

М. В. Максимов, С. Н. Пелых

Одесский национальный политехнический университет

Метод оценки времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок

Предлагается метод оценки времени эксплуатации оболочки твэла при работе ядерного реактора в режиме переменных нагрузок. Показано, что время эксплуатации оболочки твэла при работе ядерного реактора в режиме многократных циклических изменений мощности можно оценить путем расчета накопленной энергии необратимых деформаций ползучести материала оболочки.

М. В. Максимов, С. М. Пелих

Метод оцінки часу експлуатації оболонки твела в режимі змінних навантажень

Пропонується метод оцінки часу експлуатації оболонки твела ядерного реактора, що працює в режимі змінних навантажень. Показано, що час експлуатації оболонки твела при роботі реактора в режимі багаторазових циклічних змін потужності можна оцінювати шляхом розрахунку накопленої енергії незворотних деформацій повзучості матеріалу оболонки.

В последнее время повысился интерес к работе отечественных ядерных энергоблоков в переменной части графика электрической нагрузки энергосистемы (в режиме переменных нагрузок), что предполагает многократные циклические изменения мощности ядерного реактора (ЯР) [1].

Как известно, коэффициент использования установленной мощности КИУМ ядерного реактора в течение времени T определяется как

$$\text{КИУМ} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\tau_i \cdot N_i)}{T \cdot N}, \quad (1)$$

где $\Delta\tau_i$ — время работы ЯР на мощности N_i ; T — суммарное время работы ЯР; N — установленная мощность ЯР (100 %).

Рассмотрим в качестве примера четыре режима нагружения ядерного реактора:

1. Стационарная работа ЯР на 100 % мощности. Коэффициент использования установленной мощности, рассчитанный по (1), для данного режима нагружения КИУМ = 1.

2. Режим, при котором ЯР в течение 5 календарных суток работает на 100 % мощности, затем в течение 1 ч переводится на уровень мощности 50 %, далее работает 46 ч на мощности 50 %, после чего возвращается в течение 1 ч на уровень мощности 100 %. Такой режим работы ЯР в дальнейшем будет называться *недельным циклом нагружения* (5 сут — 100 %, 46 ч — 50 %). КИУМ = 0,860 (рис. 1, линия 1).

3. Режим, при котором ЯР в течение 16 ч работает на 100 % мощности, затем в течение 1 ч переводится на уровень мощности 75 %, далее работает 6 ч на мощности 75 %, после чего возвращается в течение 1 ч на уровень мощности 100 %. Такой режим работы ЯР в дальнейшем будет называться *суточным циклом нагружения* (16 ч — 100 %, 6 ч — 75 %). КИУМ = 0,927 (рис. 1, линия 2).

4. Режим, при котором ЯР в будние дни недели работает по суточному циклу (16 ч — 100 %; 6 ч — 75 %), затем в течение последнего часа каждого пятого суток недели его мощность снижается до 50 %. Далее реактор работает 47 ч на 50 % мощности, после чего в течение последнего часа каждого седьмых суток его мощность поднимается до 100 %. Такой режим работы ЯР в дальнейшем будет называться *комбинированным недельным циклом нагружения* (5 сут — 100 % + 75 %; 2 сут — 50 %). КИУМ = 0,805.

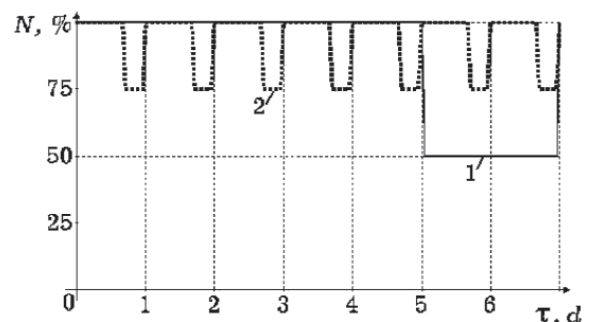


Рис. 1. Циклы нагружения:

1 — недельный (5 сут — 100 %, 46 ч — 50 %);

2 — суточный (16 ч — 100 %, 6 ч — 75 %)

Эксплуатация твэла ЯР характеризуется длительным воздействием высоких уровней температурно-силового нагружения, обуславливающих развитие неконтролируемых процессов ползучести конструкционного материала оболочки твэла, которые в определенный момент времени приводят к ее разрушению с выходом продуктов деления в контур в количествах, превышающих как эксплуатационные пределы, так и пределы безопасной эксплуатации. В связи с этим оценка времени целостности оболочки твэла, в заданных критериях, в режиме переменных нагрузок ЯР становится одной из ключевых задач при проектировании топливных элементов и анализе эксплуатационной надежности активной зоны.

Сложность ее практического решения заключается в том, что физическая реализация эксперимента по изучению ползучести материала оболочки на модели твэла в условиях, соответствующих эксплуатационным режимам переменных нагрузок, затруднительна или невозможна, поскольку продолжительность таких испытаний может составлять несколько лет. Кроме того, некорректно при оценке времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок переносить экспериментальные данные по ползучести материала оболочки в условиях стационарных и аварийных режимов на оболочку твэла, работающего в режиме переменных нагрузок, поскольку необходимо учитывать всю историю нагружения материала оболочки.

В данной работе не анализируются аварийные режимы, приводящие к пластической деформации оболочки твэла, поэтому пластическое течение, возникающее за счет снижения предела текучести при аварийном повышении температуры оболочки, не рассматривается.

Таким образом, для оценки времени эксплуатации оболочки твэла при многократных циклических изменениях мощности ЯР достаточно ограничиться вычислением работы, накопленной в процессе ползучести к моменту разрушения и затраченной на разрушение конструкционного материала [2]. Работа, затраченная на разрушение конструкционного материала, в энергетическом варианте теории ползучести [3] называется удельной энергией рассеяния $A(\tau)$.

Предлагаемый метод анализа времени эксплуатации оболочки твэла при работе ЯР в режиме переменных нагрузок основан на некоторых допущениях энергетического варианта теории ползучести: процессы ползучести и разрушения протекают совместно и влияют друг на друга; интенсивность процесса ползучести в любой момент времени τ оценивается удельной мощностью рассеяния $W(\tau)$, а интенсивность повреждения — накопленной за время τ удельной энергией рассеяния $A(\tau)$:

$$A(\tau) = \int_0^{\tau} W(\tau) \cdot d\tau. \quad (2)$$

Введем параметр поврежденности материала оболочки $\omega(\tau)$:

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0}, \quad (3)$$

где A_0 — удельная энергия рассеяния, характерная для начала разрушения материала оболочки и известная для данного материала либо из эксперимента, либо из расчета, Дж/м³; $\omega = 0$ — для неповрежденного материала, $\omega = 1$ — для поврежденного материала.

Входящая в (2) удельная мощность рассеяния $W(\tau)$ определяется из выражения [3]

$$W(\tau) = \sigma_e \cdot \dot{p}_e, \quad (4)$$

где σ_e — эквивалентное напряжение, Па; \dot{p}_e — скорость эквивалентной деформации ползучести, с⁻¹.

Из (2) — (4) следует условие разрушения оболочки твэла:

$$\Phi(\Phi) = \int_0^{\tau} \frac{y_e \cdot \dot{p}_e}{A_0} d\Phi = 1.$$

Эквивалентное напряжение σ_e и скорость эквивалентной деформации ползучести \dot{p}_e рассчитываются методом конечных элементов по модели, заложенной в программный код FEMAXI [4], предсказывающий изменения в термическом, механическом и химическом состоянии компонентов отдельного твэла, а также характеристики взаимодействия компонентов твэла для заданной истории уровней мощности и параметров теплоносителя реактора типа водородного энергетического реактора (ВВЭР).

Математическая модель, заложенная в код, применима для анализа поведения твэла ЯР типа ВВЭР в области глубоких выгораний (свыше 40...50 МВт · сут/кг U) не только в стационарных условиях, но и в переходных процессах, характерных для работы ЯР в режиме переменных нагрузок.

Расчет температуры топлива выполнялся с разницей между численным и аналитическим решениями не более 0,1 %.

Амплитуда численной ошибки, возникающей в виде остатка от итеративного расчета ползучести на каждом шаге по времени, не оценивалась ввиду того, что в большинстве случаев эта погрешность перекрывается другими неопределенностями, в первую очередь погрешностью модели теплопроводности [4].

На рис. 2 представлена зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$, МДж/м³, циркалоевой оболочки твэла ЯР типа ВВЭР (циркалой — разгруженный по напряжениям) от числа суточных циклов нагружения N для суточного цикла нагружения 16 ч — 100 %, 6 ч — $k \cdot 100$ %; $k = 1; 0,75; 0,5; 0,25$.

В общем случае явление ползучести проявляется в виде трех характерных стадий: неустановившейся, установившейся и ускоренной ползучести (последняя стадия — стадия преразрушения) [2].

Границы характерных стадий ползучести для кривых 1 — 4 приведены в табл. 1.

Рассчитав по (1) КИУМ, можно определить число суточных циклов нагружения $N_{e,0}$ до начала стадии ускоренного роста ползучести в пересчете на эффективные сутки:

Таблица 1. Характерные стадии ползучести

Кривая	Стадия ползучести циркалоевой оболочки		
	Неустановившаяся ползучесть	Установившаяся ползучесть	Ускоренная ползучесть
1 — 100 %	$A_1(0) \dots A_1(100)$	$A_1(100) \dots A_1(702)$	$A_1(702) \dots A_1(1200)$
2 — 75 %	$A_2(0) \dots A_2(100)$	$A_2(100) \dots A_2(760)$	$A_2(760) \dots A_2(1200)$
3 — 50 %	$A_3(0) \dots A_3(100)$	$A_3(100) \dots A_3(820)$	$A_3(820) \dots A_3(1200)$
4 — 25 %	$A_4(0) \dots A_4(100)$	$A_4(100) \dots A_4(860)$	$A_4(860) \dots A_4(1200)$

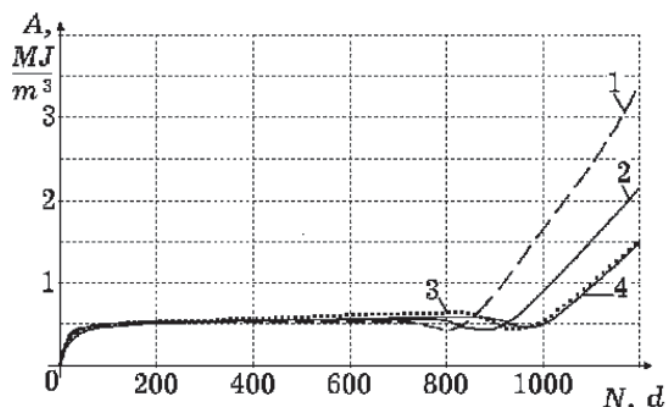


Рис. 2. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ от числа суточных циклов нагружения N :
 1 — стационарная работа на 100 % мощности;
 2 — суточный цикл 16 ч — 100 %; 6 ч — 75 %;
 3 — суточный цикл 16 ч — 100 %; 6 ч — 50 %;
 4 — суточный цикл 16 ч — 100 %; 6 ч — 25 %

$$N_{e,0} = N_0 \cdot \text{КИУМ}, \quad (5)$$

где N_0 — число календарных суточных циклов нагружения до начала стадии ускоренного роста ползучести.

Эквивалентная деформация ползучести p_e циркалоевой оболочки для всех режимов суточного цикла нагружения, показанных на рис. 2, постепенно увеличивается с течением времени, причем на последней стадии ползучести наблюдается характерное гистерезисное снижение p_e , после чего наступает быстрый рост p_e с достижением недопустимо больших значений с точки зрения надежности твэла (табл. 2).

Коэффициент использования установленной мощности КИУМ, накопленная удельная энергия рассеяния перед наступлением стадии ускоренной ползучести A_0 , числа N_0 и $N_{e,0}$ для кривых 1 — 4 приведены также в табл. 2.

На основании данных, приведенных в табл. 2, можно сделать качественные выводы: время эксплуатации оболочки, выраженное в эффективных сутках, при работе по суточному циклу 16 ч — 100 %, 6 ч — 75 % несколько продлевается (кривая 2), вместе с тем время эксплуатации оболочки при работе по циклу нагружения 16 ч — 100 %, 6 ч — 25 % значительно уменьшается (кривая 4) по сравнению со стационарной работой ЯР на 100 % мощности (кривая 1).

Получено, что для случая работы ЯР по суточному циклу нагружения увеличение числа точек истории нагружения от 4 до 8 в сутки изменяет расчетное время эксплуатации до начала стадии ускоренного роста ползучести не более чем на 0,5 %. Следовательно, при работе ЯР по суточному

Таблица 2. Характеристики суточных циклов нагружения

Кривая	p_e , % (1200 сут. циклов)	КИУМ	A_0 , МДж/м ³	N_0 , сут	$N_{e,0}$, эф. сут
1 (100 %)	6,75	1	0,522	702	702
2 (75 %)	4,56	0,93	0,559	760	704
3 (50 %)	3,25	0,85	0,639	820	700
4 (25 %)	2,84	0,78	0,585	860	672

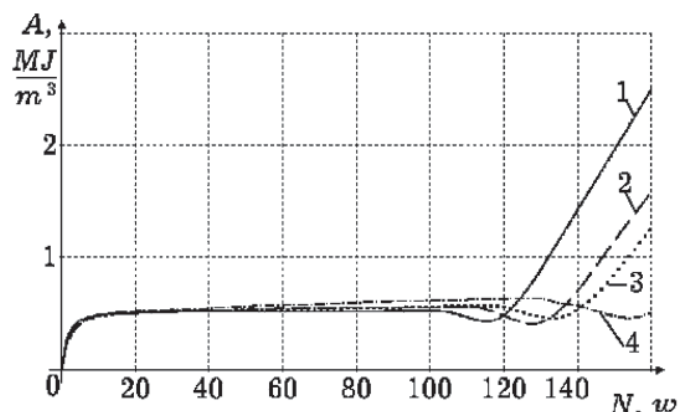


Рис. 3. Зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ от числа недельных циклов нагружения N :
 1 — стационарная работа на 100 % мощности;
 2 — суточный цикл 16 ч — 100 %, 6 ч — 75 %;
 3 — недельный цикл 5 сут — 100 %, 2 сут — 50 %;
 4 — комбинированный цикл 5 сут — 100 % + 75 %, 2 сут — 50 %

циклу нагружения задание 8 точек истории нагружения в сутки позволяет рассчитать время эксплуатации оболочки с достаточной точностью. Аналогичным образом, при работе ЯР по недельному циклу нагружения достаточно задать 56 точек истории нагружения в неделю.

Путем построения графических зависимостей, аналогичных приведенным на рис. 2, используя выражение (5), получено, что время эксплуатации оболочки при работе по недельному циклу 5 сут — 100 %, 2 сут — 50 % несколько продлевается, тогда как время эксплуатации оболочки при работе по недельному циклу 5 сут — 100 %, 2 сут — 25 % значительно уменьшается по сравнению со стационарной работой ЯР на 100 % мощности.

Построена зависимость удельной энергии рассеяния $A(N)$ циркалоевой оболочки твэла ЯР типа ВВЭР от числа недельных циклов нагружения N для случаев: стационарная работа ЯР на 100 % мощности; работа по суточному циклу 16 ч — 100 %, 6 ч — 75 %; работа по недельному циклу 5 сут — 100 %, 2 сут — 50 %; работа по комбинированному недельному циклу 5 сут — 100 % + 75 %, 2 сут — 50 % (рис. 3).

С использованием (5) сделан вывод, что при работе ЯР по вышеуказанному комбинированному недельному циклу нагружения время эксплуатации оболочки максимально и равно 102,3 эффективного недельного цикла, тогда как время эксплуатации оболочки при стационарной работе ЯР на 100 % мощности минимально и равно 100,0 эффективным недельным циклам (табл. 3).

Отмеченное выше гистерезисное снижение эквивалентной деформации ползучести p_e циркалоевой оболочки в начале стадии ускоренного роста ползучести иллюстрируется зависимостями p_e и σ_e от числа недельных циклов нагружения в пересчете на эффективные сутки N_e для случаев стационарной работы на 100 % мощности и для комбинированного цикла 5 сут — 100 % + 75 %, 2 сут — 50 % (рис. 4).

Можно заключить, что в начале стадии ускоренного роста ползучести тенденция падения σ_e сменяется тенденцией роста, при этом временно уменьшается p_e , что означает наличие гистерезиса, при котором эквивалентная деформация ползучести $p_e(N_e)$ отстает от эквивалентного напряжения $\sigma_e(N_e)$ по фазе (рис. 5).

Накопленная удельная энергия рассеяния $A(N)$ циркалоевой оболочки твэла ЯР типа ВВЭР, работающего в пе-

Таблица 3. Время эксплуатации оболочки твэла в зависимости от режима нагружения ЯР

Параметр	Режим нагружения ЯР			
	Стац. работа ЯР на 100 % мощности	Нед. цикл (5 сут — 100 %, 46 ч — 50 %)	Сут. цикл (16 ч — 100 %, 6 ч — 75 %)	Комб. цикл (5 сут — 100 % + 75 %, 2 сут — 50 %)
КИУМ	1	0,860	0,927	0,805
N_0 , нед. циклов	100,0	117,0	109,9	127,1
$N_{e,0}$, эф. нед. циклов	100,0	100,6	101,9	102,3

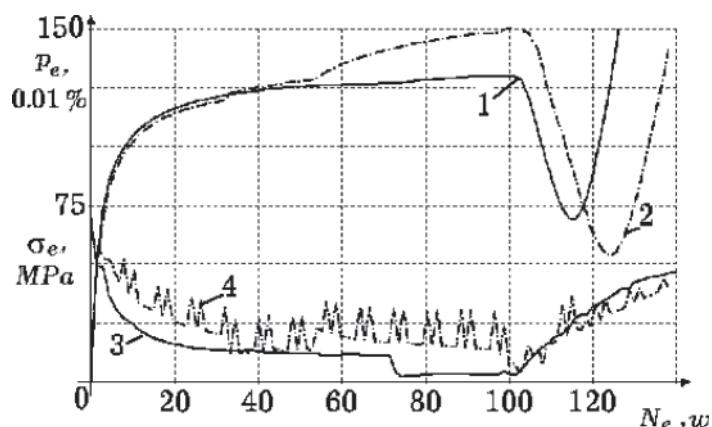


Рис. 4. Зависимость эквивалентной деформации ползучести p_e и эквивалентного напряжения σ_e от числа эффективных недельных циклов нагружения N_e :

- 1 — $p_e(N_e)$, работа на 100 % мощности;
- 2 — $p_e(N_e)$ для комбинированного цикла;
- 3 — $\sigma_e(N_e)$, работа на 100 % мощности;
- 4 — $\sigma_e(N_e)$ для комбинированного цикла

ременном режиме нагружения, зависит от ряда режимных характеристик ЯР. Например, для недельного цикла нагружения 5 сут — 100 %, 46 ч — 50 % с уменьшением среднего по длине твэла линейного теплового потока $\langle q_l \rangle$ остальные режимные характеристики при этом не меняются, время наступления стадии ускоренного роста ползучести материала оболочки значительно сдвигается вправо по шкале числа недельных циклов нагружения (рис. 6).

Для оценки времени эксплуатации оболочки твэла конкретного ЯР необходимо в качестве исходных данных задать конструкционные и режимные характеристики данного ЯР, после чего, используя предлагаемый подход, можно составить режимные карты, на которых будут нанесены значения параметра поврежденности $\omega(\tau)$ материала оболочки твэла для характерных историй нагружения при работе ЯР в переменной части нагрузки энергосистемы.

Предлагаемый метод анализа времени эксплуатации оболочки твэла при работе ЯР в режиме переменных нагрузок может оказаться незаменимым ввиду затруднитель-

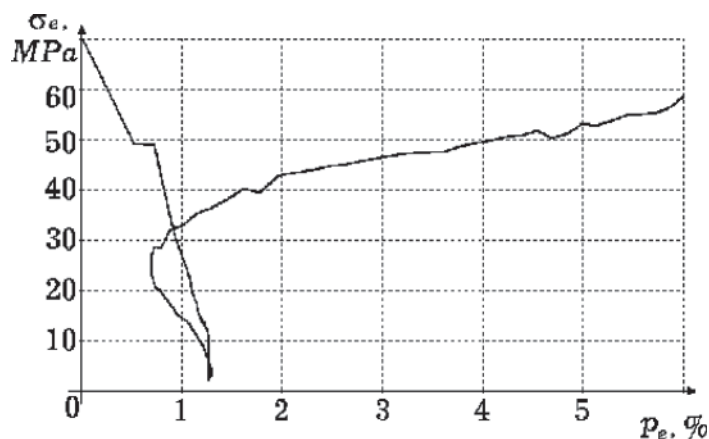


Рис. 5. Зависимость эквивалентного напряжения от эквивалентной деформации ползучести $\sigma_e(p_e)$, стационарная работа ЯР на 100 % мощности

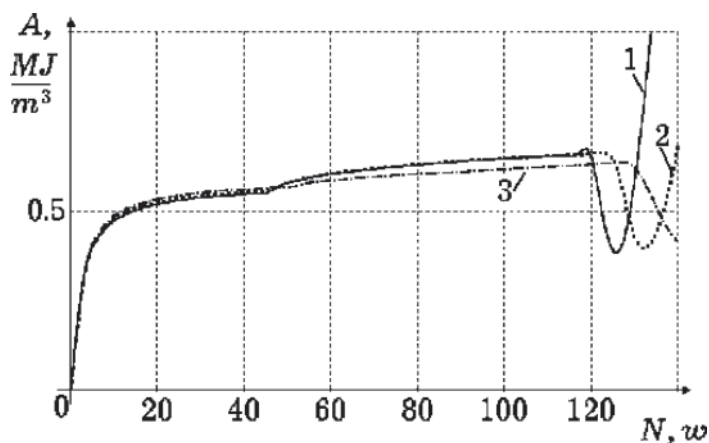


Рис. 6. Зависимость удельной энергии рассеяния от среднего по длине твэла линейного теплового потока $\langle q_l \rangle$:
1 — $\langle q_l \rangle = 180$ Вт/см; 2 — $\langle q_l \rangle = 175$ Вт/см; 3 — $\langle q_l \rangle = 170$ Вт/см

ности получения аналогичных выводов путем точного аналитического решения задачи о ползучести материала оболочки и путем эксперимента.

Литература

1. Максимов М. В., Маслов О. В., Фридман Н. А. Определе-ние критерия эффективности эксплуатации АЭС с ВВЭР в переменной части графика электрической нагрузки // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2001. — Вып. 2 (14). — С. 78 — 80.
2. Немировский Ю. В. Об оценке времени безопасной эксплуатации конструкций и сооружений // Тр. междунар. конференции RDAMM-2001. — Новосибирск, 2001. — Т. 6. — С. 328 — 333.
3. Соснин О. В., Горев Б. В., Никитенко А. Ф. Энергетический вариант теории ползучести. — Новосибирск: Ин-т термодинамики СО РАН, 1986. — 95 с.
4. Motoe Suzuki. Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V (Ver.1). — Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. — 285 p.