

Послереакторные исследования твэлов, проработавших 626 эфф. суток в активной зоне реактора ВВЭР-1 Ново-Воронежской АЭС

В. С. БЕЛОКОПЫТОВ, С. Н. ВОТИНОВ, З. И. ПАХОМОВ, М. Д. ДЕРИБИЗОВ,
В. Я. ГАБЕСКИРИЯ, В. Ф. ПОРТНОВ (С С С Р)

УДК 621.039.548

Экономичность работы АЭС в значительной степени определяется надежностью работы твэлов при больших выгораниях. Весьма важными обстоятельствами, определяющими живучесть твэла, являются коррозионная стойкость материала оболочек, наводороживание и наводородообразование циркониевого сплава, а также характер распределения гидридной фазы в оболочке.

В данной работе приводятся результаты исследования штатных твэлов, проработавших в наиболее энергонапряженных условиях реактора ВВЭР-1 626 эфф. суток и достигших максимального выгорания $24\ 000\ \text{Мвт} \cdot \text{сутки}/\text{т}\ \text{У}$.

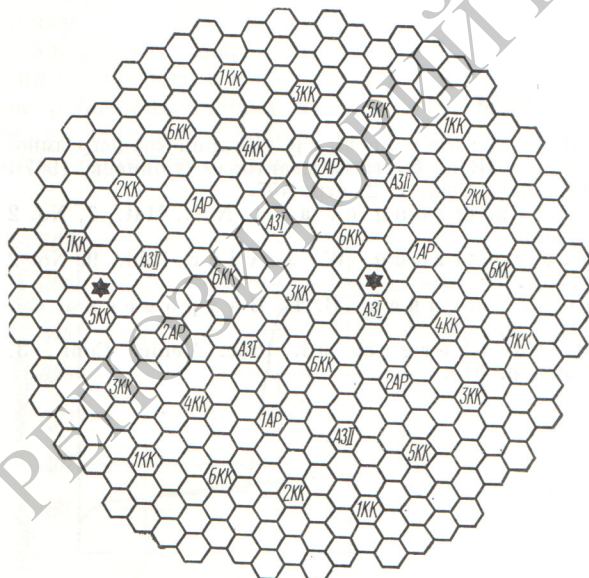
Конструкция твэла и условия эксплуатации. Твэл водо-водяного реактора первого блока Ново-Воронежской АЭС [1] представляет собой цилиндрическую циркониевую ($\text{Zr} + 1\% \text{Nb}$) трубку диаметром 10,2 мм с толщиной стенки 0,65 мм, заполненную таблетками из спеченной двуокиси урана 2%-ного обогащения. Диаметральный зазор между таблетками и стенкой трубки равен 0,1 мм. Плотность спеченной двуокиси урана составляет $\sim 10,1\ \text{г}/\text{см}^3$. Герметизация твэла осуществлена с помощью ступенчатых заглушек из циркониевого сплава, заваренных электроннолучевой и аргоно-дуговой сваркой. В верхней части твэла имеется свободное пространство, служащее для компенсации температурных расширений столба брикетов и накопления газообразных осколков деления.

Каждая рабочая сборка (кассета) состоит из 90 твэлов.

Ниже приводятся результаты исследования твэлов из двух кассет, находившихся в эксплуатации в наиболее энергонапряженных условиях реактора ВВЭР-1 с августа 1964 г. по июнь 1967 г. Схема расположения исследованных кассет в реакторе показана на рис. 1. Твэлы охлаждались водой под давлением $\sim 100\ \text{атм}$. Температура воды на входе равнялась $240 - 250^\circ\text{C}$ на выходе — $275 - 280^\circ\text{C}$. Химический состав воды следующий [2,3]: жесткость $\leq 0,003\ \text{мг} \cdot \text{экв}/\text{л}$; содержание кислорода $\leq 0,015\ \text{мг}/\text{л}$; хлоридов $\leq 0,05\ \text{мг}/\text{л}$; рН — 9—10; продуктов коррозии — $1,5\ \text{мг}/\text{л}$.

В начальный период эксплуатации АЭС высокое значение рН = 9 ÷ 10 поддерживалось введением в подпиточную воду гидразин-гидрата и аммиака. Однако в результате разложения аммиака и гидразина под действием радиации в воде первого контура накапливалось большое количество водорода, что создавало возможность образования взрывоопасной смеси в газгольдерах и других сосудах. В дальнейшем значение рН воды первого контура было понижено до 6—7. Средняя теплонпряженность на поверхности элементов составляла $(0,3 - 0,4) \cdot 10^6\ \text{ккал}/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$.

Внешний осмотр твэлов. Осмотр поверхности оболочек твэлов проводился в «горячей» камере на дистанционном микроскопе УМСД-1. На поверхности оболочек были видны темно-серые окисные пленки без каких-либо дефектов (раковин, вздутий, трещин и др.), кроме того, наблюдались отдельные следы отложения коричневого цвета, связанные, по-видимому, с осаждением продуктов коррозии контура реактора (окислы железа, хрома и др.). Все сварные швы, выполненные электроннолучевой сваркой, находились в хорошем состоянии. При этом были измерены внешние диаметры твэлов.



Р и с. 1. Расположение исследованных кассет в активной зоне реактора ВВЭР-1:

исследованные кассеты помечены звездочкой; АЗ, АР, КК — компенсирующие кассеты.

Диаметр измерялся через каждые 200 мм в двух взаимно перпендикулярных направлениях с точностью до $\pm 0,01$ мм. Проведенные измерения показали, что размеры элементов по диаметру находятся в пределах исходных величин.

Структурные исследования и механические испытания. Металлографическому исследованию были подвергнуты твэлы из каждой кассеты из внешнего и внутреннего рядов сборки как с минимальным, так и максимальным выгоранием топлива. Для изучения микроструктуры материала оболочки (сплав Zr + 1% Nb) и ядерного горючего (UO_2) вырезались образцы из участков, отстоящих соответственно на 400, 1000, 1300, 1700 и 2400 мм от нижнего конца твэлов. Высота образцов для металлографического исследования равнялась 7 мм, для механических испытаний на растяжение — 3 мм. Микроструктура оболочки в исходном состоянии представлена на рис. 2.

Металлографическое исследование оболочек твэлов показало наличие в структуре умеренного количества гидридной фазы. На рис. 3 и 4 приведены типичные фотографии микроструктур образцов, вырезанных из оболочек твэлов из верхней части и середины, что соответствует минимальному и максимальному выгоранию топлива. Установлено, что на поверхности всех оболочек твэлов имеется окисная пленка толщиной от 0,01 мм до 0,03 мм. Толщина окисной пленки увеличивается к центральной части элемента. Количество гидридных включений возрастает в зоне максимального энерговыделения (~ 1000 мм от нижнего конца элемента). Расположение гидридов в оболочке имеет кольцевую ориентацию с увеличением концентрации к внешней поверхности.

Умеренное количество гидридной фазы в оболочке и незначительная толщина поверхностных окисных пленок свидетельствуют об обычном процессе окисления и наводороживания циркониевых оболочек с внешней стороны в среде теплоносителя. Микротвердость оболочек облученных твэлов увеличилась по сравнению с микротвердостью оболочек твэлов в исходном состоянии на 60—70%. С целью количественной оценки механических свойств оболочек твэлов проведена серия испытаний необлученных (контрольных) и облученных кольцевых образцов, вырезанных из различных участков твэлов.

Испытания при температуре 280, 350 и 500° С проводились в вакууме (10^{-4} мм рт. ст.), а при комнатной температуре — на воздухе на дис-

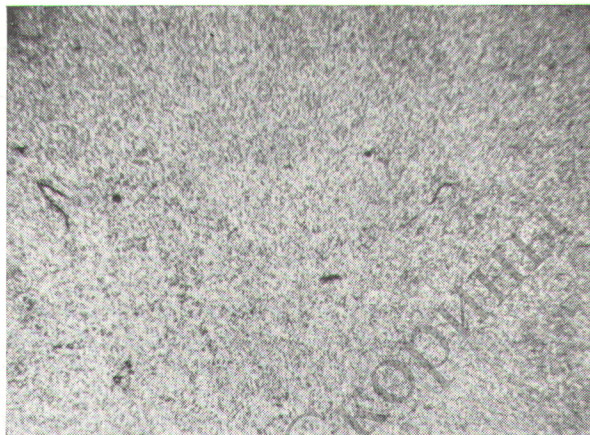


Рис. 2. Микроструктура оболочки в исходном состоянии ($\times 200$).



Рис. 3. Микроструктура оболочки элемента из верхней части ($\times 200$).

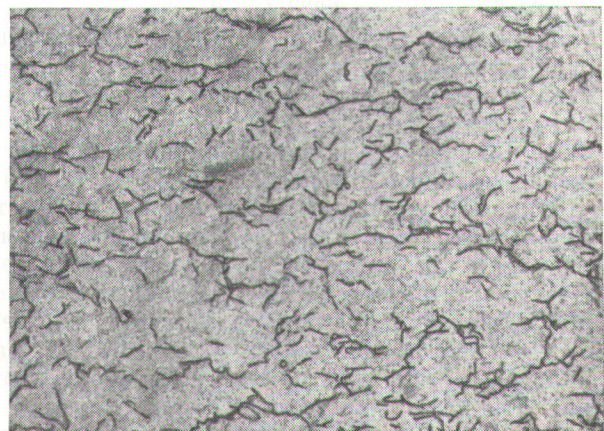
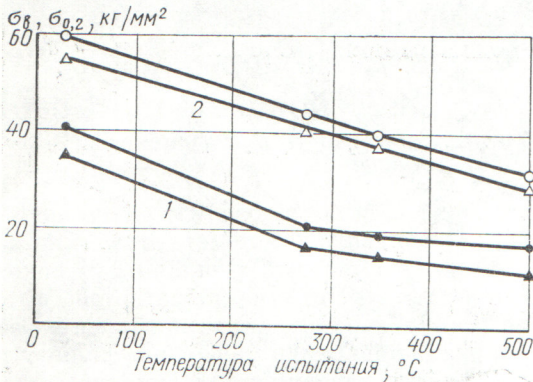
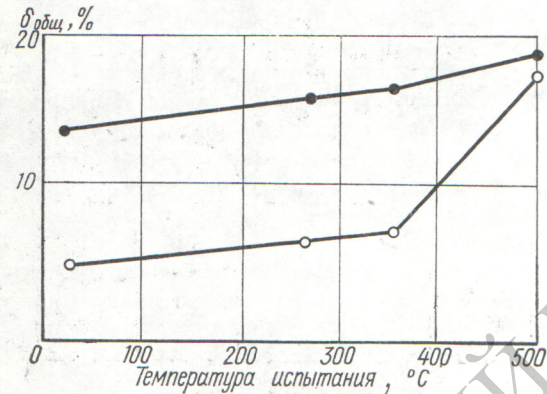
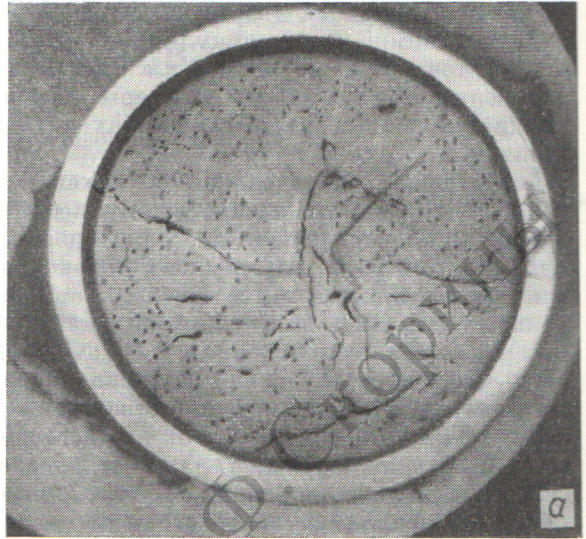


Рис. 4. Микроструктура оболочки из середины элемента ($\times 200$).



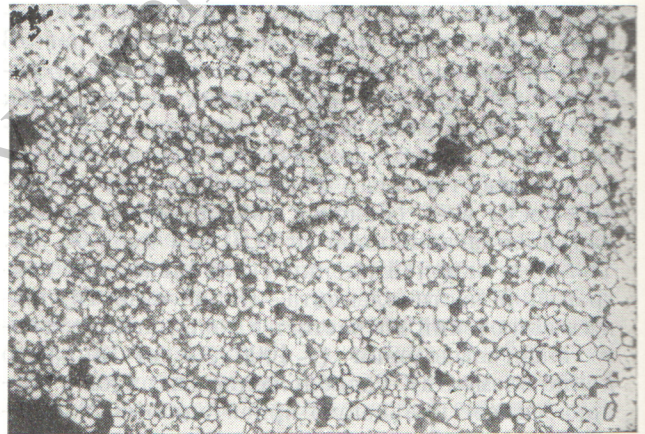
Р и с. 5. Зависимость прочностных свойств от температуры испытания:

1 — контрольные образцы; 2 — облученные образцы; ● — $\sigma_{в}$, ▲ — $\sigma_{0.2}$.



Р и с. 6. Зависимость пластичности от температуры испытания:

● — $\delta_{общ}$, контрольные образцы; ○ — $\delta_{общ}$, облученные образцы.



Р и с. 7. Макро- и микроструктура топлива (максимально напряженный участок элемента).

танционной машине (ММ-150Д) с автоматической записью диаграммы растяжения. Температура испытания поддерживалась автоматически с точностью $\pm 3^\circ\text{C}$.

Из полученных данных испытания на растяжение кольцевых образцов (рис. 5, 6) видно, что предел прочности $\sigma_{в}$ и предел текучести $\sigma_{0.2}$ заметно повысились по сравнению с измеренными для оболочек необлученных твэлов. В результате облучения пластичность образцов из различных участков оболочки облученных элементов понизилась на 50—60% и для кольцевых образцов при температуре испытаний 280—350°С составляет 6—7%.

Результаты механических испытаний вместе с данными исследований облученных твэлов свидетельствуют о хорошей стойкости оболочек,

изготовленных из циркониевого сплава $\text{Zr} + 1\% \text{Nb}$.

Исследование горючего. В результате исследования микроструктуры UO_2 , взятой из различных участков по высоте твэлов из кассет 1 и 2, в том числе и из максимально напряженных участков, не обнаружено никаких существенных изменений (рис. 7).

Поскольку в структуре горючего отсутствуют температурные зоны (зона оплавления и зона столбчатых зерен) и не наблюдается рост равноосных зерен, температура в центре брикетов не превышала 1600°С.

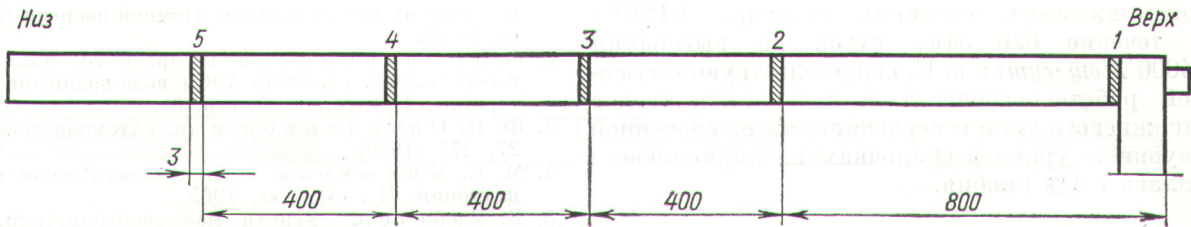


Рис. 8. Схема вырезки образцов из твэла.

С целью экспериментального определения изотопного состава и выгорания облученного горючего в реакторе ВВЭР-1 были проведены радиохимические исследования UO_2 из твэлов исследованных кассет.

Для радиохимического исследования горючего было приготовлено пять образцов из различных участков по высоте твэла (рис. 8) в основном из зоны максимального выгорания, чтобы получить сведения об изменении изотопного состава горючего при наиболее глубоких выгораниях.

Методы исследований. Определение изотопного состава урана и плутония проводилось

Зависимость содержания изотопов U и Pu от глубины выгорания. По экспериментальным результатам, приведенным в табл. 1, расчетным путем [6] определено количество продуктов деления, образовавшихся за счет деления изотопов U^{235} , Pu^{239} , Pu^{241} (табл. 2).

Как видно из табл. 2, вклад плутония в общее выгорание весьма существен и достигает в образце с наибольшим выгоранием ~ 50%. Общее выгорание в этом образце составляет 23,6 кг/т U, что удовлетворительно согласуется с результатами, полученными ранее [7].

Проведенные исследования твэлов из двух кассет, проработавших в наиболее энер-

Содержание изотопов урана и плутония в анализируемых образцах

Таблица 1

Номер образца	Содержание U^{235} , %	Содержание изотопов Pu, %			
		Pu^{239}	Pu^{240}	Pu^{241}	Pu^{242}
1	$1,4 \pm 0,06$	$82,6 \pm 0,8$	$13,4 \pm 0,7$	$3,5 \pm 0,1$	$0,54 \pm 0,05$
2	$0,78 \pm 0,02$	$62,2 \pm 0,4$	$24,05 \pm 0,16$	$10,14 \pm 0,25$	$3,6 \pm 0,11$
3	$0,63 \pm 0,01$	$60,0 \pm 0,4$	$25,0 \pm 0,2$	$10,9 \pm 0,3$	$4,35 \pm 0,2$
4	$0,76 \pm 0,03$	$63,6 \pm 0,6$	$22,6 \pm 0,4$	$11,2 \pm 0,6$	$2,54 \pm 0,04$
5	$0,66 \pm 0,014$	$60,9 \pm 0,5$	$24,2 \pm 0,3$	$10,8 \pm 0,2$	$4,02 \pm 0,12$

на масс-спектрометрах МИ-1311 и МИ-1305 [4]. Содержание изотопов плутония на грамм урана определялось двумя методами — кулонометрическим и изотопного разбавления [5].

Значение содержания плутония в анализируемом растворе находилось как среднее из двух измерений, полученных кулонометрически и методом изотопного разбавления, так как погрешности обоих методов примерно одинаковы.

Экспериментальные результаты определения количества урана и плутония в образцах 1—5 приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, содержание тяжелых изотопов плутония в образце 3 достигает 40%. Ошибка определения содержания плутония в образцах составляет ~10%.

Содержание урана и плутония (кг/тU) в образцах с различной глубиной выгорания

Таблица 2

Изотоп	Номер образца				
	1	2	3	4	5
U^{235}	13,8	7,5	6,1	7,4	6,5
U^{238}	974,4	964,7	959,8	967,8	963,8
Pu^{239}	3,1	4,2	5,0	3,6	4,2
Pu^{240}	0,51	1,6	2,1	1,3	1,7
Pu^{241}	0,13	0,7	0,91	0,64	0,75
Pu^{242}	0,02	0,24	0,36	0,14	0,28
Продукты деления плутония	1,8	8,7	11,9	6,5	9,3
Продукты деления урана	5,2	10,4	11,7	10,6	11,3
Общее выгорание	7,0	19,1	23,6	17,1	20,6

гонапряженных условиях реактора ВВЭР-1 в течение 626 эфф. суток до выгорания 24000 *Мет·сутки/т U*, свидетельствуют о высокой работоспособности и надежности твэлов стержневого типа с сердечниками из спеченной двуокиси урана в оболочках из циркониевого сплава с 1% ниобия.

ЛИТЕРАТУРА

1. С. А. Скворцов. Доклад Р/2184, представленный СССР на Вторую международную конференцию

по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).

2. Ф. Я. Овчинников и др. В сб. «Состояние и перспективы развития АЭС с водо-водяными реакторами». Т. I. М., ИАЭ, стр. 61.
3. Ф. Я. Овчинников и др. «Атомная энергия», 27, 274 (1969).
4. М. С. Милюкова и др. Аналитическая химия плутония. М., «Наука», 1965.
5. Р. Уэбстер. Успехи масс-спектрометрии. М., Изд-во иностр. лит., 1963.
6. В. Я. Габескирия и др. Препринт НИИАР П-66, 1970.
7. О. А. Миллер и др. В сб. «Состояние и перспективы развития АЭС с водо-водяными реакторами». Т. II. М., ИАЭ, стр. 325.

Конструкция и основные характеристики твэла ВВЭР-1000

А. С. ЗАЙМОВСКИЙ, В. В. КАЛАШНИКОВ, В. Н. КОСТРОВ, Л. Л. МАЛАНЧЕНКО,
А. В. НИКУЛИНА, В. С. ЯМНИКОВ (СССР)

УДК 621.039.546

Реактор ВВЭР-1000 является дальнейшим развитием разрабатываемых в СССР водо-водяных реакторов корпусного типа. В таблице даны основные характеристики активных зон реакторов ВВЭР-210, ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 [1]. Для сравнения приведены данные проектируемого американского реактора «Maine Yankee», который предполагается запустить в 1972 г. [2].

Основные характеристики активных зон реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-210, ВВЭР-440 и «Maine Yankee»

Параметр	ВВЭР-1000	ВВЭР-210	ВВЭР-440	«Maine Yankee»
Мощность, <i>Мет</i> электрическая тепловая	1 000 3 200	210 760	440 1 370	830 2 440
Давление в первом контуре, <i>кг/см²</i>	160	100	125	158
Температура воды на входе в реактор, °С	290	252	270	288
Средняя температура воды на выходе из реактора, °С	340	272	300	317
Максимальный тепловой поток, <i>ккал/м²·ч</i>	1,35·10 ⁶	1,2·10 ⁶	1,0·10 ⁶	1,1·10 ⁶ *
Глубина выгорания, средняя по активной зоне, <i>Мет·сутки/TU</i>	40 000	15 000	27 300	30 000

* Значение получено расчетным путем по данным работы [2].

Конструкция твэла и его основные параметры

Конструкция твэла показана на рис. 1 и 2. Материалом оболочки и концевых деталей служит циркониевый сплав. В качестве горючего используются таблетки из спеченной двуокиси урана (плотность не менее 10,2 *г/см³*, обогащение 2—4%) с торцевыми лунками. Вес столба горючего находится в пределах 1,53—1,62 *кг*. Диаметральный зазор между горючим и оболочкой колеблется от 0,14—0,27 *мм*. Как видно из рисунка, горючее заключено между двумя разрезными втулками, способными удерживать трех-, четырехкратный вес столба за счет гарантированного натяга 0,05—0,08 *мм* между втулкой и внутренней поверхностью оболочки. Втулки изготавливаются из циркониевого сплава и предназначены для дистанционирования горючего во время технологических операций и транспортных перевозок. Введение в конструкцию твэла нижней втулки позволяет создать две степени свободы для теплового расширения горючего во время выхода аппарата на мощность и тем самым разгрузить оболочку от растягивающих усилий, вызывае-