

М. В. Максимов<sup>1</sup>, С. Н. Пелых<sup>1</sup>,  
О. В. Маслов<sup>1</sup>, В. Е. Баскаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Одесский национальный политехнический университет

<sup>2</sup>Запорожская АЭС

## Влияние неопределенности исходных данных на оценку долговечности оболочки ТВЭЛ при переменном режиме эксплуатации

*Выполнен анализ чувствительности оценки долговечности оболочки ТВЭЛ реактора ВВЭР-1000, работающего в режиме переменных нагрузок, к неопределенности в задании основных режимных и конструктивных параметров активной зоны реактора.*

М. В. Максимов, С. М. Пелих, О. В. Маслов, В. Е. Баскаков

**Вплив невизначеності вихідних даних на оцінку довговічності оболонки твела при змінному режимі експлуатації**

*Виконано аналіз чутливості оцінки довговічності оболонки твела реактора ВВЕР-1000, що працює в режимі змінних навантажень, до невизначеності в завданні основних режимних і конструктивних параметрів активної зони реактора.*

**В** последнее время повысился интерес к переменным режимам работы ядерных энергоблоков Украины, что диктует необходимость разработки методов оценки долговечности оболочки ТВЭЛ при многократных циклических изменениях мощности РУ ВВЭР-1000.

В статье, развивающей метод, предложенный в [1], предлагается анализ чувствительности оценки долговечности оболочки ТВЭЛ ВВЭР-1000, работающего в режиме переменных нагрузок, к неопределенности в задании основных режимных и конструктивных параметров активной зоны (АКЗ) реактора. В качестве инструмента для анализа поведения топлива в области глубоких выгораний используется программный код FEMAXI-5 [2] (далее — код). Код разработан для анализа поведения различных видов топлива в нормальной эксплуатации (аварийные условия не учитываются) при выгораниях до уровней, превышающих 40—50 МВт·сут/кг U. С его помощью определяется реакция, в том числе в виде испускания газообразных продуктов деления (г/о ПД), одиночного топливного стержневого элемента (ТВЭЛ) на комбинированное воздействие, которому подвергается ТВЭЛ, для заданной истории уровней мощности, параметров теплоносителя, конструктивных характеристик ТВЭЛ.

В данной работе анализируется поведение ТВЭЛ ТВС типа ТВС-А. Согласно модели, заложенной в код, длина ТВЭЛ делится на 10 аксиальных сегментов, для центральной точки каждого из которых задается свое значение линейного удельного теплового потока, пропорциональное текущему уровню мощности РУ. Линейный удельный тепловой поток в других точках аксиальных сегментов находится путем экстраполяции значений, заданных для центральных точек.

Используя одномерную радиальную геометрию, в ходе термического анализа предсказывается распределение температуры в ТВЭЛ (с разницей между численным и аналитическим решениями не более 0,1 %) на основе учета внутреннего тепловыделения, изменений в теплопроводности таблетки и зазора, изменений в теплообмене между поверхностью и теплоносителем. Выполняется расчет упругости, пластичности, ползучести, механического взаимодействия между таблеткой и оболочкой с помощью метода конечных элементов. Согласно принятой в коде модели испускания г/о ПД рассчитываются диффузия атомов г/о ПД, их накопление в пузырьки, выделение пузырей и, как следствие, рост внутреннего давления в ТВЭЛ.

Поскольку аварийные режимы, приводящие к пластической деформации оболочки ТВЭЛ, не анализируются, для анализа чувствительности оценки долговечности оболочки ТВЭЛ при многократных циклических изменениях мощности РУ можно использовать метод оценки долговечности оболочки, предложенный в [1].

Условие разрушения оболочки ТВЭЛ имеет вид

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0} = 1, \quad (1)$$

где  $\omega(\tau)$  — параметр поврежденности материала оболочки;  $A(\tau)$  — удельная энергия рассеяния, зависящая от времени  $\tau$ , Дж/м<sup>3</sup> [3];  $A_0$  — удельная энергия рассеяния, характерная для начала разрушения материала оболочки и известная либо из эксперимента, либо из расчета.

Результаты расчета удельной энергии рассеяния материала оболочки приводятся ниже для максимально нагруженного аксиального сегмента ТВЭЛ.

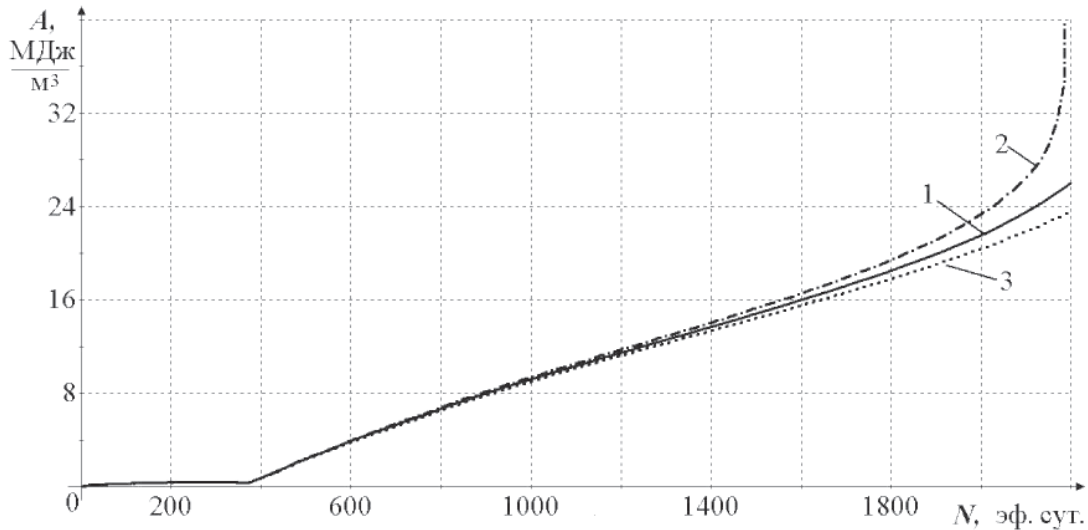


Рис. 1. Зависимость удельной энергии рассеяния  $A(N)$ :

1 —  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о.}} = 0,140$  см (базовый); 2 —  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о.}} = 0,112$  см (-20 %);  
3 —  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о.}} = 0,168$  см (+20 %)

Конструктивные характеристики ТВС-А разработки ОКБМ им. И. И. Африкантова и режимные характеристики АКЗ ВВЭР-1000 задавались в соответствии с [4], за исключением материала оболочки. Это вызвано тем, что ГЕМАХИ-5 присущ такой общий недостаток современных кодов, используемых при анализе поведения топлива, как привязанность к избранным материалам.

В качестве материала топливной таблетки в коде выбрана спеченная двуокись урана; следовательно, если пренебречь различиями между технологиями изготовления топлива, влияющими на свойства топлива, модели физических процессов в топливе, заложенные в код, соответствуют топливу, применяемому в ТВС производства корпорации «ТВЭЛ». Однако в отличие от материала оболочки, применяемого в ТВС-А (циркониевый сплав Э-110), в качестве материала оболочки в коде рассматриваются два типа циркалоя: марки SR (stress relieved) и марки RA (fully annealed). С учетом этого ограничения, присущего коду, выполнялся анализ чувствительности оценки долговечности оболочки твэла, работающего в режиме переменных нагрузок, к неопределенности в задании основных режимных и конструктивных параметров АКЗ реактора, при задании режимных параметров, характерных для реактора ВВЭР-1000, и конструктивных параметров, присущих твэлу ТВС-А.

Зависимости накопленной удельной энергии рассеяния  $A(N)$  материала оболочки от количества эффективных суток  $N$  построены для цикла переменного нагружения РУ (5 сут — 100 % + 75 %, 2 сут — 50 %). По будням — суточный цикл нагружения: в течение 16 ч — работа на 100 % мощности; в течение 1 ч — снижение мощности РУ до 75 %; в течение 6 ч — работа на 75 %; в течение 1 ч — подъем мощности до 100 %. В последний час каждого пятого расчетных суток, вместо подъема мощности до 100 %, в течение 1 ч выполняется снижение мощности РУ до 50 %, затем в течение 47 ч — работа РУ на 50 %. В последний час каждого седьмых расчетных суток выполняется подъем мощности РУ до 100 %.

Отметим, что в настоящее время для указанных режимов нагружения нет ни экспериментальных, ни расчетных данных по удельной энергии рассеяния  $A_0$ , характерной для начала разрушения материала оболочки.

Величина  $A_0$  в данной работе определяется как  $A(\tau)$  в момент потери устойчивости  $\tau_0$  материала оболочки при достижении равенства между эквивалентным напряжением  $\sigma_e^{\text{max}}(\tau)$  для максимально нагруженного аксиального сегмента твэла и пределом текучести  $\sigma_0^{\text{max}}(\tau)$  для точки, расположенной на внутренней поверхности центрального аксиального сегмента и имеющей максимальную температуру:

$$\sigma_e^{\text{max}}(\tau_0) = \sigma_0^{\text{max}}(\tau_0). \quad (2)$$

Способ определения величины  $A_0$  в соответствии с критерием (2) поясняется на рисунках. На рис. 1 показана зависимость удельной энергии рассеяния  $A(N)$  для материала оболочки SR-циркалоем от времени в виде функции от количества эффективных суток  $N$ , для цикла переменного нагружения РУ (5 сут — 100 % + 75 %, 2 сут — 50 %) при трех значениях диаметра центрального отверстия таблетки  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о.}}$ : базовой — в соответствии с [4], увеличенной на 20 % и уменьшенной на 20 %.

На рис. 1 видно, что при уменьшении диаметра центрального отверстия таблетки (остальные режимные параметры АКЗ и конструктивные параметры ТВС при этом фиксированы и задаются в соответствии с [4]) накопленная удельная энергия рассеяния материала оболочки значительно увеличивается в области глубоких выгораний (больших  $N$ ).

На рис. 2 показано достижение условия (2) в момент потери устойчивости материала оболочки  $\tau_0 = 2074$  эф. сут для случая, когда  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о.}}$  уменьшен на 20 % по сравнению с проектным значением. Видно, что условие (2) для случая, когда  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о.}}$  увеличен на 20 % по сравнению с проектным значением, в момент времени  $N = 2074$  эф. сут не выполняется.

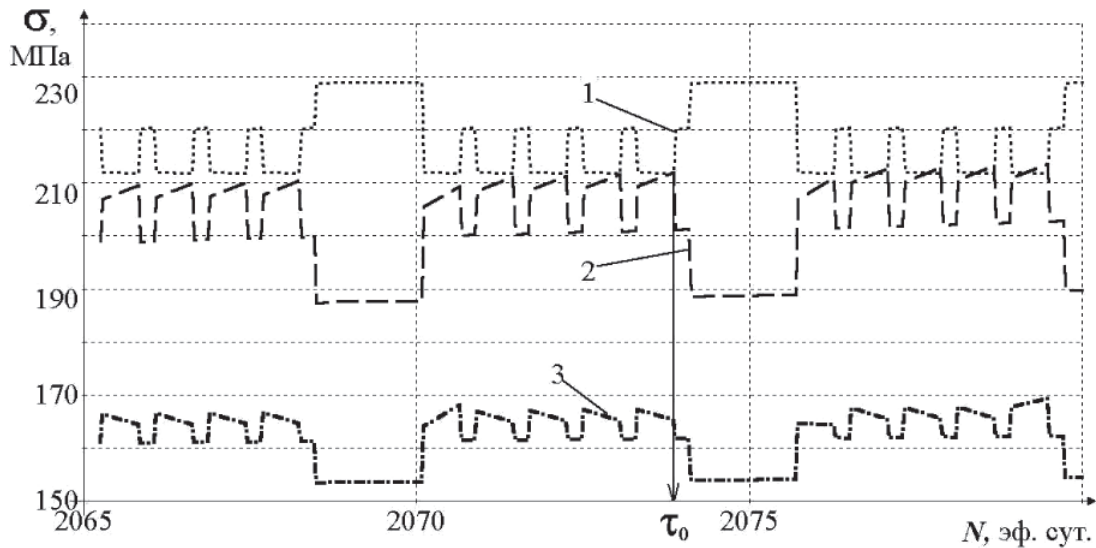


Рис. 2. Определение времени  $\tau_0$  для уменьшенного на 20 %  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о}}$ :  
 1 – предел текучести  $\sigma_0^{\text{max}}(\tau)$ ; 2 – эквивалентное напряжение  $\sigma_e^{\text{max}}(\tau)$  для  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о}} = 0,112$  см (-20 %);  
 3 –  $\sigma_e^{\text{max}}(\tau)$  для  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о}} = 0,168$  см (+20 %)

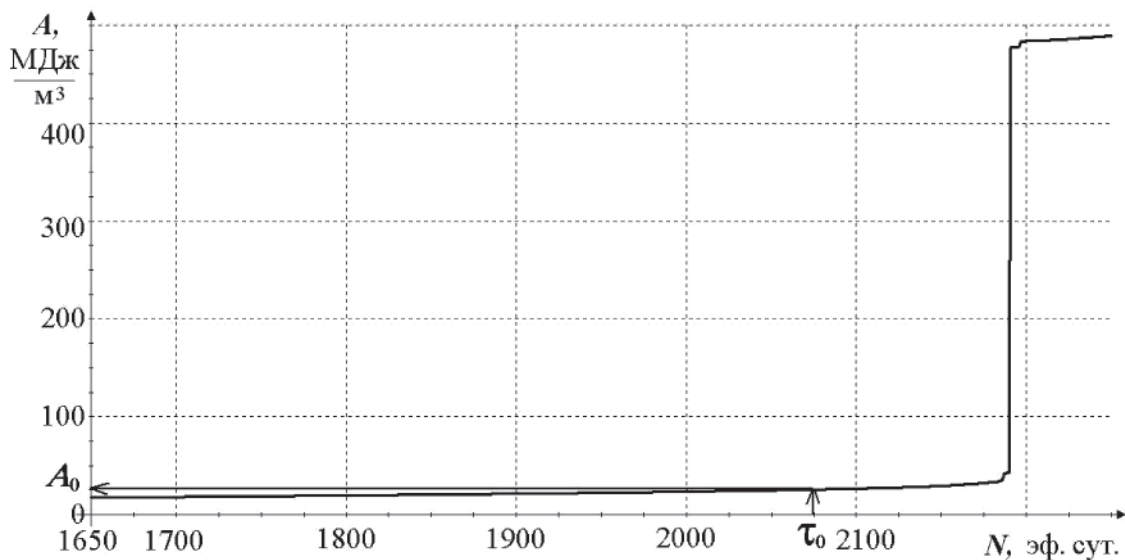


Рис. 3. Определение величины  $A_0$  для уменьшенного на 20 %  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о}}$

Получив для уменьшенной на 20 % величины  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о}}$  значение  $\tau_0 = 2074$  эф. сут, соответствующая величина  $A_0 = 25,5$  МДж/м<sup>3</sup> определяется на основе зависимости  $A(N)$  (рис. 3).

Определив по описанной выше методике характерную для начала разрушения материала оболочки удельную энергию рассеяния  $A_0$ , для конкретного набора режимных параметров АКЗ и конструктивных параметров ТВС (в данном случае  $d_{\text{таб}}^{\text{н.о}}$  уменьшен на 20 %, тогда как остальные параметры проектные) можно с помощью выражения (1) для любого момента времени, после любого количества циклов переменного нагружения определить значение параметра поврежденности материала оболочки  $\omega(\tau)$ .

Целесообразно оценить чувствительность результата оценки долговечности оболочки твэла в режиме переменных

нагрузок к неопределенности в задании основных режимных параметров АКЗ и конструктивных параметров ТВС.

Относительная разница  $\Delta A_i(N)$  между удельной энергией рассеяния  $A_i(N)$  для набора параметров  $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0} + \Delta X_i, \dots, X_{k,0}\}$  и удельной энергией рассеяния  $A_0(N)$  для базового набора параметров  $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0}, \dots, X_{k,0}\}$ , зависящая от количества эффективных суток  $N$  и отклонения  $\Delta X_i$   $i$ -го варьируемого параметра, определяется выражением

$$\Delta A_i(N) = \frac{A_i(N) - A_0(N)}{A_0(N)} \quad (3)$$

В табл. 1–3 приведены значения  $\Delta A_i(N)$  при варьировании  $\Delta X_i$  (остальные параметры при этом фиксированы)

Таблица 1. Относительная разница  $\Delta A_i(N)$ , %, при варьировании параметров 1-й группы

N, эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta(T_{PL} - T_{T/H}) \equiv \Delta X_1, \%$	+20	-0,01	+0,25	-0,03	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,00
	-20	0,00	-0,04	-0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
$\Delta R_{GR} \equiv \Delta X_2, \%$	+20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,03
	-20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12
$\Delta U_{235} \equiv \Delta X_3, \%$	+20	0,25	-1,00	-0,64	-0,53	-0,50	-0,44	-0,41	-0,30	-0,12
	-20	-0,24	1,28	0,63	0,55	0,49	0,43	0,37	0,28	0,11
$\Delta V_{PL} \equiv \Delta X_4, \%$	+20	-0,19	0,12	-0,02	0,03	0,03	0,02	0,00	-0,02	-0,09
	-20	0,19	-0,14	-0,16	-0,06	-0,05	-0,03	0,00	0,02	0,10

Таблица 2. Относительная разница  $\Delta A_i(N)$ , %, при варьировании параметров 2-й группы

N, эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta a \equiv \Delta X_5, \%$	+6	-46,9	-10,2	-11,1	-12,1	-12,5	-12,4	-12,0	-11,3	-8,96
	-6	17,1	8,11	11,5	9,88	10,3	10,8	10,8	10,5	9,36
$\Delta P_{He,0} \equiv \Delta X_6, \%$	+20	-23,8	6,59	5,85	5,11	5,06	5,29	5,34	5,81	7,56
	-20	26,1	-5,42	-4,81	-4,88	-4,66	-4,71	-4,76	-5,05	-6,03
$\Delta He_0 \equiv \Delta X_7, \%$	-20	-6,03	1,00	0,64	0,38	0,36	0,41	0,44	0,67	1,76
$\Delta k_{UO_2} \equiv \Delta X_8, \%$	+3	2,77	-0,69	-0,69	-0,55	-0,48	-0,55	-0,62	-0,81	-1,50
	-3	-3,21	0,99	0,59	0,54	0,45	0,56	0,66	0,97	3,09
$\Delta P_{T/H}^{RX} \equiv \Delta X_9, \%$	+6	19,8	8,53	2,15	1,03	0,53	0,14	-0,12	-0,55	-1,52
	-6	-18,3	-8,20	-1,63	-0,74	-0,21	0,25	0,53	0,99	2,33
$\Delta w_{T/H} \equiv \Delta X_{10}, \%$	+6	-1,49	-19,9	-9,02	-6,58	-5,43	-4,86	-4,44	-4,18	-4,21
	-6	1,61	21,8	9,59	7,18	6,03	5,43	4,97	4,70	4,78
$\Delta \delta \equiv \Delta X_{11}, \%$	+3	-0,68	-11,7	-4,97	-3,52	-2,90	-2,56	-2,34	-2,20	-2,29
	-3	0,84	13,4	5,82	4,44	3,60	3,19	2,90	2,76	2,89
$\Delta d_{таб}^{HO} \equiv \Delta X_{12}, \%$	+20	2,32	-1,39	-1,87	-1,98	-2,13	-2,64	-3,49	-5,42	-10,7
	-20	-2,12	1,82	1,94	2,05	2,33	3,14	4,53	8,46	1681

после непрерывной работы по описанному выше переменному циклу нагружения в течение  $n \times 250$  эф. сут, где  $n = 1, 2, \dots, 9$ .

Выполненные расчеты показали, что основные режимные параметры АКЗ и конструктивные параметры ТВС по степени чувствительности к неопределенности в их задании результата оценки долговечности оболочки твэла в режиме переменных нагрузок могут быть условно разделены на 3 группы.

К 1-й группе относятся параметры, неопределенность в задании которых несущественно влияет на результат оценки долговечности оболочки (табл. 1).

Используя выражение (3) для относительной разницы  $\Delta A_i(N)$  между удельной энергией рассеяния  $A_i(N)$  для набора параметров  $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0} + \Delta X_i, \dots, X_{k,0}\}$  и удельной энергией рассеяния  $A_0(N)$  для базового набора

параметров  $\{X_{1,0}, X_{2,0}, \dots, X_{i,0}, \dots, X_{k,0}\}$ , варьированию разницы температур газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя (т/н)  $\Delta(T_{PL} - T_{T/H}) \equiv \Delta X_1 = +20\%$  соответствует следующая относительная разница между значениями удельной энергии рассеяния  $\Delta A_1(N)$ :  $\Delta A_1(250) = -0,01\%$ ;  $\Delta A_1(500) = +0,25\%$  и так далее (см. табл. 1).

Аналогичным образом, варьированию  $\Delta(T_{PL} - T_{T/H}) \equiv \Delta X_1 = -20\%$  соответствует следующая относительная разница между значениями удельной энергии рассеяния  $\Delta A_1(N)$ :  $\Delta A_1(250) = 0,00\%$ ;  $\Delta A_1(500) = -0,04\%$  и так далее (см. табл. 1).

Например, при  $\Delta V_{PL} \equiv \Delta X_4 = -20\%$  соответствующая относительная разница  $\Delta A_4(1000)$  равна  $-0,06\%$  (см. табл. 1).

Таблица 3. Относительная разница  $\Delta A_i(N)$ , %, при варьировании параметров 3-й группы

N, эф. сут		250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
$\Delta d_{об}^H \equiv \Delta X_{13}$ , %	+1	6,99	-14,4	-7,42	-6,99	-6,33	-5,72	-5,49	-5,81	-8,06
	-1	-48,7	9,04	4,11	2,19	1,55	1,48	1,75	2,57	12,6
$\Delta d_{таб} \equiv \Delta X_{14}$ , %	+1	-34,4	5,67	3,42	1,96	1,25	1,11	1,36	2,06	6,61
	-1	6,55	-7,63	-2,80	-2,85	-2,48	-1,97	-1,87	-2,23	-4,36
$\Delta q_l^{max} \equiv \Delta X_{15}$ , %	+20	192	288	167	136	127	132	326	689	862
	-20	-16,9	-84,0	-81,8	-69,4	-63,6	-61,0	-60,0	-60,5	-63,5
$\Delta T_{т/н}^{вх} \equiv \Delta X_{16}$ , %	+6	147	147	70,8	52,3	44,9	40,6	37,3	35,7	37,7
	-6	-12,7	-84,8	-75,9	-52,8	-43,8	-38,1	-34,3	-31,5	-30,3

Таблица 4. Влияние неопределенности в задании параметров 1-й группы на результат расчета  $\tau_0$  и  $A_0$

Параметр исходных данных	Численное значение параметра исходных данных	$\tau_0$ , эф. сут	$A_0$ , МДж/м <sup>3</sup>
Разница температур газа верхнего компенсационного объема и т/н ( $T_{PL} - T_{т/н}$ ), °C	25 (базовая величина)	2246	27,36
	30 (увеличение на 20 % по сравнению с базовой величиной)	2246	27,36
	20 (уменьшение на 20 % по сравнению с базовой величиной)	2246	27,36
Начальный размер зерна таблетки $R_{GR}$ , мкм	10 (баз.)	2246	27,36
	12 (+20 %)	2247	27,42
	8 (-20 %)	2240	27,20
Обогащение топлива по урану-235	0,044 (баз.)	2246	27,36
	0,053 (+20 %)	2243	27,25
	0,035 (-20 %)	2247	27,46
Верхний компенсационный объем твэла $V_{PL}$ , см <sup>3</sup>	0,21 (баз.)	2246	27,36
	0,25 (+20 %)	2247	27,37
	0,17 (-20 %)	2243	27,31

Таким образом, расчетным путем получена относительная разница  $\Delta A_1(N)$ ,  $\Delta A_2(N)$ ,  $\Delta A_3(N)$ ,  $\Delta A_4(N)$  при варьировании соответственно разницы температур  $\Delta(T_{PL} - T_{т/н}) \equiv \Delta X_1$ , начального размера зерна таблетки  $\Delta R_{GR} \equiv \Delta X_2$ , обогащения топлива по урану-235  $\Delta U_{235} \equiv \Delta X_3$ , величины верхнего компенсационного объема твэла  $\Delta V_{PL} \equiv \Delta X_4$ .

Ко 2-й группе относятся параметры, неопределенность в задании которых слабо влияет на результат оценки долговечности оболочки (табл. 2).

В табл. 2  $a \equiv X_5$  — толщина оболочки;  $P_{He,0} \equiv X_6$  — начальное давление гелия под оболочкой;  $He_0 \equiv X_7$  — начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой;  $k_{UO_2} \equiv X_8$  — коэффициент теоретической плотности дву-

окси урана;  $P_{т/н}^{вх} \equiv X_9$  — давление т/н на входе в реактор;  $w_{т/н} \equiv X_{10}$  — скорость т/н;  $\delta \equiv X_{11}$  — шаг тепловыделяющих элементов;  $d_{таб}^{H,O} \equiv X_{12}$  — диаметр центрального отверстия таблетки.

Следует отметить, что относительная разница  $\Delta A_{12}(2250) = 1681\%$ , соответствующая варьированию диаметра центрального отверстия таблетки  $\Delta d_{таб}^{H,O} \equiv \Delta X_{12} = -20\%$  (см. табл. 2), относится к моменту времени  $\tau \gg \tau_0 = 2074$  эф. сут.

К 3-й группе относятся параметры, неопределенность в задании которых сильно влияет на результат оценки долговечности оболочки (табл. 3).

В табл. 3  $d_{об}^H \equiv X_{13}$  — наружный диаметр оболочки;  $d_{таб} \equiv X_{14}$  — диаметр таблетки;  $q_l^{max} \equiv X_{15}$  — максимальная линейная удельная плотность энерговыделения;  $T_{т/н}^{вх} \equiv X_{16}$  — температура т/н на входе в реактор.

Влияние неопределенности в задании параметров 1-й, 2-й и 3-й групп на расчетные величины момента времени потери устойчивости материала оболочки  $\tau_0$  и соответствующей энергии рассеяния  $A_0$  показано в табл. 4, 5 и 6 соответственно. В табл. 6 также дано сравнение величин  $\tau_0$  и  $A_0$  для двух типов циркалоя: SR и RA [2].

Таким образом, основные режимные параметры АКЗ РУ ВВЭР-1000 и конструкционные параметры ТВС-А условно делятся на 3 группы по степени влияния неопределенности их задания на результат оценки долговечности оболочки твэла при работе РУ в режиме переменных нагрузок.

К группе *несущественно влияющих параметров*, неопределенность задания каждого из которых величиной 20 % приводит к неопределенности оценки времени потери устойчивости  $\tau_0$  не более 0,1 %, относятся: разница между температурами газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя; начальный размер зерна таблетки; обогащение топлива по урану-235; верхний компенсационный объем твэла.

К группе *слабо влияющих параметров*, неопределенность в задании каждого из которых величиной 3 % приводит к неопределенности оценки  $\tau_0$  не более 2 %, относятся: толщина оболочки; начальное давление гелия под оболочкой; начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой; коэффициент теоретической плотности двуокси урана; давление

Таблица 5. Влияние неопределенности в задании параметров 2-й группы на результат расчета  $\tau_0$  и  $A_0$

Параметр исходных данных	Численное значение параметра исходных данных	$\tau_0$ , эф. сут	$A_0$ , МДж/м <sup>3</sup>
Толщина оболочки $a$ , см	0,069 (базовая величина)	2246	27,36
	0,073 (увеличение на 6 % по сравнению с базовой величиной)	2230	24,26
	0,065 (уменьшение на 6 % по сравнению с базовой величиной)	2230	29,44
Начальное давление гелия под оболочкой $P_{\text{He},0}$ , МПа	2,0 (баз.)	2246	27,36
	2,4 (+20 %)	2201	27,80
	1,6 (-20 %)	> 2250	—
Начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой $\text{He}_0$ , %	100 (баз.)	2246	27,36
	80 (-20 %, при этом доля азота 20 %)	2223	27,05
Коэффициент теоретической плотности двуокиси урана $k_{\text{UO}_2}$	0,95 (баз., при этом плотность $\text{UO}_2$ 10,41 г/см <sup>3</sup> )	2246	27,36
	0,92 (-3 %, при этом плотность $\text{UO}_2$ 10,08 г/см <sup>3</sup> )	2206	26,72
	0,98 (+3 %, при этом плотность $\text{UO}_2$ 10,74 г/см <sup>3</sup> )	> 2250	—
Давление т/н на входе в реактор $P_{\text{т/н}}^{\text{вх}}$ , МПа	15,84 (баз.)	2246	27,36
	16,79 (+6 %)	> 2250	—
	14,89 (-6 %)	2218	27,01
Скорость теплоносителя $w_{\text{т/н}}$ , м/с	5,64 (баз.)	2246	27,36
	5,98 (+6%)	> 2250	—
	5,30 (-6%)	2230	28,14
Шаг тепловыделяющих элементов $\delta$ , см	1,275 (баз.)	2246	27,36
	1,313 (+3 %)	> 2250	—
	1,237 (-3 %)	2235	27,81
Диаметр центрального отверстия таблетки $d_{\text{таб}}^{\text{ц.о}}$ , см	0,140 (баз.)	2246	27,36
	0,168 (+20 %)	> 2250	—
	0,112 (-20 %)	2074	25,52
	0,136 (-3 %)	2215	26,98

Таблица 6. Влияние неопределенности в задании параметров 3-й группы на результат расчета  $\tau_0$  и  $A_0$

Параметр исходных данных	Численное значение параметра исходных данных	$\tau_0$ , эф. сут	$A_0$ , МДж/м <sup>3</sup>
Наружный диаметр оболочки $d_{\text{об}}^{\text{н}}$ , см	0,910 (базовая величина)	2246	27,36
	0,919 (увеличение на 1 % по сравнению с базовой величиной)	> 2250	—
	0,901 (уменьшение на 1 % по сравнению с базовой величиной)	2167	26,27
Диаметр таблетки $d_{\text{таб}}$ , см	0,757 (баз.)	2246	27,36
	0,765 (+1 %)	2186	26,58
	0,749 (-1 %)	> 2250	—

Окончание табл. 6

Параметр исходных данных	Численное значение параметра исходных данных	$\tau_0$ , эф. сут	$A_0$ , МДж/м <sup>3</sup>
Максимальная линейная удельная плотность энерговыделения $q_l^{\max}$ , Вт/см (100 % мощности)	248 (баз.), при этом средняя плотность потока быстрых нейтронов $\langle \Phi \rangle = 1 \cdot 10^{14}$ 1/(см <sup>2</sup> ·с)	2246	27,36
	298 (+20 %), $\langle \Phi \rangle = 1,2 \cdot 10^{14}$ 1/(см <sup>2</sup> ·с)	1576	37,69
	198 (-20 %), $\langle \Phi \rangle = 0,8 \cdot 10^{14}$ 1/(см <sup>2</sup> ·с)	> 2250	—
Температура т/н на входе в реактор $T_{т/н}^{\text{вх}}$ , °С	290 (баз.)	2246	27,36
	307 (+6 %)	2136	33,05
	273 (-6 %)	> 2250	—
	299 (+3 %)	2190	30,37
Материал оболочки	SR-циркалой (баз.)	2246	27,36
	РА-циркалой	1447	10,09

теплоносителя на входе в реактор; скорость теплоносителя; шаг тепловыделяющих элементов; диаметр центрального отверстия таблетки.

К группе *сильно влияющих параметров*, неопределенность в задании каждого из которых величиной 3 % приводит к неопределенности оценки  $\tau_0$  более 2 %, относятся: наружный диаметр оболочки твэла; диаметр таблетки; максимальная линейная удельная плотность энерговыделения; температура теплоносителя на входе в реактор.

Выбор материала оболочки сильно влияет на расчетную долговечность оболочки в режиме переменных нагрузок. Однако ввиду привязанности кода FEMAXI-5 к материалу оболочки (циркалой), отличному от применяемого в ТВС РУ типа ВВЭР-1000, для корректной оценки долговечности оболочки с помощью данного кода необходимо выполнить его дополнительную адаптацию.

### Список литературы

1. Максимов М. В., Пелых С. Н. Метод оценки времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок // Ядерная и радиационная безопасность. — 2008. — Вып. 3. — С. 3–6.
2. Motoe Suzuki. Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V (Ver.1). — Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. — 285 p.
3. Соснин О. В., Горев Б. В., Цикитенко А. Ф. Энергетический вариант теории ползучести. — Новосибирск: Ин-т термодинамики СО РАН, 1986. — 95 с.
4. Шмелев В. Д., Драгунов Ю. Г., Денисов В. П. и др. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций. — М.: Академкнига, 2004. — 220 с.

Надійшла до редакції 20.02.2009.