

## МЕТОДИКА СРАВНЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ, РАБОТАЮЩИХ В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ

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

*Одесский национальный политехнический университет, Одесса, Украина,  
E-mail: asa@w510.tm.odessa.ua, тел. +38(048)784-38-37*

Предлагается методика сравнения долговечности оболочек твэлов для различных вариантов топливной загрузки реактора ВВЭР-1000, работающего в режиме переменных нагрузок. Показано, что сравнение долговечности оболочек твэлов для разных вариантов топливной загрузки при работе реактора в режиме многократных циклических изменений мощности возможно осуществлять путем расчета накопленной энергии необратимых деформаций ползучести материала оболочки.

В рамках Международного проекта UNFQP в 2009 году ожидается поставка на Южноукраинскую АЭС очередной партии кассет ТВС-W производства корпорации "Westinghouse". С другой стороны, традиционно в РУ ВВЭР-1000 проекта В-320 НАЭК "Энергоатом" эксплуатируются тепловыделяющие сборки (ТВС) производства корпорации ТВЭЛ.

Поскольку национальная стратегия развития ядерной отрасли предполагает диверсификацию поставок ядерного топлива для АЭС Украины, актуальной проблемой является сравнение эффективности различных вариантов топливной загрузки активной зоны (АЗ) реактора ВВЭР-1000.

В данной работе предлагается методика сравнения долговечности оболочек твэлов в режиме переменных нагрузок для различных вариантов топливной загрузки РУ ВВЭР-1000.

Несмотря на то, что производители ТВС, ведущие конкурентную борьбу за украинский рынок ядерного топлива, предоставляют обоснование надежности и безопасности эксплуатации своих ТВС в различных режимах [1], важно иметь независимую, альтернативную методику определения того, какой тип ТВС будет ограничивать ресурс АЗ в случае смешанной (состоящей из нескольких типов ТВС) топливной загрузки при работе РУ не только в базовом, но и в переменном режимах.

В качестве инструмента для анализа поведения топлива в области глубоких выгораний в данной работе 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 вплоть 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 (твэла) на комбинированное воздействие, которому подвергается твэл, для заданной истории уровней мощности, параметров теплоносителя, конструктивных характеристик твэла.

Согласно модели, заложенной в код, длина твэла делится на 10 аксиальных сегментов, для центральной точки каждого из которых задается своя величина линейного удельного теплового

потока, пропорциональная текущему уровню мощности РУ. Линейный удельный тепловой поток в других точках аксиальных сегментов находится путем экстраполяции значений, заданных для центральных точек.

Результаты расчетов выгорания топлива, а также эквивалентной деформации ползучести и удельной энергии рассеяния материала оболочки будут приводиться ниже для пятого, максимально нагруженного аксиального сегмента твэла.

Используя одномерную радиальную геометрию, в ходе термического анализа предсказывается распределение температуры в твэле (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. Также 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 накапливание в пузыри, выделение пузырей и, как следствие, рост внутреннего давления в твэле.

FEMAXI-5 присущи некоторые общие недостатки, характерные для современных кодов, используемых при анализе поведения топлива, а именно:

- в моделях используются эмпирические корреляции, ненадежные экстраполяции;
- модели привязаны к избранным материалам;
- нет оценки неопределенности результатов расчета.

В качестве материала топливной таблетки в коде выбрана двуокись урана, следовательно, если пренебречь различиями между технологиями изготовления топлива, влияющими на его свойства, модели физических процессов в топливе, заложенные в код, соответствуют топливу, применяемому как в ТВС производства корпорации "Westinghouse", так и в ТВС производства ТВЭЛ.

Однако в качестве материала оболочки в коде рассматривается циркониевый сплав циркалой, что не соответствует ни материалу, применяемому в

TBC-W (циркониевый сплав ZIRLO), ни материалу, применяемому в УТВС и ТВС-А (циркониевый сплав Э-110).

Таким образом, при использовании кода FEMAXI-5 для оценки долговечности оболочки твэла возникает проблема корректного задания (в качестве исходных данных) свойств материалов топлива и оболочки.

С учетом этого ограничения, присущего коду, в данной работе сравнивали долговечность и эффективность эксплуатации твэлов различных типов ТВС, принимая во внимание только различия в их конструктивной реализации.

В соответствии с [2] задавались следующие константы, а также свойства материалов топливной таблетки и оболочки, зависящие от температуры: коэффициент Пайлинга-Бедворта для оболочки; начальная теоретическая плотность и пористость топлива; константа упругости и коэффициент термического расширения пружины верхней камеры; коэффициент трения между таблеткой и оболочкой; скорость коррозии оболочки; коэффициент теплопроводности таблетки, оболочки, окисной пленки, зазора; профиль плотности энерговыделения таблетки в радиальном направлении; уровень выгорания, при котором начинается и заканчивается миграция трещин в таблетке топлива; испускание г/о ПД; коэффициент диффузии атомов газа в сферической твердой матрице; рост зерна топлива; испускание г/о ПД из-за формирования ободочной области; параметры пластической анизотропии топлива и оболочки; модуль Юнга материала оболочки, топлива, таблетки с трещинами, окисной пленки; предел текучести материала оболочки; удельная теплоемкость топлива, оболочки, окисной пленки; выражения, описывающие горячее прессование, ползучесть, распухание, уплотнение, пластичность топлива; точка плавления таблетки; коэффициент температурного расширения топлива, оболочки, окисной пленки; ползучесть, пластичность, радиационный рост материала оболочки; константы диффузии г/о ПД и встречной диффузии газов He-Xe.

В данной статье 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 РУ достаточно ограничиться вычислением работы, накопленной в процессе ползучести к моменту разрушения и затраченной на разрушение материала оболочки [3].

Работа, затраченная на разрушение материала оболочки твэла, в энергетическом варианте теории ползучести [4] называется удельной энергией рассеяния  $A(\tau)$ . Предлагаемый метод анализа времени эксплуатации оболочки твэла при работе РУ 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  $\tau$  оценивается удельной мощностью рассеяния  $W(\tau)$ , а интенсивность повреждения – накопленной за время  $\tau$  удельной энергией рассеяния  $A(\tau)$ :

$$A(\tau) = \int_0^{\tau} W(\tau) \cdot d\tau \quad (1)$$

Введем в рамках указанного метода параметр поврежденности материала оболочки:

$$\omega(\tau) = \frac{A(\tau)}{A_0} \quad (2)$$

где  $A_0$  - удельная энергия рассеяния, характерная для начала разрушения материала оболочки и известная для данного материала либо из эксперимента, либо из расчета, Дж/м<sup>3</sup>;  $\omega = 0$  - для неповрежденного материала,  $\omega = 1$  - для поврежденного материала.

Входящая в (1) удельная мощность рассеяния  $W(\tau)$  определяется следующим образом [5]:

$$W(\tau) = \sigma_e \cdot \dot{\rho}_e \quad (3)$$

где  $\sigma_e$  — эквивалентное напряжение, Па;  $\dot{\rho}_e$  — скорость эквивалентной деформации ползучести, с<sup>-1</sup> [2].

Из (1)-(3) следует условие разрушения оболочки твэла:

$$\omega(\tau) = \int_0^{\tau} \frac{\sigma_e \cdot \dot{\rho}_e}{A_0} d\tau = 1 \quad (4)$$

Эквивалентное напряжение  $\sigma_e$  и скорость эквивалентной деформации ползучести  $\dot{\rho}_e$  рассчитываются методом конечных элементов по модели, заложенной в программный код FEMAXI-5.

Эквивалентное напряжение  $\sigma_e$  при допущении изотропности материала оболочки для простейшей одномерной модели определяется как

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_\theta - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_\theta)^2]} \quad (5)$$

где  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_r$ ,  $\sigma_z$  — напряжение в направлениях  $\theta$ ,  $r$  и  $z$  соответственно.

Скорость эквивалентной деформации ползучести  $\dot{\rho}_e$  материала оболочки представляется в виде следующей функции от параметров:

$$\dot{\rho}_e = f(\sigma_e, \bar{\varepsilon}^H, T, \Phi, F) \quad (6)$$

где  $\bar{\varepsilon}^H$  - безразмерный параметр упрочнения;  $T$  - температура, К;  $\Phi$  - плотность потока быстрых (>1 МэВ) нейтронов, 1/(м<sup>2</sup>·с);  $F$  - скорость делений, 1/(м<sup>3</sup>·с).

В качестве материала топливных таблеток для всех сравниваемых типов ТВС принималась спеченная двуокись урана, а в качестве материала

оболочки – циркалой марки SR (stress relieved) [2].

Для сравнительного анализа выбраны УТВС (серийная ТВС реактора ВВЭР-1000 проекта В-320), ТВС-А производства ОКБМ им. И.И. Африкантова и ТВС-W фирмы "Westinghouse" [6].

На рис. 1 для трех указанных типов ТВС приведена расчетная зависимость накопленной удельной энергии необратимой деформации ползучести  $A$  материала оболочки от числа эффективных суток  $N$  при работе РУ в базовом режиме нагружения.

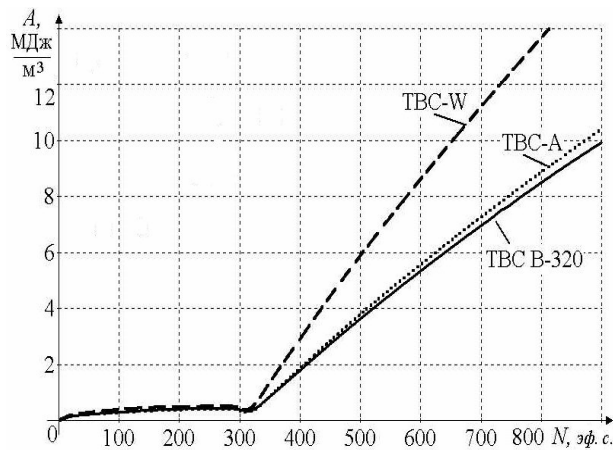


Рис. 1. Изменение накопленной удельной энергии необратимой деформации ползучести  $A$ , МДж/м<sup>3</sup> оболочки для ТВС В-320, ТВС-А, ТВС-В в зависимости от числа эффективных суток  $N$  при непрерывной работе РУ в базовом режиме нагружения (100 %). Максимально нагруженный аксиальный сегмент твэла

На рис. 2 для трех указанных типов ТВС показана расчетная зависимость накопленной удельной энергии необратимой деформации ползучести  $A$  материала оболочки от числа эффективных суток  $N$  при работе РУ в режиме переменного нагружения, условно обозначаемом как комбинированный цикл (5 сут — (100+75) %, 2 сут — 50 %).

В соответствии с данным комбинированным циклом, РУ в течение с первых по четвертые расчетные сутки недели включительно работает по следующему суточному циклу нагружения: в течение первых 16 ч каждых суток – работа РУ на 100 % мощности; затем в течение следующего 1 ч – снижение мощности РУ до 75 %; в течение следующих 6 ч – работа на 75 % мощности; в течение последнего 1 ч суток – подъем мощности РУ до 100 %. В отличие от первых четырех суток недели, в последний час каждых пятых расчетных суток вместо подъема мощности РУ до 100 % выполняется снижение мощности до 50 %, затем в течение следующих 47 ч – работа РУ на 50 %. В последний час каждых седьмых расчетных суток выполняется подъем мощности РУ до 100 %.

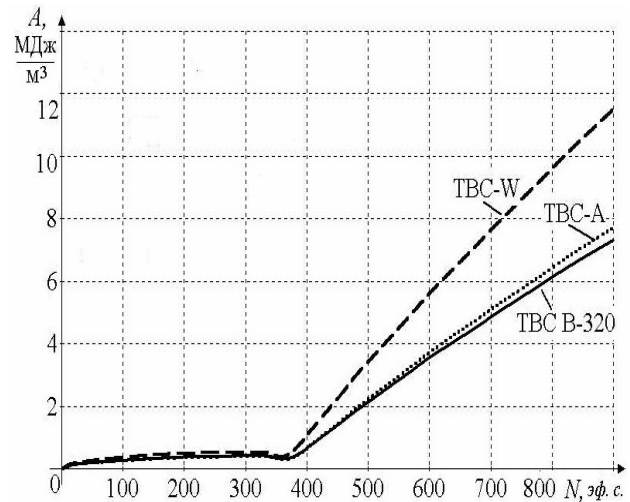


Рис. 2. Изменение накопленной удельной энергии необратимой деформации ползучести  $A$ , МДж/м<sup>3</sup> оболочки для ТВС В-320, ТВС-А, ТВС-В в зависимости от числа эффективных суток  $N$  при непрерывной работе РУ по комбинированному циклу нагружения (5 сут — (100+75) %, 2 сут — 50 %). Максимально нагруженный аксиальный сегмент твэла

Число суточных циклов нагружения  $N_{e,0}$  в пересчете на эффективные сутки определяется как

$$N_{e,0} = N_0 \cdot \text{КИУМ}, \quad (7)$$

где  $N_0$  — число календарных суточных циклов нагружения; КИУМ — коэффициент использования установленной мощности ядерного реактора.

Очевидно, что при работе РУ в базовом режиме КИУМ = 1 и эффективные сутки равны календарным.

Легко показать, что для описанного выше комбинированного цикла нагружения КИУМ = 0,805.

Для трех указанных вариантов ТВС сравнительная оценка долговечности оболочки твэла, работающего в базовом (100 %) и комбинированном (5 сут — (100+75) %, 2 сут — 50 %) режимах нагружения, выполнялась по методике [7].

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

Различающиеся и одинаковые конструктивные характеристики твэлов указанных типов ТВС, задававшиеся в качестве исходных данных при сравнительном анализе долговечности оболочки твэла различных топливных загрузок РУ ВВЭР-1000, приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

В табл. 3 приведены режимные характеристики РУ ВВЭР-1000, принятые в качестве исходных данных при сравнительном анализе долговечности оболочки твэла различных типов ТВС.

Таблица 2

Таб  
Различающиеся конструктивные  
характеристики твэлов УТВС, ТВС-А и ТВС-В

Параметр	ТВС		
	УТВС	ТВС-А	ТВС-В
Наружный диаметр оболочки, см	0,910	0,910	0,914
Внутренний диаметр оболочки, см	0,773	0,773	0,800
Толщина оболочки, см	0,069	0,069	0,057
Диаметр топливной таблетки, см	0,757	0,757	0,784
Диаметр центрального отверстия таблетки, см	0,24	0,14	—
Зазор между таблеткой и оболочкой, см	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$
Наличие впадины у таблетки	Нет	Нет	Впадина на каждой стороне таблетки
Диаметр впадины, см	—	—	0,62
Глубина впадины, см	—	—	0,02
Диаметр эквивалентного проточного канала твэла, см	1,06	1,06	1,05
Общий вес столба топлива в твэле, кг	1,385	1,487	1,554

Одинаковые конструктивные  
характеристики твэлов УТВС, ТВС-А и ТВС-В

Высота таблетки, см	1,18
Шаг тепловыделяющих элементов, см	1,275
Начальное содержание гелия в газовой смеси под оболочкой, %	100
Начальная толщина окисной пленки для каждого аксиального сегмента, мкм	0,1
Максимальное расстояние между двумя краями смежных таблеток, мкм	20
Разница между температурами газа верхнего компенсационного объема и теплоносителя, °С	25
Начальное давление гелия под оболочкой, МПа	2,0
Материал топливной таблетки	Двуокись урана
Плотность двуокиси урана, г/см <sup>3</sup>	10,4
Материал оболочки	SR-циркалой
Количество аксиальных сегментов	10
Длина каждого аксиального сегмента сборки таблеток, см	35,4
Начальный размер зерна таблетки, мкм	10
Обогащение по U-235 (без учета бланкетов с пониженным обогащением в ТВС-В)	0,044
Величина верхнего компенсационного объема, см <sup>3</sup>	0,21
Величина нижнего компенсационного объема, см <sup>3</sup>	0
Форма расположения твэлов в ТВС	Равномерная треугольная

Принятые режимные характеристики РУ ВВЭР-1000

Характеристика	Значение
Закон распределения нейтронного потока по длине твэла	$\Phi(z) = \cos\left[\frac{\pi}{H_3}\left(z - \frac{H}{2}\right)\right]$ ( $0 \leq z \leq H$ ), где $H_3 = H + 2 \cdot \delta_{эф}$ ; $\delta_{эф}$ - величина эффективной добавки (10 см); $H$ - длина твэла
Закон распределения линейного удельного энерговыделения по длине твэла, Вт/см	$q_l(z) = q_{lmax} \cdot \Phi(z)$ , $q_{lmax} = 248$ Вт/см
Коэффициенты относительной мощности для десяти аксиальных элементов	0,231 0,506 0,736 0,902 0,989 0,989 0,902 0,736 0,506 0,231
Температура теплоносителя на входе в реактор, °C	290
Давление теплоносителя на входе в реактор, МПа	15,84
Средняя плотность потока быстрых нейтронов при номинальной (100%) мощности РУ, 1/(см <sup>2</sup> ·с)	$1 \cdot 10^{14}$
Скорость теплоносителя, омывающего твэл, м/с	5,64

Среди трех рассматриваемых вариантов ТВС максимальная величина удельной энергии рассеяния  $A$  при работе как в базовом, так и в переменном режиме нагружения достигается для ТВС-W (см. рис. 1, 2). Ограничиваясь анализом поведения оболочки в течение 900 эффективных суток, для сравнительной оценки долговечности оболочки твэла различных типов ТВС в базовом режиме нагружения в качестве аналога  $A_0$  целесообразно принять величину  $A = A_{W,B}(900) = 16,03$  МДж/м<sup>3</sup>, накопленную после непрерывной работы ТВС-W в базовом режиме нагружения в течение 900 эффективных суток.

В переменном режиме нагружения в качестве

аналога  $A_0$  принимается величина  $A = A_{W,\Pi}(900) = 11,51$  МДж/м<sup>3</sup>, накопленная после непрерывной работы ТВС-W в течение 900 эффективных суток в переменном режиме нагружения.

Используя  $A_{W,B}(900)$  и  $A_{W,\Pi}(900)$ , сравнительную оценку долговечности оболочки твэла различных типов ТВС можно выполнить путем расчета для  $i$ -го типа ТВС величины относительной удельной энергии рассеяния,  $A_{i,B}(900)/A_{W,B}(900)$  — в базовом и  $A_{i,\Pi}(900)/A_{W,\Pi}(900)$  — в переменном режиме нагружения соответственно (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение относительной удельной энергии рассеяния материала оболочки после 900 эффективных суток непрерывной работы для различных типов ТВС. Максимально нагруженный аксиальный сегмент твэла

Режим нагружения	Базовый (100%)			Переменный		
	УТВС	ТВС-А	ТВС-W	УТВС	ТВС-А	ТВС-W
Глубина выгорания ядерного топлива, (МВт·эф. сут)/кг-U	63,83	59,45	56,88	63,95	59,56	57,00
Эквивалентная деформация ползучести оболочки $p_e$ , %	10,06	10,32	12,52	7,648	7,862	9,402
Накопленная удельная энергия рассеяния материала оболочки $A$ , МДж/м <sup>3</sup>	9,933	10,42	16,03	7,313	7,721	11,51
Относительная удельная энергия рассеяния, %	62,0	65,0	100	63,5	67,1	100



## ВЫВОДЫ

1. Предложена методика сравнительного анализа долговечности оболочки твэла, работающего в переменном режиме, для различных типов ТВС топливной загрузки РУ ВВЭР-1000.

2. Поскольку в паспортных данных на ТВС не содержится необходимых сведений по свойствам материалов топлива и оболочки, для корректного расчета долговечности оболочки твэла ТВС различных типов необходимо провести расчеты по предлагаемой методике на основе свойств материалов, предоставляемых разработчиками соответствующих ТВС.

3. Целесообразно требовать от производителей топлива, поставляющих новые типы ТВС для АЭС НАЭК "Энергоатом", предоставления полной информации по свойствам топлива, необходимой для независимого, альтернативного сравнительного анализа долговечности оболочек твэлов, работающих в переменном режиме.

## ЛИТЕРАТУРА

1. О.Б. Самойлов, В.Б. Кайдалов, В.С. Кууль и др. Результаты эксплуатации ТВСА на АЭС с ВВЭР-1000 // *Труды 4-й Международ. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР"*. 2005,

с. 15-19.

2. Motoe Suzuki. *Light Water Reactor Fuel Analysis Code FEMAXI-V (Ver.1)*. Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000, 285 p.

3. Ю.В. Немировский. Об оценке времени безопасной эксплуатации конструкций и сооружений // *Труды Междунар. конф. "RDAMM-2001"*. 2001, № 6, с. 328-333.

4. О.В. Соснин, Б.В. Горев, А.Ф. Никитенко. *Энергетический вариант теории ползучести*. Новосибирск: Ин-т термодинамики СО РАН, 1986, 95 с.

5. В.П. Семишкин. *Расчетно-экспериментальные методы обоснования поведения твэлов и ТВС ВВЭР в аварийных режимах с большой течью из первого контура РУ*: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. М., 2007, 48 с.

6. В.Д. Шмелев, Ю.Г. Драгунов, В.П. Денисов, И.Н. Васильченко. *Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций*. М.: «Академкнига», 2004, 220 с.

7. М.В. Максимов, С.Н. Пельх. Метод оценки времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2008, № 3, с. 3-6.

*Статья поступила в редакцию 12.12.2008 г.*

## МЕТОДИКА ПОРІВНЯННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ОБОЛОНОК ТВЕЛІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В ЗМІННОМУ РЕЖИМІ

*М.В. Максимов, С.М. Пелих, О.В. Маслов, В.Є. Баскаков*

Пропонується методика порівняння довговічності оболонок твелів для різних варіантів паливного завантаження реактора ВВЕР-1000, що працює в режимі змінних навантажень. Показано, що порівняння довговічності оболонок твелів для різних варіантів паливного завантаження при роботі реактора в режимі багаторазових циклічних змін потужності можливо здійснювати шляхом розрахунку накопиченої енергії необоротних деформацій повзучості матеріалу оболонки.

## DURABILITY COMPARISON PROCEDURE FOR FUEL-ELEMENT CLADDINGS WORKING IN VARYING OPERATING MODES

*M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, O.V. Maslov, V.E. Baskakov*

A fuel-element claddings durability comparison methodology for a WWER-1000 plant operating in the variable part of electric loading schedule is proposed. It is shown that fuel-element claddings durability comparison for a WWER-1000 plant operating under multiple cyclic reactor power changes can be done by calculation of the accumulated energy of irreversible cladding material creep deformations.