

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].

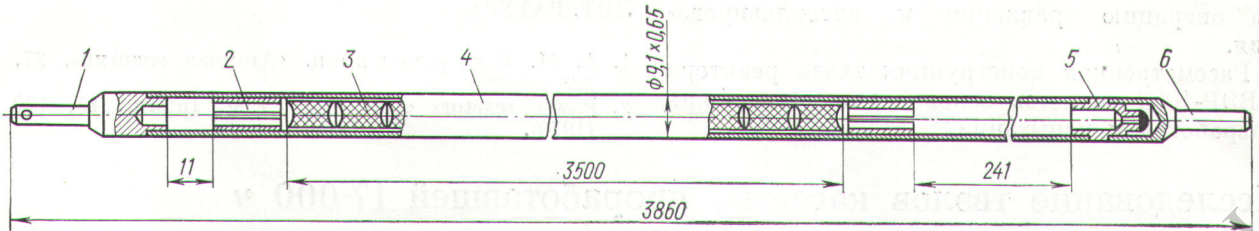
Основные характеристики активных зон реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-210, ВВЭР-440 и «Maine Yankee»

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-



Р и с. 1. Твэл реактора ВВЭР-1000:

1 — нижняя заглушка; 2 — разрезная втулка; 3 — таблетка; 4 — оболочка; 5 — втулка; 6 — наконечник.

мых трением и местным заклиниванием горючего. В конструкции предусмотрены два газосборника (верхний и нижний). Суммарный свободный объем под оболочкой является достаточным для того, чтобы давление газообразных продуктов деления, выделившихся под оболочку твэла, не превышало в течение кампании давления теплоносителя. Основные параметры твэла ВВЭР-1000 приведены ниже.

Все параметры даны для максимально нагруженного твэла (при максимальном диаметральном зазоре).

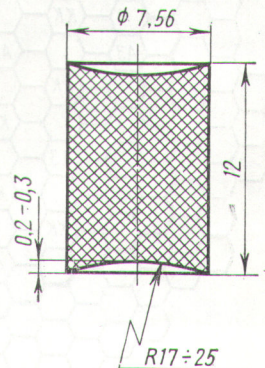
Максимальная температура поверхности раздела «теплоноситель — оболочка»	350° С
Максимальная температура внутренней поверхности оболочки (без учета влияния коррозионной пленки и отложений)	410° С
Максимальная температура поверхности горючего	1270° С
Максимальная температура горючего (в центре)	2700° С
Средняя по высоте активной зоны температура бурта таблетки	1380° С
Средняя по объему температура горючего	1570° С
Максимальное увеличение длины столба горючего на конец кампании	73 мм
Максимальное увеличение объема столба горючего на конец кампании	10,3 см ³
Максимальное количество газообразных продуктов деления, выделяющихся под оболочку твэла	54%
Свободный объем под оболочкой в холодном состоянии	30,5 см ³
Свободный объем под оболочкой при эксплуатации	21,8 см ³
Максимальное давление газовой смеси под оболочкой на конец кампании	140 кг/см ²

Использованные при расчетах значения тепловой проводимости границы раздела «оболочка — горючее» и теплопроводности UO₂ приводят к несколько завышенным значениям температур горючего, что обеспечивает необходимый запас при конструировании твэла. Расчеты

объема газосборников, диаметральных и осевых зазоров проводились из условия равномерного теплового расширения и радиационного распухания горючего под облучением. Для оценки количества газообразных продуктов деления, выделившихся под оболочку твэла, была принята следующая схема расчета: из объема горючего, находящегося при температуре выше 1650° С, выделяется 100% образовавшихся газообразных продуктов деления и из объема горючего с температурой ниже 1650° С выделяется 5% образовавшихся газообразных продуктов деления.

Технология изготовления твэла

Сердечник изготавливается методом прессования таблеток из прессованного порошка UO₂. После сушки прессованные таблетки спекаются, контролируются по внешнему виду, плотности и химическому составу, а затем шлифуются и проверяются по наружному диаметру и величине сколов. Годные таблетки поступают для загрузки в твэл. Набранный столб горючего загружается в оболочку с приваренной нижней заглушкой. Для герметизации твэла к верхнему концу оболочки приваривается втулка с отверстием, через которое твэл заполняется смесью газов (Ar и He). Затем отверстие заваривается, твэл проверяется на герметичность при комнатной температуре и к втулке приваривается наконечник. Торцевое отверстие во втулке заваривается аргоно-дуговой сваркой, все остальные швы выполняются электронно-лучевой сваркой. Для улучшения коррозионной стойкости сварные швы подвергаются отжигу, после чего твэлы поступают



Р и с. 2. Таблетка из спеченной двуокиси урана.

на операцию травления и автоклавирования.

Рассмотренная конструкция твэла реактора ВВЭР-1000 является основой для дальнейших разработок и испытаний.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Петросьянц, «Атомная энергия», 27, 263 (1969).
2. Power reactors «70». Nucl. Eng. Intern., 15, 120 (1970).

Исследование твэлов кассеты, проработавшей 17 000 ч в активной зоне реактора ВК-50

В. С. БЕЛОКОПЫТОВ, С. Н. ВОТИНОВ, В. М. САРЫЧЕВ, М. А. ДЕМЬЯНОВИЧ, Б. П. ПЕТИН, А. Б. АНДРЕЕВА, М. Д. ДЕРИБИЗОВ, В. А. ЩЕПЕТИЛЬНИКОВ (С С С Р)

УДК 621.039.548

В Научно-исследовательском институте атомных реакторов им. В. И. Ленина с 1965 г. работает опытный кипящий реактор ВК-50, на котором проводится серия испытаний твэлов, оболочки которых выполнены из сплава $Zr + 1\% Nb$. На конференции СЭВ «ВВЭР-68» были доложены результаты исследований твэлов кассеты, проработавшей в активной зоне реактора 5000 ч [1]. В настоящем докладе приводятся данные исследований тепловыделяющей сборки, проработавшей длительное время (17 000 ч) в условиях кипящего реактора ВК-50.

Условия работы кассеты

Как уже сообщалось [1, 2], кассета реактора ВК-50 представляет собой сборку из 126 стержневых твэлов с сердечниками из спеченной двуокиси урана 2%-ного обогащения. Оболочки твэлов выполнены из сплава $Zr + 1\% Nb$, а чехол сборки — из сплава $Zr + 2,5\% Nb$.

Кассета была загружена в активную зону реактора в октябре 1965 г. и извлечена в октябре 1968 г. Все это время условия работы кассеты и ее положение в активной зоне были постоянными. На рис. 1 показано расположение кассеты в активной зоне реактора.

Время работы кассеты на различной мощности составляет 17 375 ч. Средний интегральный поток нейтронов равен $3,8 \cdot 10^{20}$ нейтр/см² ($E > 0,1$ Мэв).

Максимальное выгорание топлива $13,4 \times 10^8$ Мвт·сутки/т U. Максимальный тепловой поток $0,85 \cdot 10^6$ ккал/м²·ч. Химический состав котловой воды (для установившегося в последние годы водного режима) приведен ниже [3]:

pH	6—8
Fe	0,04—0,07 мг/кг
Cu	до 0,01 мг/кг
Zn	до 0,015 мг/кг
O ₂	до 0,1 мг/кг
Соли жесткости	10—12 мг-экв/кг

Результаты исследований

Осмотр кассеты и твэлов, проведенный при первичных исследованиях сборки в «горячей камере» установки ВК-50 и последующих исследованиях в материаловедческом отделе, показал, что кожух кассеты не имеет признаков повышенного окисления: поверхность его серого цвета с небольшим количеством отложений продуктов коррозии контура. На твэлах, за исключением одного, видимых дефектов не обнаружено. Поверхность всех твэлов покрыта коричневым налетом продуктов коррозии. Толщина этих отложений изменяется по высоте элементов и достигает наибольшей величины (~ 0,15 мм) в максимально напряженных участках твэлов.

Для проведения механических и металлографических исследований оболочек были вырезаны образцы из областей максимального и минимального энерговыделения.

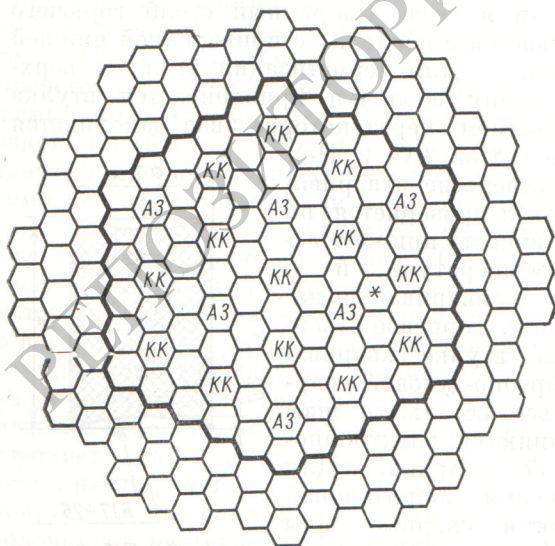


Рис. 1. Расположение исследованной кассеты в активной зоне реактора ВК-50 (помечена крестиком).