

Обозначив через j номер алгоритма перестановок ТВС согласно методу управления перестановками, максимальное ω_j^{\max} и среднее $\langle \omega \rangle_j$ значения поврежденности оболочки, минимальное значение B_j^{\min} глубины выгорания топлива (среди ТВС, задействованных в алгоритме j) являются контролируемыми параметрами, алгоритм перестановок ТВС является варьируемым детерминирующим фактором (рис. 2).

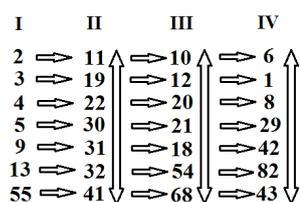


Рис. 1. Схема распределения ТВС по ячейкам: число — номер ячейки; римская цифра — соответствующий год

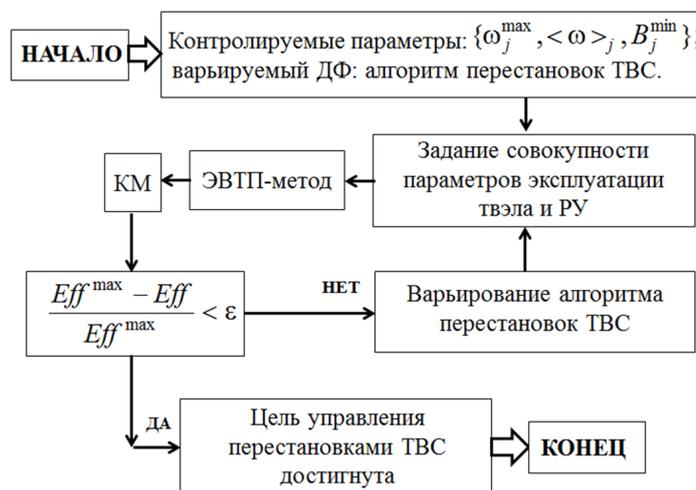


Рис. 2. Метод управления перестановками ТВС

Целью работы является разработка метода снижения вероятности накопления поврежденности оболочек твэлов путем развития метода управления свойствами твэлов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР.

Изложение основного материала. Согласно метода ограничения вероятности накопления поврежденности оболочек твэлов в результате последовательного применения методов $M_1 \dots M_5$ определяются варианты совокупностей детерминирующих факторов с наибольшими Eff . Далее среди этих вариантов находится совокупность детерминирующих факторов с минимальной вероятностью разгерметизации оболочек твэлов.

Допущения анализа:

— поврежденность оболочки рассчитывается для усредненного по ТВС ВВЭР-1000 (В-320) твэла;

— тип ТВС — ТВС-А;

— оболочка твэла изготовлена из циркониевого сплава циркалой-4;

— суточный маневр мощностью $N_{ПУ}$ выполняется по схеме: $100\% N_{ном} \rightarrow 80\% \rightarrow 100\%$;

— входная температура теплоносителя поддерживается постоянной;

— органы регулирования системы управления и защиты (СУЗ) размещены в АКЗ по У-алгоритму [3];

— управление свойствами твэлов производится путем управления перестановками ТВС.

Рассматривались 18 алгоритмов перестановок ТВС в секторе АКЗ, каждый алгоритм включал 7 перестановок ТВС, при этом 16 алгоритмов перестановок выбирались случайно путем случайного задания номеров ячеек с помощью функции MATLAB “rand” [6]. Кроме гипотетических алгоритмов, рассматривались также практически использованные на Запорожской АЭС алгоритмы 17 и 18 [5].

Учитывая амплитуду перемещения органов регулирования, необходимую для стабильности аксиального офсета, используя программные средства “Имитатор реактора” [7] и FEMAXI [8], ЭВТП-критерий при $A_0 = 30 \text{ МДж/м}^3$, для наиболее нагруженного шестого аксиального сегмента твэла рассчитывались ω (1460 сут) и B (1460 сут).

Используя критериальную модель, рассчитана эффективность Eff для 18 алгоритмов. Цель управления перестановками ТВС достигнута при алгоритме 3. Физический смысл повышения эффективности алгоритма перестановок заключается в уменьшении в 2 раза интервалов разброса значений поврежденности оболочки и глубины выгорания топлива для ТВС алгоритма. Использование ЭВТП-критерия подразумевает учет ограничений по всем существующим нормативным критериям приемки твэла, за исключением SC4 [3].

Определив величину $\omega(\tau)$ для перестановок ТВС указанных алгоритмов, найдя интервал разброса значений $\omega(\tau)$ для каждого алгоритма перестановок j , рассматривая поврежденность как случайную величину ω_j^{rand} , распределенную по Гауссовскому закону, учитывая правило трех сигм, принимая предельно допустимое значение поврежденности оболочек $\omega^{lim} = 8,5\%$, найдена вероятность P_j разгерметизации оболочки усредненного по ТВС твэла [2].

Например, для алгоритмов 2, 3, 6, 17 и 18, характеризуемых значениями $Eff_2 = \min\{Eff_j\}$, $Eff_3 = \max\{Eff_j\}$, $Eff_6 \in [Eff_2, Eff_3]$, Eff_{17} и Eff_{18} , вероятность P_j составила 0,0035; 0; 0; 0,0039; 0,00085 соответственно.

Учитывая, что в пределах условно выделенного сектора симметрии АКЗ в каждом алгоритме перестановок ТВС используются 6 ТВС 4-го года кампании, суммарное число твэлов в ТВС 4-го года составляет $312 \times 6 = 1872$.

Рассматривая 6 тождественных секторов симметрии АКЗ, для алгоритма j по формуле Бернулли рассчитана вероятность $P_{j,11232}(k)$ разгерметизации k из $n=11232$ твэлов, содержащихся в 36 ТВС, эксплуатировавшихся в течение 4-х лет во всех секторах симметрии АКЗ.

Алгоритмы 3 и 6 имеют нулевую вероятность разгерметизации оболочек твэлов, тогда как вероятность разгерметизации ≥ 18 твэлов для практически использованных алгоритмов 17 и 18 составила 97,6 % и 21,4 %, соответственно.

Для учета неоднородности распределения энерговыделения по твэлам внутри ТВС, с помощью программных средств MCNPX рассчитаны относительные энерговыделения для 4 групп твэлов ТВС. Разбиение твэлов на 4 группы выполнено по коэффициенту относительного энерговыделения $k_{v,i,j}$ в 6-м аксиальном сегменте твэла, где $i=6, j$ — номер аксиального сегмента и номер ячейки АКЗ соответственно. При этом I, II, III и IV группы включают твэлы с $k_{v,6,j}$, лежащими в интервалах $[0,4;1]$, $[1;1,2]$, $[1,2;1,4]$ и $[1,4;1,7]$, соответственно.

Расчеты проводились для начала 5-й кампании энергоблока № 2 ХАЭС. График нагрузки реактора, график положения 10-й группы органов регулирования СУЗ и температура теплоносителя на входе в АКЗ соответствуют принятым допущениям. Для перестановки 5-30-10-43 алгоритма 2 получено распределение твэлов по группам, приведенное в табл. 1.

Обозначая для ТВС, расположенной в ячейке j АКЗ, количество твэлов группы I...IV как соответственно $n_j^I \dots n_j^{IV}$, справедливо

$$n_{j=5}^I \neq n_{j=30}^I \neq n_{j=43}^I; n_{j=5}^{II} \neq n_{j=30}^{II} \neq n_{j=10}^{II} \neq n_{j=43}^{II};$$

$$n_{j=5}^{III} \neq n_{j=30}^{III} \neq n_{j=10}^{III} \neq n_{j=43}^{III}; n_{j=5}^{IV} \neq n_{j=30}^{IV} \neq n_{j=10}^{IV}.$$

Используя принцип консервативности, на основании данных табл. 2 запишем распределение твэлов по группам в ТВС, помещенной последовательно в ячейки 5, 30, 10 и 43 (рис. 3).

Таблица 1
Распределение твэлов по группам для перестановки 5-30-10-43

Группа	Ячейка 5	Ячейка 30	Ячейка 10	Ячейка 43
I	110	0	0	219
II	58	2	28	93
III	77	62	284	0
IV	67	248	0	0

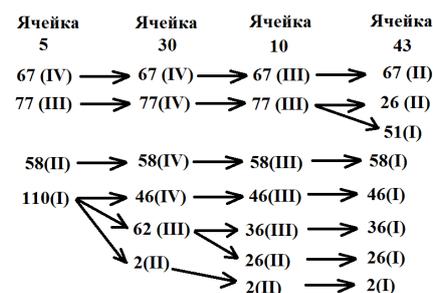


Рис. 3. Консервативное распределение твэлов по группам

На основании консервативного распределения твэлов по группам для перестановки 5-30-10-43 получены приведенные группы твэлов $I^* \dots IV^*$, характеризуемые тем, что для любого j справедливо:

$$n_j^{I^*} = 110; n_j^{II^*} = 58; n_j^{III^*} = 77; n_j^{IV^*} = 67.$$

Перейдя к приведенным группам твэлов, коэффициенты относительного энерговыделения равны для $j=5, 30, 10, 43$, соответственно

$$I^*: k_{v,i,5}^I; (k_{v,i,30}^{II} \cdot 2 + k_{v,i,30}^{III} \cdot 62 + k_{v,i,30}^{IV} \cdot 248) / 110; (k_{v,i,10}^{II} \cdot 28 + k_{v,i,10}^{III} \cdot 284) / 110; k_{v,i,43}^I.$$

$$II^*: k_{v,i,5}^{II}; k_{v,i,30}^{IV}; k_{v,i,10}^{III}; k_{v,i,43}^I.$$

$$III^*: k_{v,i,5}^{III}; k_{v,i,30}^{IV}; k_{v,i,10}^{III}; (k_{v,i,43}^{II} \cdot 26 + k_{v,i,43}^I \cdot 51) / 77.$$

$$IV^*: k_{v,i,5}^{IV}; k_{v,i,30}^{IV}; k_{v,i,10}^{III}; k_{v,i,43}^{II}.$$

Результаты. Рассматривая перестановку 5-30-10-43 алгоритма 2, для приведенных групп твэлов $I^* \dots IV^*$ рассчитаны поврежденности оболочки в наиболее нагруженном аксиальном сегменте 6 (табл. 2).

Для перестановки 5-30-10-43 алгоритма 2, при учете неоднородности распределения энерговыделения по твэлам внутри ТВС, максимальное расчетное значение поврежденности оболочки составило 13,8 %, что более чем в два раза превысило значение поврежденности для однокрупной модели.

Таблиця 2

Поврежденность оболочки для приведенных групп твэлов

Группа	Количество твэлов	ω , %	ω для одногрупповой модели, %
I*	110	5,03	6,13
II*	58	8,36	
III*	77	10,8	
IV*	67	13,8	

Выводы. Разработан метод расчета вероятности разгерметизации оболочек твэлов реактора типа ВВЭР в зависимости от последовательности совокупностей факторов, определяющих поврежденность оболочек. Доказана возможность ограничения вероятности накопления поврежденности оболочек твэлов путем управления факторами, определяющими поврежденность. Показана необходимость перехода от одногрупповой модели распределения энерговыделения по твэлам внутри ТВС к многогрупповой модели с целью значительного повышения корректности расчета вероятности разгерметизации оболочек твэлов.

Литература

1. 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.
2. Пельх, С.Н. Основы управления свойствами твэлов ВВЭР / С.Н. Пельх. — Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing, 2013. — 168 с.
3. Pelykh, S.N. A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, M.V. Nikolsky // Вопросы атомной науки и техники. Сер: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. — 2014. — № 4(92). — С. 108 — 116.
4. База данных по ЯППУ для анализа проектных аварий ЮУ АЭС, энергоблок № 1. — Южноукраинск: ЮУ АЭС, 1999. — 643 с.
5. Воробьев, Р.Ю. Альбомы нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора энергоблока № 5 ЗАЭС, кампании 20-23 / Р.Ю. Воробьев. — Энергодар: Запорожская АЭС, 2011. — 323 с.
6. Uniformly distributed pseudorandom numbers : documentation [Электронный ресурс] / MathWorks: Accelerating the pace of engineering and science. — Режим доступа: <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rand.html> (Дата обращения: 30.09.2014).
7. Филимонов, П.Е. Программа “Имитатор реактора” для моделирования маневренных режимов работы ВВЭР-1000 / П.Е. Филимонов, В.В. Мамичев, С.П. Аверьянова // Атомная энергия. — 1998. — Т. 84, № 6. — С. 560 — 563.
8. Сузуки, М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения: монография / М. Сузуки; авториз. пер. с англ. яз. С.Н. Пельх; под науч. ред. М.В. Максимова. — Одесса: Астропринт, 2010. — 245 с.

References

1. The Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision (2008). *NP-082-07: Nuclear Safety Regulations for NPP Reactor Plants*. Moscow, Russian Federation: Author.
2. Pelykh, S.N. (2013). *Basic management of VVER fuel elements properties*. Saarbrücken: Palmarium Academic Publishing.
3. Pelykh, S.N., Maksimov, M.V. and Nikolsky, M.V. (2014). A method for minimization of cladding failure parameter accumulation probability in VVER fuel elements. *Problems of Atomic Science and Technology: Physics of Radiation Effect and Radiation Materials Science*, 4, 108-116.
4. South-Ukraine Nuclear Power Plant (1999). *The Nuclear Steam-Generating Plant Database for Design Accident Analysis at the South-Ukraine NPP, Unit 1*. Yuzhnoukrainsk: Author.

5. Vorobyev, R.Yu. (2011). *Albums of Neutron-Physical Characteristics of the Unit 5 Reactor Core of Zaporizhzhya NPP, Campaigns 20–23*. Energodar: Zaporizhzhya NPP.
6. MathWorks: Accelerating the pace of engineering and science. (n.d.). *Uniformly distributed pseudorandom numbers*. Retrieved from <http://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rand.html>
7. Filimonov, P.E., Mamichev, V.V. and Aver'yanova, S.P. (1998). The "reactor simulator" program for simulating load-tracking states in a VVER-1000 reactor. *Atomic Energy*, 84(6), 426-429.
8. Suzuki, M. and Saitou, H. (2006). *Light Water Reactor Fuel Analysis Code: FEMAXI-6 (Ver. 1): Detailed Structure and User's Manual*. Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan: Japan Atomic Energy Agency.

АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

С.М. Пелих, М.В. Никольский, С.Д. Рябчиков. Метод обмеження імовірності накопичення пошкодженості оболонок тепловиділяючих елементів ВВЕР. Метою є зниження ймовірності накопичення пошкодженості оболонок тепловиділяючих елементів шляхом розвитку метода управління властивостями тепловиділяючих елементів на стадіях проектування і експлуатації ВВЕР. Розглядаючи усереднений по тепловиділяючій збірці ВВЕР-1000 тепловиділяючий елемент, знайдена імовірність розгерметизації оболонок тепловиділяючих елементів та доведена можливість прогнозування надійності оболонок шляхом управління факторами, що визначають властивості твєлів. Показано доцільність переходу від одноступенчатої моделі розподілу енерговиділення по тепловиділяючих елементах тепловиділяючої збірки до багаторупенчатої моделі, що дозволить знизити імовірність розгерметизації оболонок твєлів з одночасним підвищенням економічності експлуатації ВВЕР.

Ключові слова: ВВЕР, оболонка тепловиділяючого елемента, зниження імовірності накопичення пошкодженості.

С.Н. Пельх, М.В. Никольский, С.Д. Рябчиков. Метод ограничения вероятности накопления поврежденности оболочек тепловыделяющих элементов ВВЭР. Целью является снижение вероятности накопления поврежденности оболочек тепловыделяющих элементов путем развития метода управления свойствами тепловыделяющих элементов на стадиях проектирования и эксплуатации ВВЭР. Рассматривая усредненный по тепловыделяющей сборке ВВЭР-1000 тепловыделяющий элемент, найдена вероятность разгерметизации оболочек тепловыделяющих элементов и доказана возможность прогнозирования надежности оболочек путем управления факторами, определяющими свойства тепловыделяющих элементов. Показана целесообразность перехода от одноступенчатой модели распределения энерговыведения по тепловыделяющим элементам тепловыделяющей сборки к многоступенчатой модели, что позволит снизить вероятность разгерметизации оболочек тепловыделяющих элементов с одновременным повышением экономичности эксплуатации ВВЭР.

Ключевые слова: ВВЭР, оболочка тепловыделяющего элемента, снижение вероятности накопления поврежденности.

S.N. Pelykh, M.V. Nikolsky, S.D. Ryabchikov. A method for limitation of probability of accumulation of fuel elements claddings damage in WWER. The aim is to reduce the probability of accumulation of fuel elements claddings damage by developing a method to control the properties of the fuel elements on stages of design and operation of WWER. An averaged over the fuel assembly WWER-1000 fuel element is considered. The probability of depressurization of fuel elements claddings is found. The ability to predict the reliability of claddings by controlling the factors that determine the properties of the fuel elements is proved. The expediency of the transition from the one-group model of power distribution for the fuel elements of the fuel assembly to the multigroup model is shown. This will reduce the probability of depressurization of fuel elements claddings and at the same time improve the efficiency of operation of WWER.

Keywords: WWER, fuel element cladding, reduce of the probability of damage accumulation.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Максимов М.В.

Поступила в редакцию 9 октября 2014 г.