

М. В. Максимов¹, С. Н. Пелых¹,
О. В. Маслов¹, В. Е. Баскаков²

¹Одесский национальный политехнический университет

²Запорожская 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 τ , Дж/м³ [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.

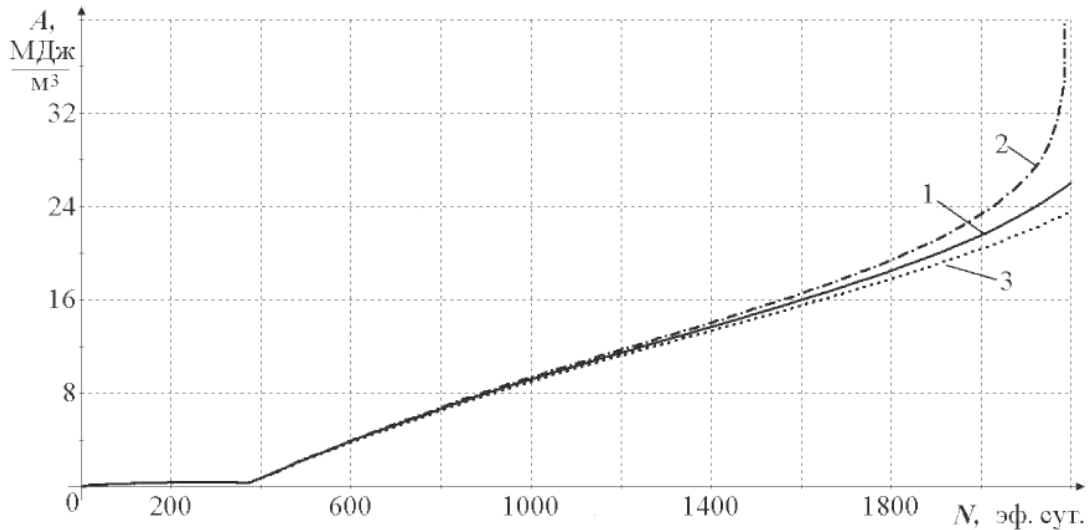


Рис. 1. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$:

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 седьмого 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 τ_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.

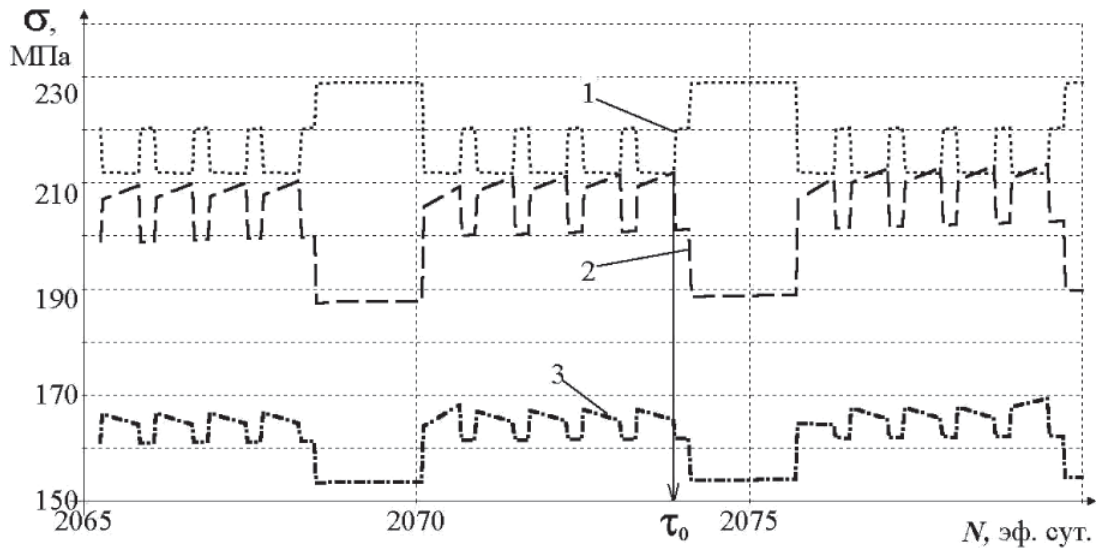


Рис. 2. Определение времени τ_0 для уменьшенного на 20 % $d_{\text{таб}}^{\text{п.о}}$:
 1 – предел текучести $\sigma_0^{\text{max}}(\tau)$; 2 – эквивалентное напряжение $\sigma_e^{\text{max}}(\tau)$ для $d_{\text{таб}}^{\text{п.о}} = 0,112$ см (-20 %);
 3 – $\sigma_e^{\text{max}}(\tau)$ для $d_{\text{таб}}^{\text{п.о}} = 0,168$ см (+20 %)

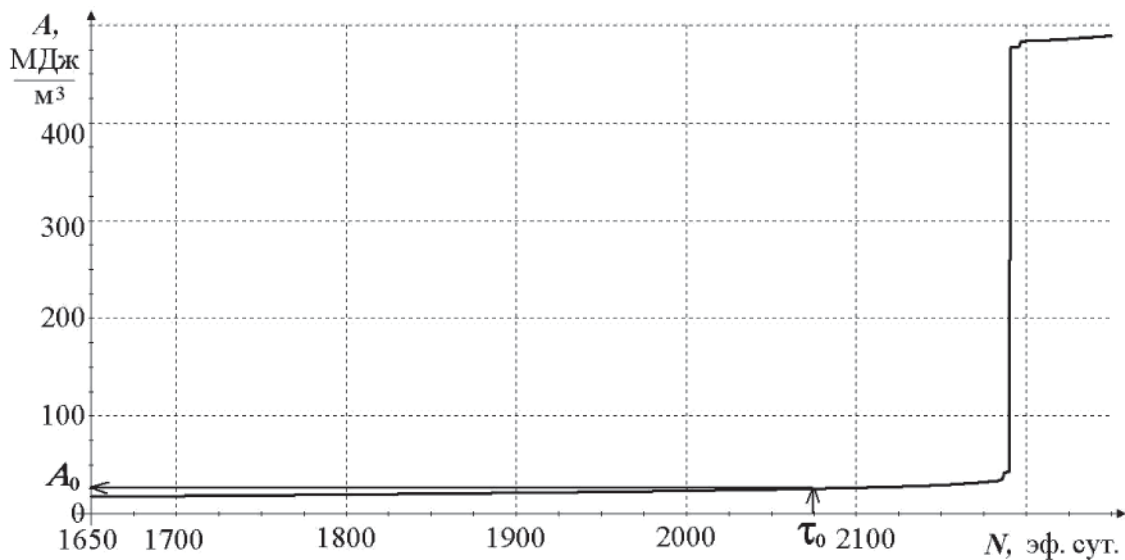


Рис. 3. Определение величины A_0 для уменьшенного на 20 % $d_{\text{таб}}^{\text{п.о}}$

Получив для уменьшенной на 20 % величины $d_{\text{таб}}^{\text{п.о}}$ значение $\tau_0 = 2074$ эф. сут., соответствующая величина $A_0 = 25,5$ МДж/м³ 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 $d_{\text{таб}}^{\text{п.о}}$ 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 ΔX_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 ΔX_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
$\Delta(T_{PL} - T_{ТН}) \equiv \Delta X_1, \%$	+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
$\Delta P_{ТН}^{RX} \equiv \Delta X_9, \%$	+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
$\Delta w_{ТН} \equiv \Delta X_{10}, \%$	+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
$\Delta d_{таб}^{H,0} \equiv \Delta X_{12}, \%$	+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) $\Delta(T_{PL} - T_{ТН}) \equiv \Delta X_1 = +20\%$ 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 $\Delta(T_{PL} - T_{ТН}) \equiv \Delta X_1 = -20\%$ 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 τ_0 и A_0

Параметр исходных данных	Численное значение параметра исходных данных	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
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 ³	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 τ_0 и соответствующей энергии рассеяния A_0 показано в табл. 4, 5 и 6 соответственно. В табл. 6 также дано сравнение величин τ_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 τ_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 τ_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 τ_0 и A_0

Параметр исходных данных	Численное значение параметра исходных данных	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
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 $P_{He,0}$, 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 He_0 , %	100 (баз.)	2246	27,36
	80 (-20 %, при этом доля азота 20 %)	2223	27,05
Коэффициент теоретической плотности двуокиси урана k_{UO_2}	0,95 (баз., при этом плотность UO_2 10,41 г/см ³)	2246	27,36
	0,92 (-3 %, при этом плотность UO_2 10,08 г/см ³)	2206	26,72
	0,98 (+3 %, при этом плотность UO_2 10,74 г/см ³)	> 2250	—
Давление т/н на входе в реактор $P_{т/н}^{вх}$, МПа	15,84 (баз.)	2246	27,36
	16,79 (+6 %)	> 2250	—
	14,89 (-6 %)	2218	27,01
Скорость теплоносителя $w_{т/н}$, м/с	5,64 (баз.)	2246	27,36
	5,98 (+6%)	> 2250	—
	5,30 (-6%)	2230	28,14
Шаг тепловыделяющих элементов δ , см	1,275 (баз.)	2246	27,36
	1,313 (+3 %)	> 2250	—
	1,237 (-3 %)	2235	27,81
Диаметр центрального отверстия таблетки $d_{таб}^{ц.о}$, 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 τ_0 и A_0

Параметр исходных данных	Численное значение параметра исходных данных	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
Наружный диаметр оболочки $d_{об}^н$, 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 $d_{таб}$, 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	τ_0 , эф. сут	A_0 , МДж/м ³
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 ² ·с)	2246	27,36
	298 (+20 %), $\langle \Phi \rangle = 1,2 \cdot 10^{14}$ 1/(см ² ·с)	1576	37,69
	198 (-20 %), $\langle \Phi \rangle = 0,8 \cdot 10^{14}$ 1/(см ² ·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 τ_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.