

УДК 621.039.546

## Твэл реактора РБМК-1000

АДЕН В. Г., БИБИЛАШВИЛИ Ю. К., ЗАЙМОВСКИЙ А. С., КАЛАШНИКОВ В. В., НИКОЛАЕВ В. А., НИКУЛИНА А. В., СОЛЯНЫЙ В. И., ФИЛИПШОВ В. Н., ЯМНИКОВ В. С., ГОНЧАРОВ В. В., ДУБРОВИН К. П.

Создание энергетического реактора РБМК-1000 электрической мощностью 1000 МВт является новым этапом развития канальных уран-графитовых реакторов, охлаждаемых обычной водой. Накопленный опыт проектирования и эксплуатации позволил разработать реактор, выбранный в настоящее время в качестве одного из основных типов реакторов для строящихся АЭС, которые в дальнейшем будут производить существенную долю электроэнергии в европейской части СССР. В РБМК-1000 использовано основное качество канальных систем — возможность перегрузки топлива во время работы реактора, что позволяет повысить коэффициент нагрузки АЭС и снизить непроизводительные потери в поглотителях системы управления и защиты.

**Конструкция тепловыделяющей сборки (ТВС) и твэла.** Высота активной зоны РБМК-1000 (7 м) обуславливает особенности кассеты (рис. 1), которая составлена из двух расположенных по высоте канала ТВС, закрепленных на центральном стержне таким образом, что зазор, необходимый для компенсации удлинения твэлов в процессе работы, находится в центре активной зоны. На центральном стержне закреплены направляющие детали кассеты — хвостовик и наконечник. Верхняя и нижняя ТВС одинаковы и состоят из 18 твэлов каждая с длиной активной части 3,5 м [1, 2]. Твэлы в сборке дистанционируются десятью решетками ячеистого типа из нержавеющей стали (рис. 2).

В твэле РБМК-1000 материалом оболочки и концевых деталей является сплав циркония с 1% ниобия в рекристаллизованном состоянии (рис. 3). Диаметр оболочки твэла 13,6 мм, минимальная толщина 0,825 мм. В качестве топлива используются таблетки из спеченной двуокиси урана, высота которых близка к их диаметру. Для компенсации термического рас-

ширения топливного столба таблетки на торцах имеют сферические лунки. Средняя масса столба топлива 3590 г, минимальная плотность 10,3 г/см<sup>3</sup>.

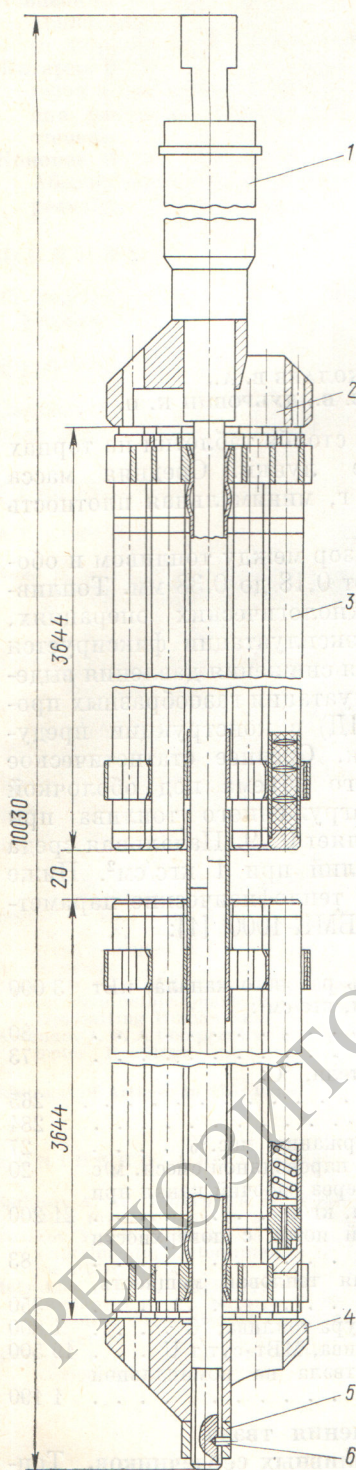
Диаметральный зазор между топливом и оболочкой колеблется от 0,18 до 0,38 мм. Топливный столб при технологических операциях, транспортировке и эксплуатации фиксируется витой пружиной. Для снижения давления выделяющихся при эксплуатации газообразных продуктов деления (ГПД) в конструкции предусмотрен газосборник. Среднее статистическое отношение свободного объема под оболочкой твэла к объему загруженного топлива при изготовлении составляет 0,09. Начальная среда под оболочкой — гелий при 1 кгс/см<sup>2</sup>. Ниже приведены основные теплофизические параметры ТВС и твэла РБМК-1000 [1]:

Максимальная мощность рабочего канала, кВт	3 000
Давление теплоносителя, кгс/см <sup>2</sup> :	
на входе	80
на выходе	73
Температура теплоносителя, °С:	
на входе	265
на выходе	284
Максимальное паросодержание, мас. %	27
Максимальная скорость пароводяной смеси, м/с	20
Расход теплоносителя через рабочий канал при максимальной мощности, кг/ч	21 200
Максимальный тепловой поток с поверхности твэла, Вт/см <sup>2</sup>	83
Максимальная линейная тепловая мощность, Вт/см	350
Максимальная температура топлива, °С	1 800
Среднее выгорание топлива, МВт·сут/т U	19 500
Длительность работы твэла на номинальной мощности, сут	1 190

### Технология изготовления твэла

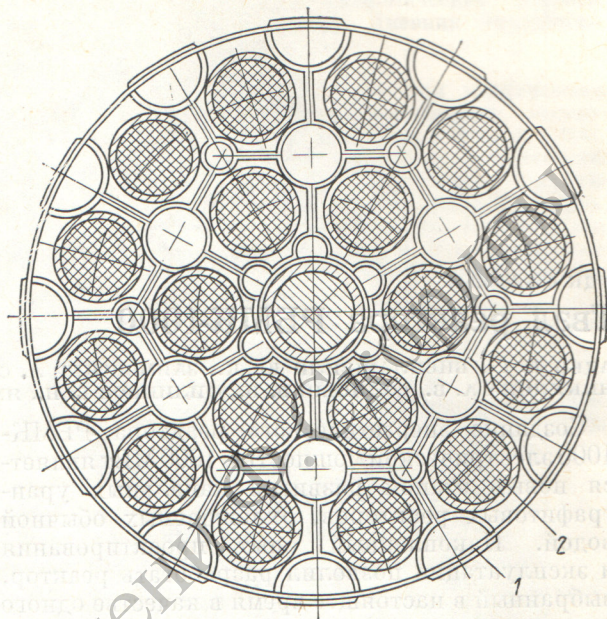
**Изготовление топливных сердечников.** Топливные таблетки изготавливаются методом холодного прессования с последующим спеканием. Размер частиц исходного порошка двуокиси урана составляет 0,4—0,6 мкм. Шихту для





Р и с. 1. Конструкция кассеты:

1 — стержень; 2 — наконечник; 3 — ТВС; 4 — хвостовик; 5 — гайка; 6 — штифт



Р и с. 2. Сечение ТВС:

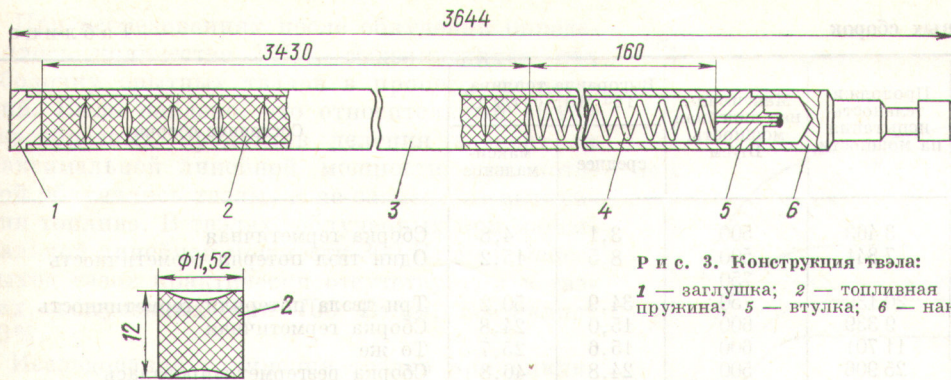
1 — дистанционирующая решетка; 2 — ТВЭЛ

прессования готовят следующим образом: в исходный порошок вводят органическую связку на основе водного раствора поливинилового спирта в количестве 7—8%. Полученную массу уплотняют при постоянном давлении, дробят и просеивают через вибросито. Затем гранулированный порошок подсушивают и прессуют. Спрессованные брикеты сушат, а затем спекают в водородсодержащей атмосфере. Таблетки с завышенным диаметром подшлифовывают. Отсутствие поверхностных трещин и сколов контролируется по эталонам. Годные таблетки удовлетворяют следующим требованиям: плотность  $\geq 10,3$  г/см<sup>3</sup>; наружный диаметр 11,52 мм; кислородный коэффициент 2,00—2,02; содержание фтора и влаги  $\leq 0,006$  и  $\leq 0,002$  мас.% соответственно.

**Изготовление твэла.** Топливные таблетки загружают в оболочку с приваренной нижней заглушкой. Для герметизации твэла к оболочке приваривают втулку с отверстием, через которое твэл вакуумируется и заполняется гелием. Затем отверстие заваривают аргоно-дуговой сваркой, твэл проверяют на герметичность и к втулке приваривают наконечник.

Все швы, кроме заварки отверстия во втулке, выполняют электронно-лучевой сваркой. Для повышения коррозионной стойкости сварные швы отжигают. Наружную поверхность твэла подвергают травлению и автоклавированию.





Р и с. 3. Конструкция твэла:

1 — заглушка; 2 — топливная таблетка; 3 — оболочка; 4 — пружина; 5 — втулка; 6 — наконечник

Готовый твэл проверяют на герметичность с помощью гелиевого течеискателя при температуре  $350^{\circ}\text{C}$ .

### Экспериментальные исследования работоспособности твэла

Для подтверждения работоспособности ТВС и твэла был проведен комплекс экспериментальных и исследовательских работ во вне реакторных и реакторных условиях, в том числе теплофизические и ресурсные испытания топливных каналов и моделей сборок на специальных стендах, а также петлевые реакторные испытания опытных и натуральных ТВС [3—5].

**Стендовые ресурсные испытания.** На пароводяном стенде исследовалась вибрационная стойкость ТВС, оснащенной 12 термостойкими тензорезисторами в твэлах. Расход теплоносителя изменялся от 5 до 34 т/ч, паросодержание от 0 до 48 мас. %.

Через каждые 1000 ч испытаний ( $\sim 60 \cdot 10^6$  циклов) ТВС и канал, в котором она находилась, тщательно осматривались. Канальная труба и твэлы после первой тысячи часов испытаний не имели следов наклепа или истирания. Циркониевые поверхности были покрыты ровной пленкой темно-серого цвета. В дальнейшем состояние поверхностей канала и твэлов не менялось. В местах касания стальных дистанционирующих решеток с канальной трубой и твэлами до конца испытаний в стационарном режиме не наблюдалось следов истирания. В результате длительных ( $\sim 9000$  ч) испытаний был сделан вывод, что вибрация элементов канала и ТВС в условиях, близких к рабочим, не опасна.

Для ТВС реактора РБМК-1000 проектный коэффициент запаса по критической мощности составляет 1,38 при работе реактора в установленном режиме непрерывных перегрузок.

Фактические значения критической мощности ТВС были получены путем прямых экспериментов на полномасштабных электрообогреваемых макетах ТВС в широком диапазоне давления, расхода и паросодержания теплоносителя, причем оказалось, что при тех же расходах воды эти значения превышают проектные на 7—10% для «свежих» и на 15—20% — для выгоревших ТВС.

Эксперименты на электрообогреваемых пучках показывают, что кризис при охлаждении пароводяной смесью приводит к относительно небольшому (в пределах нескольких десятков градусов) росту температуры оболочки твэла. При этом оболочки твэлов из циркониевых сплавов длительно сохраняют работоспособность.

**Реакторные испытания.** Испытания твэлов РБМК-1000 начались в 1967 г. [6, 7]. Испытывались полномасштабные сборки штатной конструкции и укороченные сборки длиной 1 м. Для приближения условий испытания укороченныхборок к условиям работы штатных твэлов были созданы специальные каналы, в которых теплоноситель последовательно охлаждал две или три опытные сборки. Таким образом, эффективная длина опытных твэлов в этих экспериментах искусственно увеличивалась в два или три раза.

Данные испытаний восьми опытныхборок (табл. 1) свидетельствуют о высокой работоспособности твэлов РБМК-1000 с оболочками из сплава циркония +1% ниобия. Как видно из табл. 1, все рассматриваемые опытные сборки испытывались при максимальной линейной мощности, существенно превышающей линейную мощность твэлов РБМК-1000 Ленинградской АЭС. Несмотря на жесткие условия испытаний, в четырех сборках из восьми было достигнуто глубокое выгорание топлива, значительно



Условия испытаний опытных сборок

Таблица 1

Номер сборки	Число твэлов	Место испытания (петля, канал)	Продолжительность испытания на мощности, ч	Максимальная линейная мощность, Вт/см	Выгорание топлива, $10^3$ МВт·сут/т U		Состояние сборки
					среднее	максимальное	
1	9	ПВЦ 4—8	3 463	500	3,1	4,8	Сборка герметичная Один твэл потерял герметичность
2	11	ПВЦ-1 3—8	7 841	500 750	8,5	15,2	
3	12	ПВЦ-1 2—4	20 139	750	34,9	50,2	Три твэла потеряли герметичность Сборка герметичная
4	11	ПВЦ-1 2—4	9 339	600	15,0	24,8	
5	11	ПВЦ-2 1—7	11 701	600	15,6	25,7	То же Сборка разгерметизировалась
6	17	ПВЦ-1 1—8	25 906	500	24,8	46,8	
7	6	ПВЦ-1 3—8	28 221	600	34,0	60,5	То же Сборка герметичная
8	18	ПВЦ-2 7—7	28 723	500	26,6	43,4	

превышающее проектное. Среднее выгорание топлива в сборках № 3, 6—8 составляло  $(25 \div 35) \cdot 10^3$ , максимальное —  $(43 \div 60) \times 10^3$  МВт·сут/т U (среднее выгорание топлива на ЛАЭС  $19,5 \cdot 10^3$ , максимальное —  $23,5 \cdot 10^3$  МВт  $\times$  сут/т U).

Сборки № 3, 6 и 7 разгерметизировались после достижения глубокого выгорания топлива. Исследование твэлов сборки № 3, в которой максимальное выгорание топлива составляло  $50,2 \cdot 10^3$  МВт·сут/т U, показало, что разгерметизация была вызвана недостаточностью свободного компенсационного объема внутри твэлов и недостаточностью осевого компенсационного зазора в сборке. Вследствие высокого давления ГПД внутри твэлов сборки № 3 диаметр оболочек увеличился максимально на 3%. Кроме того, осевой компенсационный зазор в сборке, составлявший в исходном состоянии 1,5—2,5 мм, отсутствовал. Твэлы уперлись в концевые решетки и изогнулись. В результате таких деформаций в оболочках твэлов образовались сквозные трещины в зоне сварных швов. В связи с этим в конструкции штатных кассет были увеличены осевой компенсационный зазор и объем газосборника, что исключит в дальнейшем возможность возникновения подобных явлений.

Сборка № 2 испытывалась до максимального выгорания топлива  $15 \cdot 10^3$  МВт·сут/т U при линейной мощности 500 Вт/см. Затем мощность была увеличена до 750 Вт/см, и через некоторое время сборка вышла из строя. Было обнаружено, что в центральном участке оболочки наиболее напряженного твэла сборки образовалась продольная трещина.

При работе в кипящем теплоносителе оболочки твэлов окисляются с образованием неравно-

мерной окисной пленки и незначительно наводороживаются. Из табл. 2 видно, что даже после облучения твэлов до очень глубокого выгорания топлива окисление и гидрирование не ограничивают работоспособности оболочек твэлов. Гидриды в оболочках имеют преимущественную кольцевую ориентировку. В районе дистанционирующих решеток (нержавеющая сталь) ускоренная коррозия оболочек из сплава циркония +1% ниобия не наблюдалась. Не отмечено также истирания оболочек в местах касания твэлов с дистанционирующими решетками.

Предел прочности, предел текучести и общее относительное удлинение (табл. 3) определялись путем поперечного растяжения кольцевых образцов, вырезанных из оболочек. Из табл. 3 видно, что изменения механических свойств достигают насыщения после сравнительно кратковременного облучения. Механические свойства оболочек твэлов сборок № 1 и 3 практически одинаковы. Высокое относительное удлинение облученных оболочек (10—14%) существенно для accommodations возможных локальных деформаций, вызванных механическим взаимодействием топлива с оболочкой.

Максимальные толщина окисных пленок и содержание водорода в облученных оболочках Таблица 2

Номер сборки	Время испытания, ч	Максимальное выгорание, $10^3$ МВт·сут/т U	Толщина окисной пленки, мкм	Содержание водорода, мас. %
1	3 463	4,8	5	0,003
2	7 841	15,2	50	0,004
3	20 139	50,2	80	0,005



При исследованиях после облучения определялось количество ГПД, выделяющихся под оболочку опытных твэлов в процессе испытаний. Было найдено, что относительный выход газообразных продуктов деления зависит от максимальной линейной мощности, при которой облучались твэлы, и не зависит от выгорания топлива. В твэлах, облученных при максимальной линейной мощности 300 Вт/см и менее, выход газов практически отсутствует, а в твэлах, облученных при 700 Вт/см, составляет 50%.

Исследование удлинения твэлов при циклировании мощности было проведено в петлевой установке на полномасштабных сборках при следующем режиме одного цикла: увеличение мощности от 0 до 100% за 1,5–2 ч; выдержка 40–45 ч; снижение мощности от 100 до 0% за 1,5–2 ч и выдержка на нулевой мощности 1 ч.

Кроме того, проводились испытания при циклах с длительной (2–3 сут и более) выдержкой на нулевой мощности, а также быстрые сбросы мощности, имитирующие условия при введении стержней аварийной защиты. Расхолаживание контура при испытаниях проводилось как с большой скоростью, достигавшей в начальный момент 3600 °С/ч, так и со скоростью, не превышающей 180 °С/ч.

На рис. 4 приведены предварительные результаты измерений длины твэлов, из которых следует, что при выгораниях свыше  $(3 \div 5) \times 10^3$  МВт·сут/т U происходит замедление

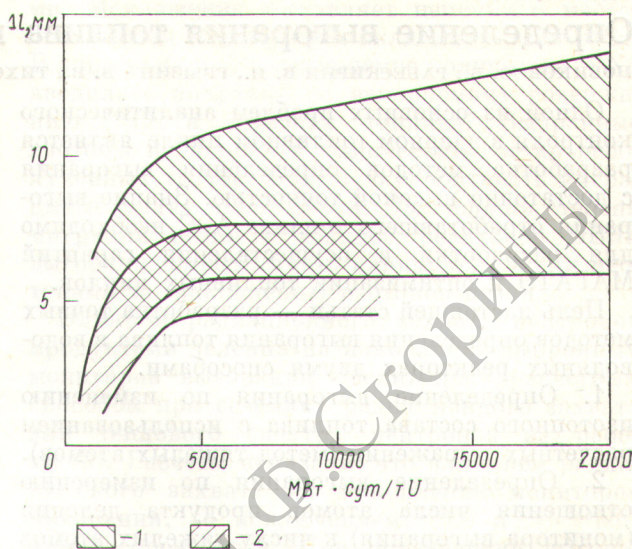


Рис. 4. Зависимость удлинения твэла от выгорания топлива в кассетах I, II (1) и III (2)

роста твэлов во время циклирования мощности.

Таким образом, комплекс экспериментальных, расчетных и технологических исследований позволил создать надежную конструкцию твэла и ТВС для энергетического уран-графитового реактора канального типа электрической мощностью 1000 МВт.

Поступила в Редакцию 30/III 1977г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петросьянц А. М. Современные проблемы атомной науки и техники в СССР. М., Атомиздат, 1976.
2. Петросьянц А. М. и др. IV Женевск. конф. 1971, Докл. СССР № P/715.
3. Гончаров В. В. и др. Там же. Докл. СССР № P/720.
4. Амаев А. Д. и др. Там же. Докл. СССР № 428.
5. Булкин Ю. М. и др. В кн.: Опыт эксплуатации АЭС и пути дальнейшего развития атомной энергетики. Т. II. Обнинск, изд. ФЭИ, 1974, с. 28.
6. Гончаров В. В. и др. Исследования топливных элементов на основе  $UO_2$  в оболочках из сплава Н-1. Докл. на франко-советском семинаре «Топливные композиции и конструкционные материалы тепло-выделяющих сборок водо-водяных энергетических реакторов». Сакле, 18–24 февр. 1976.
7. Гончаров В. В. и др. Работа по топливным элементам. Докл. на Европейской ядерной конференции. Париж, 21–25 апр. 1975.

Механические свойства оболочек до и после облучения при разной температуре испытания

Таблица 3

Сборка	Время облучения, ч	20 °С			300 °С		
		$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2}$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %
	До облучения	28–30	22–25	28–33	16–17	12–14	29–32
1	3 463	48–51	42–46	12–13	32–33	28–30	16–17
2	7 841	51–54	45–49	10–11	37–38	34–35	10–12
3	20 139	50–52	44–47	10–14	32–36	28–30	12–14