

# ЭНЕРГЕТИКА

## ТЕПЛОТЕХНИКА

### ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УДК 621.039.548

**М.В. Максимов**, д-р техн. наук, проф.,  
**С.Н. Пельх**, канд. техн. наук,  
Одес. нац. политехн. ун-т,  
**В.Е. Баскаков**, инженер, Запорожская АЭС

## СРАВНЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ВВЭР-1000, РАБОТАЮЩЕГО В ПЕРЕМЕННОМ РЕЖИМЕ

*М.В. Максимов, С.Н. Пельх, В.Е. Баскаков. Порівняння довговічності оболонок твєлів реактора ВВЕР-1000, що працює в змінному режимі.* Виконано порівняння довговічності оболонок твєлів для різних варіантів паливного завантаження реактора ВВЕР-1000, що працює в режимі багаторазових циклічних змін потужності, шляхом розрахунку накопиченої енергії необоротних деформацій повзучості матеріалу оболонок.

*М.В. Максимов, С.Н. Пельх, В.Е. Баскаков. Сравнение долговечности оболочек твэлов реактора ВВЭР-1000, работающего в переменном режиме.* Выполнено сравнение долговечности оболочек твэлов для разных вариантов топливной загрузки реактора ВВЭР-1000, работающего в режиме многократных циклических изменений мощности, путем расчета накопленной энергии необратимых деформаций ползучести материала оболочки.

*M.V. Maksimov, S.N. Pelykh, V.E. Baskakov. A comparison of fuel-element cladding durability for a WWER-1000 reactor operating in the mode of variable loadings.* The fuel-element cladding durability comparison is made for different variants of WWER-1000 reactor fuel loading, when the reactor is operated under multiple cyclic reactor power changes, by calculation of the accumulated energy of irreversible cladding material creep deformations.

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 (АКЗ) реактора ВВЭР-1000.

Важно иметь независимую, альтернативную методику определения того, какой тип ТВС будет ограничивать ресурс АКЗ в случае смешанной (состоящей из нескольких типов ТВС) топливной загрузки при работе РУ не только в базовом, но и в переменном режимах [1].

Сравнительное исследование долговечности оболочек твэлов в режиме переменных нагрузок выполнено для различных вариантов топливной загрузки РУ ВВЭР-1000.

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 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, эквивалентной деформации ползучести и удельной энергии рассеяния материала оболочки будут приводиться далее для пятого, максимально нагруженного аксиального сегмента твэла.

Используя одномерную радиальную геометрию, в ходе термического анализа предсказывается распределение температуры в твэле 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 образование 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; отсутствует оценка 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 циркалой — циркониевый сплав, что не соответствует ни материалу, применяемому в ТВС-*W* (циркониевый сплав ZIRLO), ни материалу, применяемому в УТВС и ТВС-А (циркониевый сплав Э-110). Таким образом, при использовании FEMAXI-5 для оценки долговечности оболочки твэла возникает проблема корректного задания (в качестве исходных данных) свойств материалов оболочки.

С учетом этого ограничения, присущего коду, выполнялось сравнение долговечности и эффективности эксплуатации твэлов различных типов ТВС, принимая во внимание только различия в их конструктивной реализации.

Свойства материалов топливной таблетки и оболочки, зависящие от температуры, задавались в соответствии с [2].

Здесь 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  $A$ , накопленной в процессе ползучести к моменту разрушения и затраченной на разрушение материала оболочки, называемой удельной энергией рассеяния необратимой деформации ползучести [3, 4].

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" [5]. Различающиеся и одинаковые конструктивные характеристики твэлов указанных типов ТВС, задаваемые в качестве исходных данных при сравнительном анализе с помощью FEMAXI-5 долговечности оболочки твэла различных топливных загрузок РУ ВВЭР-1000, приведены соответственно в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

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 впадин 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

Таблица 2

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, мк	0,1
Максимальное расстояние между двумя краями смежных таблеток, мк	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, мк	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

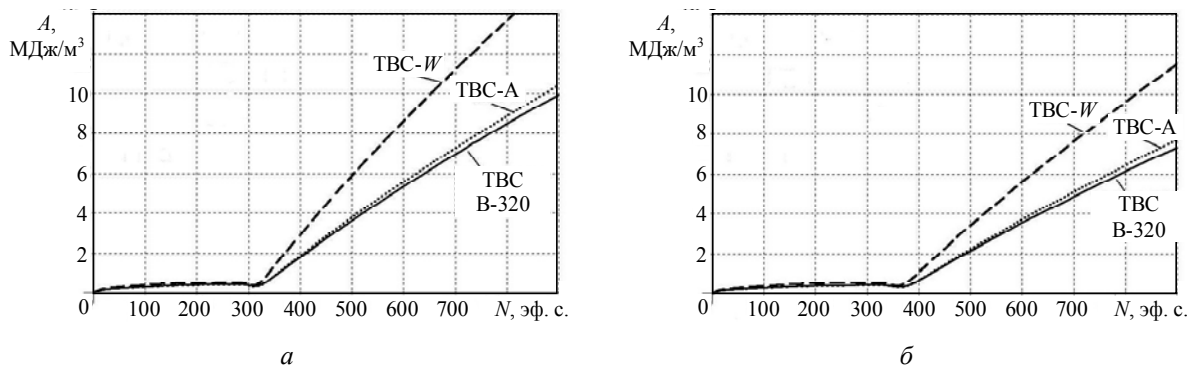
Для трех указанных типов ТВС представлена расчетная зависимость накопленной удельной энергии необратимой деформации ползучести  $A$  (МДж/м<sup>3</sup>) материала оболочки от числа эффективных суток  $N$  при работе РУ в базовом (см. рисунок, *а*) и переменном (см. рисунок, *б*) режимах нагружения.

Приведенные на рисунке *б* зависимости  $A(N)$  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 %; 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 %.

Долговечность оболочки твэла, работающего в базовом (100 %) и переменном режиме нагружения (5 сут. — (100 %+75 %), 2 сут. — 50 %), сравнивается для трех указанных вариантов ТВС по методике [4].

Отметим, что в настоящее время для указанных режимов нагружения отсутствуют экспериментальные и расчетные данные по величине удельной энергии рассеяния  $A_0$  [4], характерной для начала разрушения материала оболочки.



*Изменение накопленной удельной энергии необратимой деформации ползучести  $A$  оболочки для ТВС В-320, ТВС-А, ТВС-И в зависимости от числа эффективных суток  $N$  при непрерывной работе РУ в базовом (а) и переменном (б) режимах нагружения*

Среди трех рассматриваемых вариантов ТВС максимальная величина удельной энергии рассеяния при работе как в базовом, так и в переменном режиме нагружения достигается для ТВС-И (см. рисунок).

Поэтому для сравнительной оценки долговечности оболочек различных типов ТВС в базовом режиме нагружения в качестве аналога величины удельной энергии рассеяния  $A_0$ , характерной для начала разрушения материала оболочки, целесообразно принять величину удельной энергии рассеяния, достигнутую после непрерывной работы ТВС-И в течение 900 эффективных суток в базовом режиме нагружения  $A_6(900)=16,03$  МДж/м<sup>3</sup>.

Аналогичным образом, в переменном режиме нагружения в качестве аналога  $A_0$  принимается величина удельной энергии рассеяния  $A_n(900)=11,51$  МДж/м<sup>3</sup>.

Используя  $A_6(900)$  и  $A_n(900)$ , сравнительную оценку долговечности оболочек различных типов ТВС можно выполнить путем расчета для  $i$ -го типа ТВС величины относительной удельной энергии рассеяния,  $A_i(900)/A_6(900)$  — в базовом и  $A_i(900)/A_n(900)$  — в переменном режиме нагружения, соответственно (табл. 3). Кроме того, для каждого типа ТВС приведены глубина выгорания ядерного топлива, эквивалентная деформация ползучести, накопленная удельная энергия рассеяния материала оболочки после непрерывной работы в течение 900 эффективных суток.

Таблица 3

Сравнение величин относительной удельной энергии рассеяния материала оболочки для различных типов ТВС после 900 эффективных суток непрерывной работы

Режим нагружения Тип ТВС	Базовый (100 %)			Переменный		
	УТВС	ТВС-А	ТВС-В	УТВС	ТВС-А	ТВС-В
Глубина выгорания ядерного топлива, МВт·эф.сут/кг-U	63,83	59,45	56,88	63,95	59,56	57,00
Эквивалентная деформация ползучести материала 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

На основании изложенного можно сделать вывод о том, что путем расчета накопленной энергии необратимых деформаций ползучести материала оболочки возможно сравнивать долговечность оболочек твэлов для различных вариантов топливной загрузки реактора ВВЭР-1000, работающего в режиме многократных циклических изменений мощности.

Задавая циркалой марки SR в качестве материала оболочки твэлов для трех рассмотренных типов ТВС (УТВС, ТВС-А и ТВС-В), получено, что долговечность оболочки ТВС-В наименьшая как в базовом, так и в переменном режиме работы РУ.

#### Литература

1. Самойлов, О.Б. Результаты эксплуатации ТВСА на АЭС с ВВЭР-1000 / О.Б. Самойлов, В.Б. Кайдалов, В.С. Кууль // Тр. 4-й междунар. конф. "Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР". — Подольск, 2005. — С. 15 — 19.
2. Suzuki, M. Light Water Reactor Fuel Analysis Code *FEMAXI-V* (Ver.1) / M Suzuki. — Tokai: Japan Atomic Energy Research Institute, 2000. — 285 p.
3. Соснин, О.В. Энергетический вариант теории ползучести / О.В. Соснин, Б.В. Горев, А.Ф. Никитенко. — Новосибирск: Ин-т термодинамики СО РАН, 1986. — 95 с.
4. Максимов, М.В. Метод оценки времени эксплуатации оболочки твэла в режиме переменных нагрузок / М.В. Максимов, С.Н. Пельх // Ядер. и радиацион. безопасность. — 2008. — Вып. 3. — С. 3 — 6.
5. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / В.Д. Шмелев, Ю.Г. Драгунов, В.П. Денисов и др. — М.: Академкнига, 2004. — 220 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Королев А.В.

Поступила в редакцию 10 февраля 2009 г.