

необходимо получение параметров уравнений их состояния при циклическом нагружении с учетом влияния упрочнения при облучении или гарантированных дозотемпературных зависимостей механических характеристик конструкционных материалов.

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность применения для расчетного анализа циклической прочности конструкций, изготовленных из коррозионно-стойкой аустенитной стали, диаграммы предельных состояний амплитуда напряжения—среднее напряжение, в которой в качестве предельного статического напряжения используется истинное сопротивление разрушению металла в необлученном состоянии. Ограничений применения диаграммы предельных состояний усталости с высокой асимметрией для конструкционных

материалов, подверженных нейтронному облучению, не выявлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коллинз Дж. Повреждение материалов в конструкциях: анализ, предсказание, предотвращение. М.: Мир, 1984.
2. Gillemot L. Simplified method to plot haigh and/or Smith graphs. — Acta Technica, 1965, v. 50, p. 86—90.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002-86. М.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Савельев Л.И. Характеристика предельных циклов в истинных напряжениях. — Вестник машиностроения, 1955, № 2, с. 14—17.
5. Трощенко В.Т., Сосновский Л.А. Сопротивление усталости металлов и сплавов. Киев: Наукова думка, 1987.

Поступила в Редакцию 30.03.12

УДК 621.039.548

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО ТОПЛИВА ВВЭР И ТИПОВОГО PWR В РЕАКТОРЕ HBWR (НОРВЕГИЯ)

Волков Б.Ю., Висенак В. (HRP, Норвегия), Яковлев В.В., Рязанцев Е.П. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва), Панюшкин А.К., Иванов А.В., Крюков О.В. (ОАО «МСЗ», г. Электросталь, Московская обл.), Лавренюк П.И., Пименов Ю.В. (ОАО «ТВЭЛ», г. Москва)

Результаты первого эксперимента по облучению 12 твэлов со стандартным топливом ВВЭР и шести твэлов с топливом PWR показали [1], что внутриреакторные характеристики стандартного топлива ВВЭР почти не отличались от аналогичных характеристик типового топлива PWR, за исключением терморadiационного уплотнения в начальный период облучения. На основании анализа результатов первого эксперимента был проведен второй (IFA-503.2) по исследованию терморadiационной стабильности модифицированного топлива ВВЭР, которое было изготовлено в ОАО «МСЗ» путем варьирования структурно-технологических параметров, направленных на уменьшение терморadiационного уплотнения. Для эксперимента были изготовлены три модифицированных вида топлива с разной исходной микроструктурой, которая характеризовалась размером зерна, распределением пористости и плотностью топливной матрицы. Анализ двух экспериментов позволил дать рекомендации по дальнейшей оптимизации исходных структурно-технологических пара-

метров топлива ВВЭР в целях повышения его радиационной стабильности.

В настоящей статье приведены внутриреакторные параметры трех видов модифицированного топлива ВВЭР и типового PWR, полученные в эксперименте IFA-503.2, которые также сравнивали со стандартным топливом ВВЭР, исследованным в первом эксперименте [1].

Исходные параметры опытных твэлов. В экспериментальную сборку IFA-503.2 были загружены 12 твэлов с тремя видами модифицированного топлива ВВЭР и типовым топливом PWR. Исходные характеристики всех четырех видов топлива, которые обозначены в эксперименте как ВВЭР-0, ВВЭР-1, ВВЭР-2 и PWR, приведены в табл. 1. Для анализа была принята последовательная от 1-й до 12-й в первой сборке IFA-503.1 и от 13-й до 24-й нумерация твэлов в сборке IFA-503.2. Твэлы в опытной сборке были оснащены датчиками внутриреакторного контроля дифференциально-трансформаторного типа (рис. 1). Чувствительным элементом датчи-

Т а б л и ц а 1. Исходные характеристики топлива обогащением 4,4% в сборке IFA-503.2

Параметр	ВВЭР-1	ВВЭР-2	ВВЭР-0	PWR
Средний размер зерна, мкм	11	10	7	9
Плотность топлива, % теоретической	96,1	96,1	96,4	95,1
Спекание:				
температура, °C	1700	1700	1650	1700
время, ч	3	3	1	3
Отношение U/O	2,004	2,002	2,001	2,00
Тест на доспекание				
Уменьшение диаметра, %:				
минимальное	–0,12	–0,20	–0,21	—
максимальное	–0,21	–0,33	–0,34	—
среднее	–0,19	–0,27	–0,28	—
Уменьшение объема, %	–(0,36—0,63)	–(0,6—0,81)	–(0,63—1,02)	—

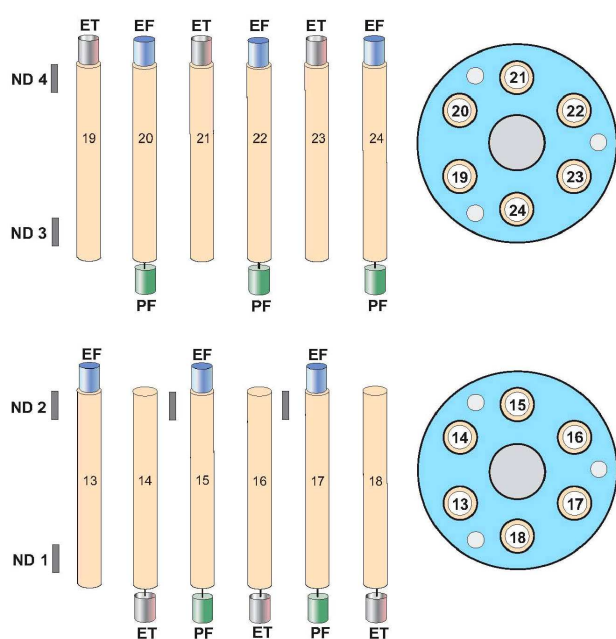
ков являются подвижные сердечники, которые перемещаются внутри электромагнитных катушек, расположенных в экспериментальном канале, и генерируют сигнал в зависимости от изменения или температуры в центре топлива, или длины топливного сердечника, или внутреннего газового давления под оболочками ТВЭлов (табл. 2). Четыре опытных ТВЭла с топливом ВВЭР-1, оснащенных внутриреакторными датчиками, которые предназначены для измерения средней температуры топливного сердечника (в двух ТВЭлах), его удлинения и давления газов (в двух других ТВЭлах), загружены в верхний кластер. Два других ТВЭла с аналогичным видом

топлива загружены в нижний кластер. Линейную тепловую мощность определяли ванадиевыми нейтронными детекторами, размещенными по оси и радиусу сборки. Более подробные данные о конструкции сборки и опытных ТВЭлов приведены в работе [2].

Эксперимент проводили в канале с теплогидравлическими условиями HBWR, активная зона которого охлаждается посредством естественной конвекции тяжелой воды давлением 3—3,4 МПа и при температуре насыщения 235—240 °C. Значительные размеры активной зоны обеспечили сравнительно небольшую неравномерность энерговыделения по высоте сборки, расположенной в центральной части активной зоны.

Результаты измерений. На рис. 2 показана средняя линейная мощность опытных ТВЭлов верхнего (а) и нижнего кластера (б) в течение эффективного времени испытания. К концу эксперимента было достигнуто следующее усредненное выгорание топлива [3, 4], МВт·сут/кг: 43,2 по сборке, 47,6 по нижнему, 38,8 по верхнему кластеру, 48,8 максимальное в нижнем кластере. Необходимо отметить, что за весь период проведения экспериментов с топливом ВВЭР IFA-503.1 и -503.2 большинство датчиков проработало надежно.

Удлинение топливного сердечника. Шесть опытных ТВЭлов были оборудованы датчиками удлинения топлива, три из них с топливом PWR, ВВЭР-1 и ВВЭР-2 располагались в нижнем кластере с более высокими тепловыми нагрузками. Два ТВЭла с топливом ВВЭР-1 располагались в верхнем кластере и имели разные



Р и с. 1. Схема расположения ТВЭлов в опытной сборке IFA-503.2: 13, 14 — ТВЭлы с топливом PWR; 15, 16 — ТВЭлы с топливом ВВЭР-2; 17—22 — ТВЭлы с топливом ВВЭР-1; 23, 24 — ТВЭлы с топливом ВВЭР-0

Таблица 2. Основные параметры твэлов нижнего и верхнего кластера сборки эксперимента IFA-503.1 и -503.2 с обогащением топлива 4,4%, диаметром центрального отверстия 1,8 мм, газом-наполнителем гелием с исходным давлением 0,6 МПа

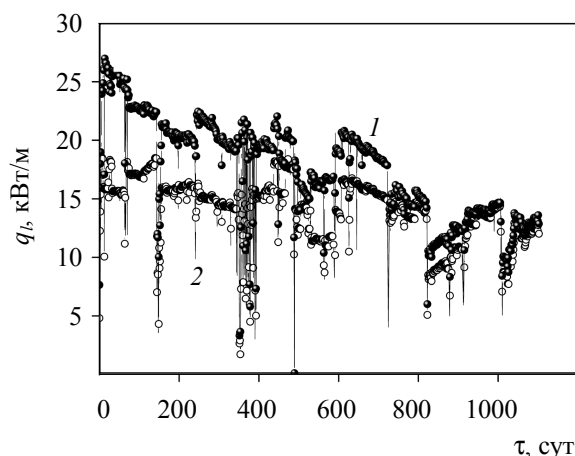
Параметр	Номер твэла											
	13*	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	Нижний кластер						Верхний кластер					
	PWR		ВВЭР-2		ВВЭР-1		ВВЭР-1				ВВЭР-0	
Инструментация	EF	ЕТ	EF/PF	ЕТ	EF/PF	ЕТ	ЕТ	EF/PF	ЕТ	EF/PF	ЕТ	EF/PF
Плотность топлива, г/см ³	10,4	10,4	10,54	10,54	10,54	10,54	10,54	10,54	10,54	10,54	10,57	10,57
Диаметр таблетки, мм	7,54	7,54	7,54	7,54	7,54	7,54	7,54	7,54	7,48	7,48	7,54	7,54
Средний размер зерна, мкм	9	9	10	10	11	11	11	11	11	11	7	7
Отношение О/У	2	2	2,002	2,002	2,004	2,004	2,004	2,004	2,004	2,004	2,001	2,001
Длина топлива, мм	380,2	379,6	380,2	380,6	381	381,7	381,6	382	382,1	382	379,9	379,4
Диаметральный зазор топливо—оболочка, мм	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,27	0,27	0,21	0,21
Свободный объем, см ³	4,1	4,4	5,3	4,7	5,4	4,7	4,8	5,4	4,9	5,4	4,7	5,5

*Твэл без центрального отверстия.

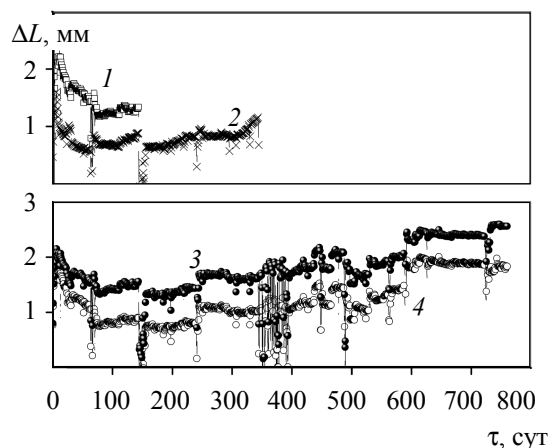
зазоры 0,21 и 0,27 мм, зазор третьего опытного твэла с топливом ВВЭР-0 составил 0,21 мм. Результаты измерения удлинения топливных сердечников ВВЭР и PWR в процессе облучения показаны на рис. 3.

Газовое давление под оболочками твэлов.

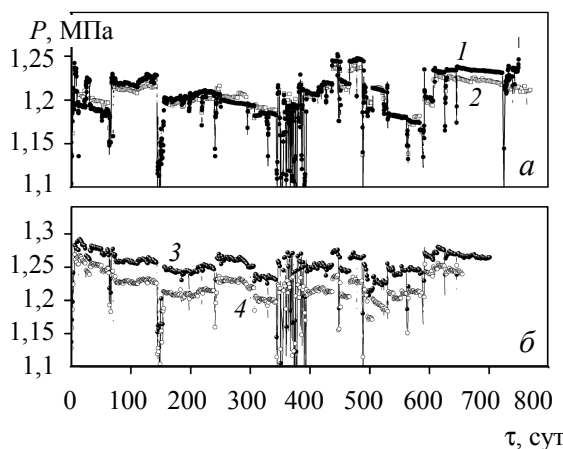
Внутреннее газовое давление измеряли датчиками в тех же твэлах, которые имели датчики удлинения топливного сердечника, за исключением твэла с топливом PWR (твэл 2). Как следует из рис. 4, давление под оболочкой твэлов при тепловой мощности и выгорании, достигнутых в эксперименте, остается стабильным, что свидетельствует об отсутствии существенного газо-выделения из топлива. Отмеченное изменение давления, главным образом, связано с отклоне-



Р и с. 2. Изменение средней линейной мощности опытных твэлов верхнего (1) и нижнего кластера (2) сборки IFA-503.2 в течение испытания



Р и с. 3. Удлинение топливного сердечника, измеренное в твэле 13 с топливом PWR (1), твэле 24 (2), 17 (3), 15 (4) с тремя видами топлива ВВЭР-0, ВВЭР-1, ВВЭР-2 соответственно

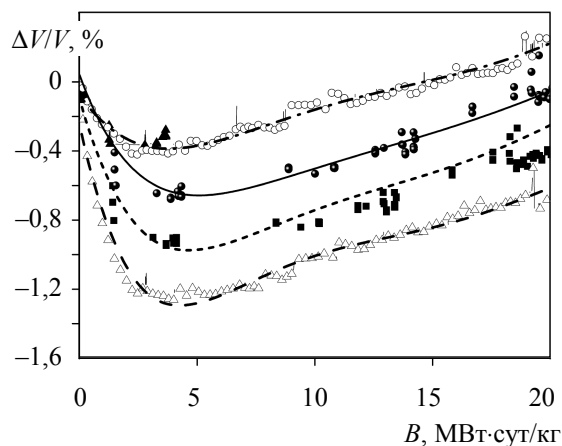


Р и с. 4. Давление газа, измеренное в опытных твэлах верхнего (а) и нижнего кластера (б): 1, 2, 3, 4 — твэл 22, 24, 17, 15 с топливом ВВЭР-1, ВВЭР-0, ВВЭР-1, ВВЭР-2 соответственно

нием мощности от средней, а также, как показал анализ, с увеличением свободного объема в твэле за счет терморadiационного уплотнения в начальный период эксплуатации (до 5 МВт·сут/кг) и уменьшением вследствие последующего распухания топлива с выгоранием. Некоторое дополнительное снижение давления, возможно, также было связано с абсорбцией гелия (газа-наполнителя) диоксида урана топливом на первой стадии облучения [5].

Температура в центре топливного сердечника. Температуру в центре сердечника измеряли с помощью термометров расширения, установленных в шести твэлах со всеми исследуемыми типами топлива. Анализ показал, что топливо ВВЭР-1 оказалось более термомеханически стабильным в начальной стадии облучения, чем другие виды, в том числе и PWR, в которых температура уменьшилась при первом выходе на мощность, возможно, за счет релокации (рис. 5). По-видимому, на стабилизацию температуры в твэлах ВВЭР-1 могло также повлиять терморadiационное уплотнение, компенсировавшее снижение температуры топлива вследствие релокации на первой стадии облучения.

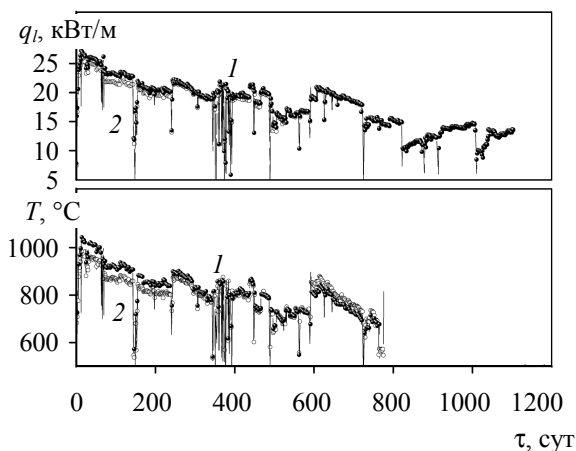
Оценка уплотнения модифицированных видов топлива ВВЭР. Терморadiационное уплотнение различных видов топлива ВВЭР и PWR в экспериментах в зависимости от выгорания, очевидно, отражает общепризнанное мнение о радиационном уплотнении тех видов топлива, которые имеют повышенную фракцию мелких пор с размером меньше микрона (рис. 6). Анализ показал, что на уплотнение ока-



Р и с. 6. Уплотнение топлива PWR (○) и ВВЭР (Δ) в эксперименте IFA-503.1 и топлива PWR (▲), ВВЭР-1 (●), ВВЭР-2 (■) в эксперименте IFA-503.2

зывают некоторое влияние также и условия облучения (радиационная нагрузка и температура) [6, 7]. Это означает, что полученные данные могут быть использованы и для детального моделирования терморadiационного уплотнения различных видов топлива ВВЭР. Эксперимент показал, что модифицированное топливо ВВЭР-1, очевидно, имеющее наименьшую фракцию субмикронной пористости, является более стабильным и близким по своим характеристикам к топливу PWR. Необходимо также отметить, что микроструктура топливной матрицы, размеры зерен которой представлены в эксперименте, не оказывает существенного влияния на характер радиационного распухания, поскольку темп удлинения сердечника со всеми опытными видами топлива от выгорания почти одинаковый (табл. 3).

Деградация теплопроводности топлива ВВЭР. Как известно, процессы, влияющие на поведение диоксида урана топлива, взаимозависимы. Тем не менее внутриреакторные измерения позволяют их анализировать при определенных условиях. Температура в центре топливного сердечника может изменяться в зависимости от тепловой мощности, размера зазора между топливом и оболочкой вследствие уплотнения, распухания, релокации топливных таблеток и деформации оболочки, а также в результате ухудшения проводимости зазора между топливом и оболочкой за счет выхода газообразных продуктов деления. Кроме этого, существенное влияние оказывает деградация теплопроводности топливной матрицы под воздействием облучения. Каждый из этих процессов, влияю-



Р и с. 5. Линейная тепловая мощность и температура в центре топливного сердечника: 1, 2 — модифицированное топливо ВВЭР-1 (твэл 18) и PWR (твэл 14)

Таблица 3. Внутриреакторные измерения в эксперименте IFA-503.2

Параметр	ВВЭР-1	ВВЭР-2	ВВЭР-0	PWR
Уплотнение топлива, %:				
на нулевой мощности	0,39—0,63	0,87	0,54	0,36
на мощности	0,54*—0,87	1,2	0,84*	0,96
по давлению газа	1,1*—1,5	2—2,1	1,7*	—
Выгорание, МВт·сут/кг**	2—4	3—4	3—4	2—3
Удельное распухание, % (на каждые 10 МВт·сут/кг)	0,5—0,55	0,5	0,5	0,45—0,5

*Топливо испытывали в нижнем кластере сборки на пониженной мощности.

**Уровень выгорания при максимальном терморadiационном уплотнении топлива.

щих на тепловое состояние ТВЭлов, является сложным. Анализ экспериментов с хорошо изученными видами топлива позволяет оценить некоторые параметры опытных видов топлива. Например, деградацию теплопроводности можно оценить при известном влиянии остальных факторов с использованием метода нормализации температуры топлива к одинаковой нагрузке в зависимости от выгорания. На основе анализа изменения теплового состояния ТВЭлов при известном зазоре между топливом и оболочкой (используя измеряемые терморadiационное уплотнение и распухание топлива) с учетом незначительного газовыделения, а также малой деформации оболочки была сделана попытка оценить степень деградации теплопроводности топлива ВВЭР.

Качественный анализ указанных конкурирующих процессов показал, что распухание обоих видов топлива в зависимости от выгорания почти одинаково, в то время как уплотнение для разных опытных видов топлива отличается (см. рис. 6). Отличие температуры в ТВЭлах ВВЭР-1 и PWR в начальный период облучения, которое, по-видимому, было обусловлено разной степенью релокации и уплотнения, сохранилось при последующем облучении. Анализ изменения нормализованной температуры в топливе PWR и ВВЭР показал, что зависимость деградации эффективной теплопроводности диоксида урана топлива ВВЭР и PWR от выгорания почти идентична. Температуру сердечника ТВЭлов измеряли с различным исходным зазором между топливом и оболочкой (рис. 7). Таким образом, можно предположить, что зависимость эффективной теплопроводности диоксида урана топлива PWR от выгорания, полученная в

реакторе HBWR на основе анализа многочисленных данных о деградации топлива [8], может быть использована с определенной степенью достоверности и для топлива ВВЭР в следующем виде:

$$\lambda = [0,1148 + 0,0035B + 2,475 \cdot 10^{-4}(1 - 0,00333B)\theta]^{-1} + 0,0132 \exp(0,00188T), \quad (1)$$

где λ — эффективная теплопроводность диоксида топлива, Вт/(м·К); T — температура топлива, °С; B — выгорание, МВт·сут/кг UO_2 ; θ — температура топлива, изменяющаяся в диапазоне $20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1650^\circ\text{C}$.

Указанная зависимость нормирована на топливо плотностью 95% теоретической. Для коррекции на действительную плотность топлива можно использовать поправочный коэффициент

$$\lambda_p = \lambda \cdot 1,079 \frac{\rho}{1 + 0,5(1 - \rho)}, \quad (2)$$

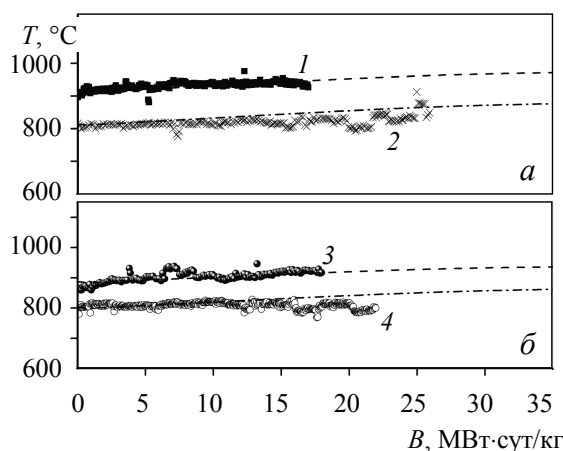


Рис. 7. Изменение нормализованной к линейной мощности 20 кВт/м температуры топливного сердечника в зависимости от выгорания топлива в ТВЭлах PWR (а) и ВВЭР (б): 1, 2, 3, 4 — ТВЭл 6, 14, 1, 19, зазор 0,27, 0,21, 0,27, 0,21 мм соответственно

где ρ — плотность топлива в долях от теоретической.

В качестве примера на рис. 8 показана зависимость эффективной теплопроводности диоксидуранового топлива от выгорания при разной температуре. Расчеты с помощью кода FTEMP3 [8], используемого в Халдене для оценки теплового состояния ТВЭЛов PWR, показали, что эксперименты по измерению температуры топливного сердечника ТВЭЛов с топливом ВВЭР (см. рис. 7) удовлетворительно согласуются с указанной зависимостью.

Заключение. Таким образом, исследования трех модифицированных видов топлива ВВЭР и типичного PWR в экспериментальной сборке IFA-503.2 реактора HBWR позволили сравнить терморadiационную стабильность и теплофизические характеристики модифицированных видов топлива, а также оценить деградацию теплопроводности в зависимости от выгорания. Анализ показал, что термомеханические характеристики модифицированного топлива ВВЭР незначительно отличаются от типичного топлива PWR. Терморadiационное уплотнение на начальной стадии облучения всех модифицированных видов топлива ВВЭР значительно уменьшилось по сравнению с топливом ВВЭР, испытанным в первом эксперименте [1]. При этом наиболее стабильным оказалось топливо, обозначенное в эксперименте как ВВЭР-1. Эксперимент подтвердил, что исходные структурно-технологические параметры и в особенности микроструктура топлива, которая формируется на стадии спекания таблеток, существенно влияют на терморadiационное уплотнение ди-

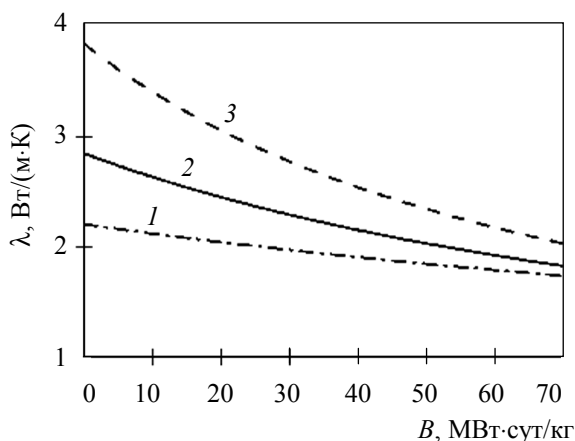
оксидуранового топлива, но почти не влияют на набухание топливных таблеток за счет накопления твердых продуктов деления при незначительных отклонениях от стехиометрии. Анализ термомеханических характеристик топлива ВВЭР позволил выдать рекомендации, которые снизили его терморadiационное уплотнение и тем самым повысили стабильность в начальный период эксплуатации.

Анализ результатов изменения температуры с выгоранием позволил сделать вывод об одинаковом характере деградации теплопроводности исследуемых видов топлива.

Результаты исследования термомеханических характеристик опытных ТВЭЛов ВВЭР, испытанных до максимального выгорания 48 МВт·сут/кг, расширили базу данных о топливе ВВЭР. Сравнительный анализ данных дает определенные основания для использования базы данных о топливе PWR для верификации компьютерных кодов и совершенствования моделей, описывающих топливо ВВЭР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волков Б.Ю., Рязанцев Е.П., Яковлев В.В. и др. Исследования поведения топлива ВВЭР и PWR, облученного в реакторе HBWR (Халден, Норвегия). — Атомная энергия, 2011, т. 111, вып. 6, с. 342—348.
2. Volkov B., Ryazantsev E., Yakovlev V. The Thermal and Mechanical Behaviour of Modified WWR Fuel Compared with PWR Specification Fuel in IFA-503.2. HWR-637, December 2000.
3. Volkov B., Tverberg T. Irradiation performance of modified WWR fuel compared with typical PWR fuel in the Halden Reactor Test. — In: 4th Intern. Conf. on WWR Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Bulgaria, Varna, 15 October 2001, p. 186—196.
4. Volkov B., Kolstad E. Review of WWR fuel and material tests in the Halden reactor. — In: 6th Intern. Conf. on WWR Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Bulgaria, Albena, 19—23 September 2005, p. 214—221.
5. Vinjamuru K., Owen D. Helium fill gas absorption in pressurised UO_2 fuel rods during irradiation. — Nucl. Technol., 1980, v. 47, № 1, p. 119—124.
6. Small G. Densification of uranium dioxide at low burnup. — J. Nucl. Mater., 1987, v. 148, № 3, p. 302—315.
7. Freshley M. e.a. Irradiation-induced densification of UO_2 pellet fuel. — Ibid., 1976, v. 62, № 2, p. 138—166.
8. Wiesenack W., Tverberg T. Thermal performance of high burnup fuel — in-pile temperature data and analysis. — In: Intern. Topical Meeting on LWR Fuel Performance. USA, Utah, April 10—3, 2000, p. 626—633.



Р и с. 8. Деградация теплопроводности диоксидуранового топлива с выгоранием, оцененная по данным экспериментов при температуре 600 (1), 1000 (2), 1650 °C (3)

Поступила в Редакцию 14.02.12