

## ОЦЕНКА АКСИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРА ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА ВВЭР-1000 ПРИ СУТОЧНОМ МАНЕВРИРОВАНИИ

**М.В. Максимов\*, С.Н. Пелых\*, О.В. Маслов\*, В.Е. Баскаков\*\***

*\*Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса*

*\*\*Запорожская АЭС, г. Энергодар*



Выполнена расчетная оценка аксиального распределения параметра повреждения материала оболочки твэла ВВЭР-1000 в переменном режиме суточного маневрирования мощностью реактора с учетом различия между аксиальными сегментами твэла и тепловыделяющими сборками по уровню стационарной мощности и амплитуде скачка мощности при маневрировании. Получено, что при условном разбиении длины твэла на восемь равных аксиальных сегментов время целостности шестого (считая от низа активной зоны) аксиального сегмента ограничивает длительность эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме суточного маневрирования.

**Ключевые слова:** параметр повреждения оболочки, твэл, маневрирование мощностью, реактор ВВЭР-1000, энергетический вариант теории ползучести.

**Key words:** cladding damage parameter, fuel element, power maneuvering, WWER-1000, creep theory energy variant.

### ВВЕДЕНИЕ

Оценка времени сохранения целостности оболочек твэлов при многократных циклических изменениях мощности РУ является одной из ключевых задач при оценке допустимой длительности эксплуатации ВВЭР-1000 в переменном режиме. На основе энергетического варианта теории ползучести (ЭВТП) для переменного режима нормальной эксплуатации ВВЭР-1000 был предложен метод оценки долговечности оболочки твэла [1].

Согласно методу конечных элементов, при совместном решении уравнений теплопроводности и механической деформации компонентов твэла его длина условно делится на  $n$  равных аксиальных сегментов,  $n \leq 12$  [2]. Удельная энергия рассеяния  $A_0$ , определяющая работу, затраченную в процессе ползучести на разрушение материала оболочки, находилась в момент потери устойчивости материала оболочки, т.е. при достижении равенства между величинами эквивалентного напряжения  $\sigma_e^{\max}(\tau)$  и предела текучести  $\sigma_0^{\max}(\tau)$  в точке оболочки с максимальной

температурой, расположенной на внутренней поверхности центрального аксиального сегмента твэла. В качестве исходного допущения принималось, что максимально опасным является центральный аксиальный сегмент твэла, для которого выполнялась оценка долговечности оболочки. При условии  $n = 8$  центральными аксиальными сегментами будут сегменты номер 4 и 5, имеющие одинаковую среднюю линейную мощность, если не учитывать наличие аксиального офсета и влияние размещения органов регулирования СУЗ (ОР) в активной зоне (АКЗ) реактора.

Однако в соответствии с размещением ОР в верхней части АКЗ ВВЭР-1000 следует ожидать, что наиболее значительные относительные скачки линейной мощности в твэле при увеличении мощности РУ (например, от 80 до 100% номинала) будут не в центре АКЗ, а в ее верхней части [3]. Поэтому для более корректного анализа долговечности оболочки твэла в переменном режиме необходимо найти влияние переменного режима на все аксиальные сегменты твэла, а не только на центральный сегмент, с учетом различия в величинах стационарной мощности и скачка мощности между разными сегментами и тепловыделяющими сборками (ТВС).

### **ОЦЕНКА АМПЛИТУДЫ СКАЧКА МОЩНОСТИ АКСИАЛЬНЫХ СЕГМЕНТОВ ТВЭЛА**

Амплитуда скачка мощности аксиальных сегментов твэла при увеличении мощности РУ ВВЭР-1000 с 80 до 100% оценивалась с помощью программы «Имитатор реактора» (ИР) [4] для альтернативного алгоритма суточного маневра мощностью. Альтернативный алгоритм: снижение мощности РУ до 90% в течение 0,5 ч вводом раствора борной кислоты – дальнейшее снижение мощности до 80% в течение 2,5 ч за счет отравления реактора – работа на мощности 80% в течение 4 ч – повышение мощности до номинальной в течение 2 ч (в диапазоне мощности от 100 до 80% входная температура теплоносителя постоянна, а начальное давление пара во втором контуре изменяется в регламентных пределах 58–60 бар) [5].

Принималось, что при увеличении мощности реактора с 80 до 100% изменяется положение лишь десятой группы ОР, другие группы ОР при маневре мощностью полностью выведены из АКЗ.

Принималось также, что используется усовершенствованный алгоритм управления мощностью АКЗ (У-алгоритм). Размещение десяти групп ОР в АКЗ для реакторов ВВЭР-1000, на которых применяются У-алгоритмы, показано на рис. 1.

Положение десятой группы ОР для уровней мощности ВВЭР-1000 80 и 100% задавалось 84 и 90% от низа АКЗ соответственно. Задавая режимные характеристики РУ ВВЭР-1000 в соответствии с [6], с помощью программы ИР получили, что все ТВС по амплитуде увеличения их мощности при росте мощности АКЗ с 80 до 100% (в 1,25 раз) могут быть условно разделены на три группы (табл. 1).

В реакторе ВВЭР-1000 свежие ТВС и центральная ТВС находятся под регулированием только в том случае, если при маневрировании мощностью РУ, кроме 10-й группы ОР СУЗ, применяются также 8-я и 9-я группы. В случае, если при маневрировании применяется только 10-я группа ОР, примером неблагоприятной для целостности оболочек твэлов истории перестановок ТВС в АКЗ может считаться следующая последовательность перемещений ТВС в течение 4-летней кампании: в течение 1-го года ТВС стоит на месте 55-й ТВС – в составе 2-й (условно выделенной) группы ТВС; в течение 2-го года ТВС стоит под регулированием на месте 31-й ТВС – в составе 1-й группы; в течение 3-го года ТВС стоит на месте 69-й ТВС – в составе 2-й группы; в течение 4-го года ТВС стоит на месте центральной 82-й ТВС – в составе 2-й группы.

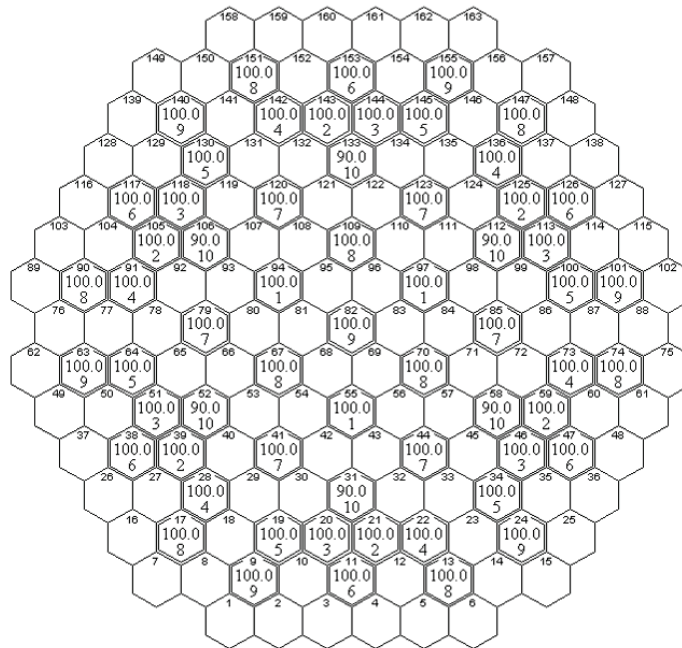


Рис. 1. Размещение ОР в АКЗ ВВЭР-1000 для У-алгоритма управления мощностью АКЗ: верхняя, средняя и нижняя цифра – номер ТВС, положение группы ОР (% от низа АКЗ), номер группы ОР соответственно

Пусть  $K_q(j)$  – относительная мощность  $j$ -й ТВС, тогда тепловая мощность  $j$ -й ТВС  $Q_j$  находится как

$$Q_j = K_q(j) \cdot \langle Q_{\text{ТВС}} \rangle, \quad (1)$$

где  $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle$  – средняя мощность ТВС по АКЗ.

При известном  $Q_j$  средняя линейная мощность  $j$ -й ТВС

$$\langle q_{l,j} \rangle = \frac{Q_j}{n_{\text{ТВ}} \cdot l_{\text{ТВ}}}, \quad (2)$$

где  $n_{\text{ТВ}} = 312$  – количество твэлов в ТВС;  $l_{\text{ТВ}} = 3,5$  м – длина твэла.

Средняя линейная мощность по АКЗ

$$\langle q_l \rangle = \frac{\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle}{n_{\text{ТВ}} \cdot l_{\text{ТВ}}}. \quad (3)$$

Пусть количество ТВС в АКЗ составляет 163, тогда при мощности РУ  $N = 100\%$  (тепловой мощности АКЗ 3000 МВт)  $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle = 18,405$  МВт;  $\langle q_l \rangle = 168,5$  Вт/см. При  $N = 80\%$   $\langle Q_{\text{ТВС}} \rangle = 14,724$  МВт;  $\langle q_l \rangle = 134,8$  Вт/см.

Таблица 1

**Увеличение мощности ТВС при росте мощности АКЗ с 80 до 100% (для У-алгоритма)**

Группа	Количество ТВС	Рост мощности ТВС, %	Порядковый номер ТВС, входящих в состав группы (согласно картограмме АКЗ)
1	6	28	31, 52, 58, 106, 112, 133
2	37	26–27	20, 42, 43, 46, 51, 53–57, 66–71, 80–84, 93–98, 107–111, 113, 118, 121, 122, 144
3	120	≤ 25	Все другие

Таблица 2

**Средняя линейная мощность ТВС № 55, 31, 69, 82 при  $N = 80$  и  $100\%$** 

$j$	55		31		69		82	
$N, \%$	80	100	80	100	80	100	80	100
$K_v(j)$	1,22	1,23	1,24	1,27	0,90	0,91	0,63	0,64
$Q_j$ , МВт	17,96	22,64	18,26	23,37	13,25	16,75	9,276	11,78
$\langle q_{l,j} \rangle$ , Вт/см	164,5	207,3	167,2	214,0	121,4	153,4	84,95	107,9

С помощью программы ИР для  $N = 80$  и  $100\%$  найдена средняя линейная мощность ТВС № 55, 31, 69, 82 при маневрировании мощностью по альтернативному алгоритму (табл. 2).

Согласно данным табл. 2, средняя расчетная мощность указанных ТВС (при  $N=100\%$ ) в течение четырех лет составляет для У-алгоритма 18,6 МВт. Вместе с тем, на пятом блоке ЗАЭС, на котором не применяется У-алгоритм управления мощностью АКЗ реактора ВВЭР-1000, для 21-й кампании средняя мощность ТВС ( $N=100\%$ ) в течение четырех лет составила 17,7 МВт.

Таким образом, при заданном У-алгоритме управления мощностью АКЗ обеспечивается консервативность оценки величины параметра повреждения оболочки в переменном режиме по альтернативному алгоритму маневрирования.

В программе ИР высота твэла условно делится на  $m$  аксиальных слоев. Обозначая тепловую мощность  $i$ -го (нумерация от низа АКЗ) аксиального слоя  $j$ -й ТВС, т.е. расчетной ячейки  $(i, j)$  как  $Q_{i,j}$ , для тепловой мощности  $j$ -й ТВС  $Q_j$  находим

$$Q_j = \sum_{i=1}^m \frac{K_v(i, j)}{m} \langle Q_{\text{ТВС}} \rangle, \quad (4)$$

где  $K_v(i, j)$  – относительная мощность расчетной ячейки  $(i, j)$ ,  $K_v(i, j) = Q_{i,j} / \langle Q_{\text{сл}} \rangle$ ;  $\langle Q_{\text{сл}} \rangle$  – средняя мощность аксиального слоя;  $\langle Q_{\text{сл}} \rangle = \langle Q_{\text{ТВС}} \rangle / m = 1,150$  МВт при  $N = 100\%$ ,  $\langle Q_{\text{сл}} \rangle = 0,920$  МВт при  $N = 80\%$ ;  $m$  – количество расчетных аксиальных слоев в ТВС, равное 16.

Из выражений (3), (4) следует соотношение для средней линейной мощности в  $i$ -м аксиальном слое  $j$ -й ТВС

$$\langle q_{l,i,j} \rangle = K_v(i, j) \cdot \langle q_l \rangle. \quad (5)$$

С помощью программы ИР рассчитано изменение  $\langle q_{l,i,j} \rangle$  для всех аксиальных слоев указанных ТВС при изменении мощности РУ от 100 до 80% по альтернативному алгоритму (рис. 2, 3).

При анализе повреждения оболочки твэла в переменном режиме по методу [1] с помощью программы FEMAXI необходимо учесть, что в программе FEMAXI число расчетных аксиальных сегментов  $n$  может задаваться различным, но не более 12.

Было доказано, что при увеличении количества аксиальных сегментов с  $n = 8$  до  $n = 12$  расчетная оценка с помощью программы FEMAXI долговечности оболочки твэла реактора типа ВВЭР-1000 меняется менее чем на 1% [7].

Принимая при анализе долговечности оболочки твэла, что длина твэла условно разделена на восемь аксиальных сегментов и каждый сегмент содержит два аксиальных слоя, т.е.  $m = 2 \cdot n$ , при мощности реактора 80 и 100% для указанных ТВС рассчитали средние значения линейной мощности  $\langle q_{l,i,j} \rangle$  по аксиальным сегментам.

Отношение средних линейных мощностей для аксиальных сегментов указанных

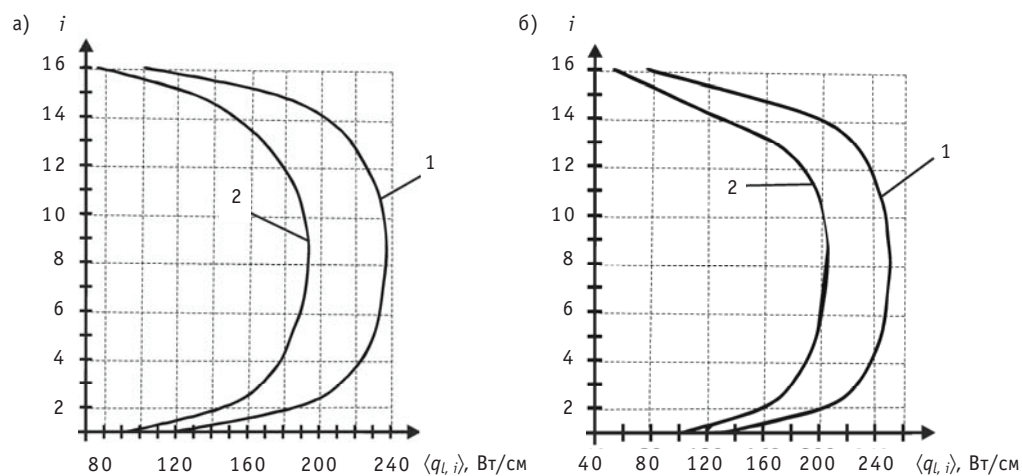


Рис. 2. Распределение средней линейной мощности по аксиальным слоям: а) – ТВС № 55; б) – ТВС № 31; 1 –  $N = 100\%$ ; 2 –  $N = 80\%$

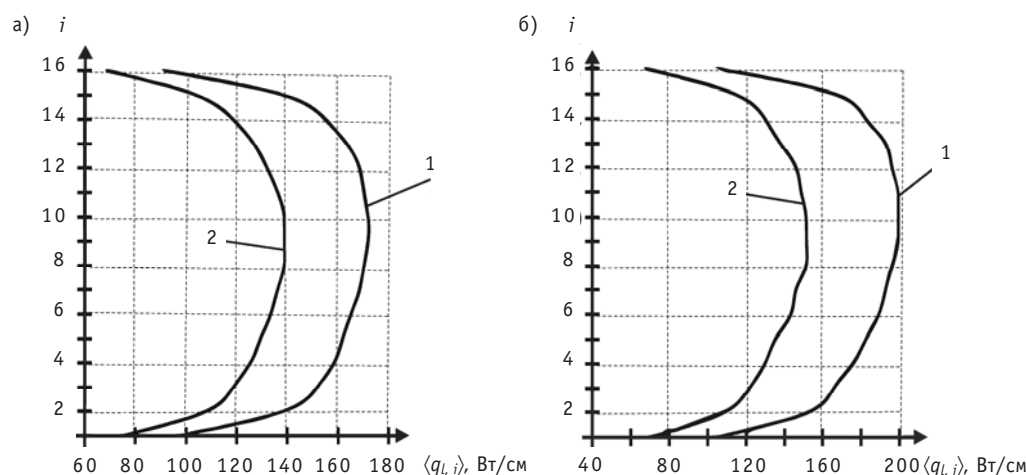


Рис. 3. Распределение средней линейной мощности по аксиальным слоям: а) – ТВС № 69; б) – ТВС № 82; 1 –  $N = 100\%$ ; 2 –  $N = 80\%$

Таблица 3

ТВС при  $N = 100$  и  $80\%$  приведено в табл. 3 (мощность РУ изменялась от 100 до 80% по альтернативному алгоритму).

Можно видеть, что при увеличении мощности РУ с 80 до 100% различие между первым и восьмым аксиальными сегментами по величине относительного скачка линейной мощности в твэле наиболее значительно для ТВС № 31, находящейся под регулированием (табл. 3).

**Отношение средних линейных мощностей для аксиальных сегментов при  $N = 100$  и  $80\%$**

$j$		55	31	69	82
$i$	8	1,341	1,517	1,328	1,340
	7	1,308	1,426	1,297	1,309
	6	1,250	1,241	1,263	1,268
	5	1,229	1,213	1,238	1,250
	4	1,224	1,217	1,232	1,242
	3	1,241	1,229	1,243	1,259
	2	1,255	1,251	1,271	1,270
	1	1,278	1,275	1,288	1,302

## ОЦЕНКА АКСИАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРА ПОВРЕЖДЕНИЯ ОБОЛОЧКИ

При расчете параметра повреждения материала оболочки твэла ВВЭР-1000 в качестве материала топливных таблеток для ТВС-А принималась спеченная двуокись урана, а в качестве материала оболочки – циркалой марки SR (stress relieved) [2]. Конструктивные характеристики твэла ТВС-А и режимные характеристики РУ ВВЭР-1000, служащие исходными данными при анализе аксиального распределения повреждения оболочки твэла в режиме суточного маневрирования мощностью РУ по альтернативному алгоритму, задавались в соответствии с [6].

Распределение линейной мощности в твэле по аксиальной координате  $z$  задавалось как

$$q_l(z) = q_{l, \max} \cdot k_j \quad (6)$$

где  $k_j$  – коэффициент относительной мощности для  $i$ -го аксиального сегмента;  $q_{l, \max}$  – максимальная линейная мощность в твэле, Вт/см.

Коэффициенты относительной мощности для аксиальных сегментов приведены в табл. 4.

Таблица 4

### Коэффициент относительной мощности $k_i$ для аксиальных сегментов

$j$	55		31		69		82	
$N, \%$	80	100	80	100	80	100	80	100
$q_{l, \max}, \text{Вт/см}$	193,5	236,8	205,6	250,3	138,8	171,9	95,71	119,6
$i$	$k_i$							
8	0,526	0,576	0,354	0,441	0,622	0,667	0,683	0,733
7	0,829	0,886	0,721	0,845	0,884	0,926	0,908	0,952
6	0,948	0,968	0,938	0,956	0,966	0,985	0,979	0,993
5	0,996	1,00	0,997	0,993	1,00	1,00	1,00	1,00
4	1,00	1,00	1,00	1,00	0,991	0,985	0,986	0,980
3	0,968	0,982	0,974	0,983	0,947	0,951	0,937	0,944
2	0,899	0,921	0,905	0,929	0,879	0,902	0,866	0,880
1	0,620	0,647	0,636	0,666	0,660	0,686	0,676	0,705

Без учета влияния на долговечность оболочки увеличения толщины окисного слоя на внешней поверхности оболочки критерий разрушения оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме [1] записывается в следующем модифицированном (обобщенном) виде:

$$\omega(\tau) = A(\tau) / A_0 = 1; A(\tau) = \int_0^{\tau} \sigma_e \cdot \dot{p}_e \cdot d\tau; A_0 \text{ — по условию: } \sigma_e^{\max}(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0^{\max}(\tau_0), \quad (7)$$

где  $\omega(\tau)$  – параметр повреждения оболочки твэла в момент времени  $\tau$ ;  $A(\tau)$  – удельная энергия рассеяния в момент времени  $\tau$ , Дж/м<sup>3</sup>;  $A_0$  – удельная энергия рассеяния в момент потери устойчивости  $\tau_0$  материала оболочки, при достижении равенства  $\sigma_e^{\max}(\tau_0) = \eta \cdot \sigma_0^{\max}(\tau_0)$ ;  $\sigma_e^{\max}(\tau)$ ,  $\sigma_0^{\max}(\tau)$  – соответственно эквивалентное напряжение (Па) и предел текучести (Па) в точке оболочки анализируемого



аксиального сегмента твэла, имеющей максимальную температуру;  $\eta$  – некоторый коэффициент,  $\eta \leq 1$ ;  $\dot{p}_e$  – скорость эквивалентной деформации ползучести,  $\text{с}^{-1}$ ;

Рассчитав  $p_e(\tau)$  и  $\sigma_e(\tau)$  для заданного режима нагружения твэла, находят энергию необратимых деформаций ползучести и рассчитывают параметр  $\omega(\tau)$ , определяющий повреждение оболочки в переменном режиме [1, 5].

Используя критерий (7) при  $\eta = 1$ , получили аксиальное распределение повреждения оболочки твэла при условии размещения какой-либо ТВС на месте 55-й ТВС в течение всего времени пребывания данной ТВС в АКЗ, а также при условии ее размещения на месте 55-й ТВС только в течение первых 360 сут, а в течение всего последующего времени пребывания в АКЗ – на месте 31-й ТВС (рис. 4).

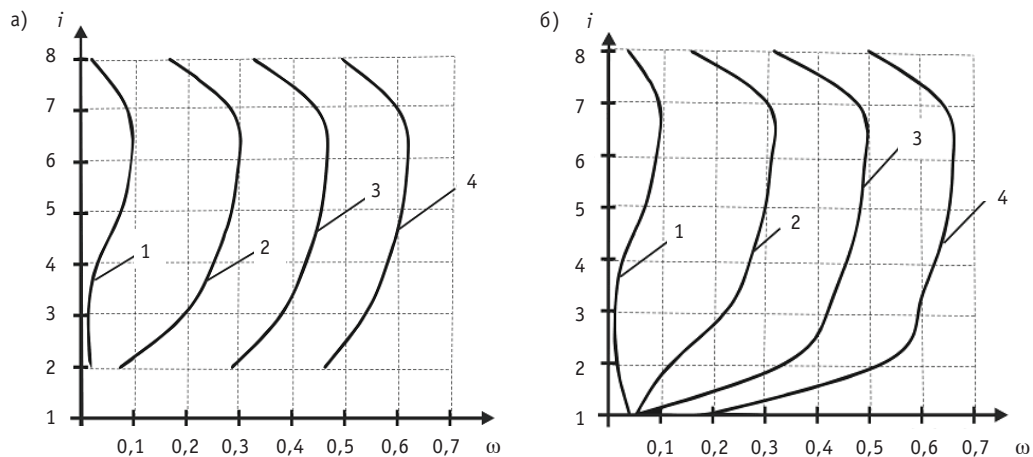


Рис. 4. Аксиальное распределение повреждения оболочки: а) – при условии постоянного размещения какой-либо ТВС на месте 55-й ТВС ( $\eta = 1$ ); б) – при условии размещения ТВС на месте 55-й ТВС в течение первых 360 сут, далее – на месте 31-й ТВС ( $\eta = 1$ ); 1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

Для первого аксиального сегмента оболочки при условии размещения ТВС на месте 55-й ТВС в течение всего времени пребывания ТВС в АКЗ потери устойчивости оболочки в соответствии с критерием (7) при  $\eta = 1$  не происходит вплоть до  $\tau = 2480$  сут (при  $\tau > 2480$  сут расчет не выполнялся).

При условии размещения ТВС в течение первых 360 сут на месте 55-й ТВС, в течение следующих 360 сут – на месте 31-й ТВС, а в течение остального времени пребывания в АКЗ – на месте 69-й ТВС для всех аксиальных сегментов потери устойчивости оболочки в соответствии с критерием (7) при  $\eta = 1$  не происходит вплоть до  $\tau = 2480$  сут (при  $\tau > 2480$  сут расчет не выполнялся) (табл. 5).

Таблица 5

**Эквивалентное напряжение и предел текучести оболочки для  $\tau = 2480$  сут при условии размещения ТВС на месте ТВС № 55, 31, 69**

Сегмент	8	7	6	5	4	3	2	1
$\sigma_e^{\max}(\tau)$ , МПа	154,5	173,8	177,9	175,6	169,3	160,2	145,5	84,48
$\sigma_0^{\max}(\tau)$ , МПа	224,8	220,0	219,6	220,3	221,6	223,3	225,3	230,9

При условии размещения ТВС в течение первых 360 сут на месте 55-й ТВС, в течение следующих 360 сут – на месте 31-й ТВС, в течение следующих 360 сут – на месте 69-й ТВС, а в течение остального времени пребывания в АКЗ – на месте

Таблица 6

**Эквивалентное напряжение и предел текучести оболочки для  $\tau = 2495$  сут при условии размещения ТВС на месте ТВС № 55, 31, 69, 82**

Сегмент	8	7	6	5	4	3	2	1
$\sigma_e^{\max}(\tau)$ , МПа	115,0	135,1	140,5	138,8	133,3	124,6	105,8	34,02
$\sigma_0^{\max}(\tau)$ , МПа	230,2	227,4	227,5	228,1	229,1	230,4	232,0	235,3

82-й ТВС для всех аксиальных сегментов потери устойчивости оболочки в соответствии с критерием (7) при  $\eta = 1$  не происходит вплоть до  $\tau = 2495$  сут (при  $\tau > 2495$  сут расчет не выполнялся) (табл. 6).

Используя критерий (7), получили аксиальное распределение повреждения оболочки ТВЭЛ для аксиальных сегментов с четвертого по седьмой включительно при условии размещения какой-либо ТВС в течение первых 360 сут на месте 55-й ТВС, в течение следующих 360 сут – на месте 31-й ТВС, в течение остального времени пребывания в АКЗ – на месте 69-й ТВС ( $\eta = 0,75$ ), а также при условии размещения ТВС в течение первых 360 сут на месте 55-й ТВС, в течение следующих 360 сут – на месте 31-й ТВС, далее в течение 360 сут – на месте 69-й ТВС, в течение остального времени пребывания в АКЗ – на месте 82-й ТВС ( $\eta = 0,6$ ) (рис. 5).

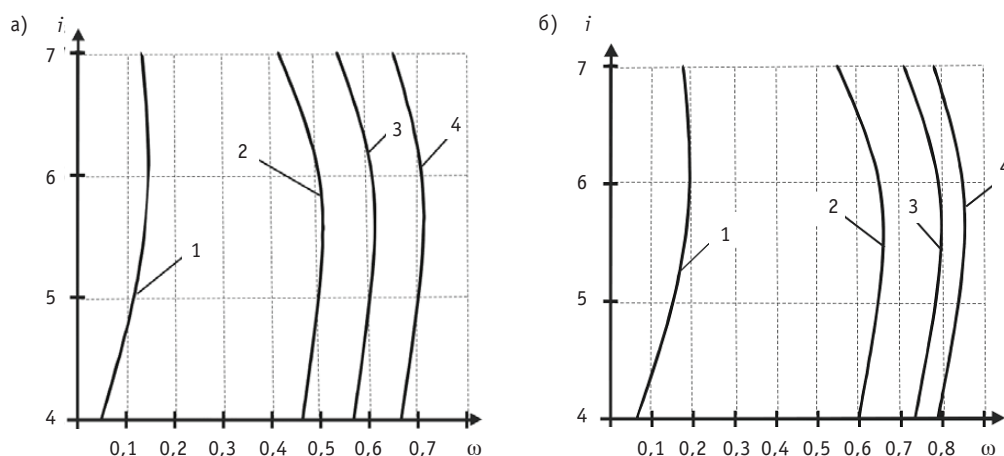


Рис. 5. Аксиальное распределение повреждения оболочки: а) – при условии размещения ТВС на месте 55-й ТВС (360 сут), 31-й ТВС (360 сут), далее – на месте 69-й ТВС ( $\eta = 0,75$ ); б) – при условии размещения ТВС на месте 55-й ТВС (360 сут), 31-й ТВС (360 сут), 69-й ТВС (360 сут), далее – на месте 82-й ТВС ( $\eta = 0,6$ ); 1 – 360 сут; 2 – 720 сут; 3 – 1080 сут; 4 – 1440 сут

Для восьмого аксиального сегмента, а также для аксиальных сегментов с первого по третий включительно при условии размещения какой-либо ТВС в течение первых 360 сут на месте 55-й ТВС, в течение следующих 360 сут – на месте 31-й ТВС, в течение остального времени пребывания в АКЗ – на месте 69-й ТВС момент потери устойчивости материала оболочки в соответствии с критерием (7) при  $\eta = 0,75$  не достигался вплоть до  $\tau = 2480$  сут.

Аналогичным образом, при условии размещения какой-либо ТВС в течение первых 360 сут на месте 55-й ТВС, в течение следующих 360 сут – на месте 31-й ТВС, далее в течение 360 сут – на месте 69-й ТВС, в течение остального времени пребывания в АКЗ – на месте 82-й ТВС для восьмого аксиального сегмента, а также для аксиальных сегментов с первого по третий включительно момент потери устойчивости материала оболочки в соответствии с критерием (7) при  $\eta = 0,6$  не достигался вплоть до  $\tau = 2495$  сут.



Смещение максимума повреждения оболочки вверх (в сторону шестого аксиального сегмента) при учете реального размещения ОР в АКЗ отражает тот факт, что наиболее значительные относительные скачки линейной мощности в твэле при увеличении мощности РУ наблюдаются не в центре АКЗ, а в ее верхней части.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая различие между аксиальными сегментами и ТВС ВВЭР-1000 в величинах стационарной мощности и скачка мощности при циклическом увеличении мощности РУ в переменном режиме, а также учитывая размещение ОР в АКЗ для альтернативного алгоритма суточного маневрирования мощностью и историю перемещений ТВС по АКЗ в ходе четырехлетней кампании, получили, что максимально опасным с точки зрения разрушения оболочки по механизму накопления повреждений за счет ползучести является шестой (считая от низа АКЗ, при условии разбиения длины твэла на восемь равных аксиальных сегментов) аксиальный сегмент, расположенный между координатами  $z = 2,19$  м и  $z = 2,63$  м.

Полученный результат подлежит уточнению, т.к. не учитывается, что увеличение толщины окисного слоя на внешней поверхности оболочки может вызвать превышение допустимого предела нормальной эксплуатации для температуры внешней поверхности раньше, чем будет достигнута потеря устойчивости материала оболочки по критерию (7).

Для критерия разрушения оболочки твэла реактора ВВЭР-1000 в переменном режиме на основе ЭВТП, предложенного в работах [1, 5, 7], требуется модификация, поскольку момент потери устойчивости материала оболочки в соответствии с критерием  $\sigma_e^{\max}(\tau_0) = \sigma_0^{\max}(\tau_0)$  при учете реальной истории перестановок ТВС по АКЗ не достигается вплоть до  $\tau \approx 6,8$  календарных лет.

## Литература

1. Метод оценки эксплуатационного ресурса оболочки твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / М.В. Максимов, С.Н. Пельх, О.В. Маслов, В.Е. Баскаков // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 5. – С. 294-299.
2. Сузуки М. Моделирование поведения твэла легководного реактора в различных режимах нагружения / Пер. сангл. С.Н. Пельх; под ред. М.В. Максимова. – Одесса: Астропринт, 2010. – 248 с.
3. Pelykh S.N. Estimation of local linear heat rate jump values in the variable loading mode / S.N. Pelykh, R.L. Gontar, T.V. Tsiselskaya / Abstracts of the 3<sup>rd</sup> int. conf. «Current problems of nuclear physics and atomic energy». – К.: Institute for Nuclear Research, 2010. – P. 126-127.
4. 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.
5. Model of cladding failure estimation for a cycling nuclear unit / M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov, V.E. Baskakov // Nuclear Engineering and Design. – 2009. – V. 239. – № 12. – P. 3021-3026.
6. Шмелев В.Д., Драгунов Ю.Г., Денисов В.П., Васильченко И.Н. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. – М.: Академкнига, 2004. – 220 с.
7. Pelykh S.N. Model of cladding failure estimation under multiple cyclic reactor power changes / S.N. Pelykh, M.V. Maksimov, V.E. Baskakov / Proc. of the 2-nd int. conf. «Current problems of nuclear physics and atomic energy». – К.: Institute for Nuclear Research, 2008. – P. 638-641.

Поступила в редакцию 3.09.2010

conjugated problem of heat transfer in the pipe at constant heat flux from pipe wall and problem with heat release in the wall.

**УДК 539.1.07:621.384.8**

*Plasma-optical three-division Spent Nuclear Fuel* \V.M. Bardakov, Vo Nhu Dan, G.N. Kichigin, N.A. Strokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 7 pages, 4 illustrations. – References, 10 titles.

For plasma-optical mass separator POMS-E-3 found the modes in which a separation of spent nuclear fuel into 3 parts, corresponding to two groups of fission products and transuranic elements. Proposed for the same purpose, a new plasma-optical mass separator POMS-CV, which excluded whirler.

**УДК 621.039.5**

*Mastering of the fast sodium reactor technology. Construction of the BN-800 reactor* \D.L. Zverev, B.A. Vasilev, V.Yu. Sedakov, N.G. Kuzavkov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 13 pages, 6 tables, 6 illustrations. – References, 12 titles.

The main aim of the BN-800 reactor construction is the perfection of the closed fuel cycle. The measures to improve BN800 reliability, safety and economic performance as compared to its predecessor BN-600 are focused upon.

**УДК 621.314.5**

*Modeling of Unit Power Supply of Nuclear Power Plant* \K.K. Krutikov, V.V. Rozhkov, V.N. Ivanov, E.A. Perfilyev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 8 pages, 6 illustrations. – References, 7 titles.

In the soft of MatLab the package of the models is developed, allowing to investigate the basic modes of functioning of blocks of units of an uninterrupted food in updating for Nuclear Power Plant. The comparative analysis of units of the uninterrupted food which is let out by different firms is given, results of modeling of one of possible enough difficult scenarios of work of the unit are resulted.

**УДК 621.039.566**

*Radiological Aspects of Nuclear Power Plant Accidents* \V.A. Kutkov, V.V. Tkachenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 11 pages, 5 tables, 1 illustration. – References, 24 titles.

The article deals with international recommendations for the protection of the public in radiation emergency. Comparison of the rules and regulations of the Russian Federation, the governing radiation protection of workers and the public in the event of nuclear accidents at NPP, with relevant international guidelines, shows that this national system is not complete and requires a revision of the regulatory framework to bring it into compliance with IAEA safety standards.

**УДК 621.039.548.5**

*Estimation of the WWER-1000 Fuel Element Cladding Damage Parameter Axial Distribution at Day Cycle Power Maneuvering* \M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2011. – 9 pages, 6 tables, 5 illustrations. – References, 7 titles.

A calculation estimation of the WWER-1000 fuel element cladding damage parameter axial distribution at day cycle power maneuvering, taking into account the fact that the fuel element axial segments and fuel assemblies differ greatly in their local linear heat rate jump and stationary power values, has been done. It has been obtained that on condition that the fuel element length is divided into eight equal axial segments, the sixth (counting from the core bottom) axial segment cladding durability limits the WWER-1000 operation time at day cycle power maneuvering.