

## ТВЭЛЫ РЕАКТОРА ВВР-М – ОБЪЕКТ ПОСТОЯННОГО ИЗУЧЕНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ

К.А. Коноплёв, Г.А. Кирсанов

Рост объема научных исследований на реакторе ВВР-М ставил перед реакторщиками задачу повышения производительности реактора, т. е. увеличения потока нейтронов в экспериментальных каналах. Созданные в конце 50-х годов отечественные ТВС, состоящие из трубных бесшовных твэлов (ТВС типа ВВР-М с топливной композицией в виде металлокерамики  $Al+UO_2$  и, начиная с 1963 г., ТВС типа ВВР-М2 с композицией в виде сплава  $Al+U$ ), имели значительный теплофизический запас, что позволило уже в первые годы работы реактора систематически повышать его мощность. К 1966 году стационарная мощность реактора была поднята до 16 МВт. Имел место даже кратковременный выход на мощность 18 МВт. Начатые в начале 70-х годов теплогидравлические исследования, в результате которых были измерены гидравлические характеристики твэлов, распределение потоков воды в элементах активной зоны [1], температуры оболочки твэлов в наиболее теплонапряженных местах активной зоны, предельно допустимые плотности теплового потока [2], позволили сделать вывод, что возможности дальнейшего повышения удельной мощности реактора при использовании ТВС типа ВВР-М2 уже исчерпаны. Максимальная температура оболочки твэлов уже достигла температуры насыщения и, хотя запас до критической тепловой нагрузки был еще достаточно велик ( $> 2,5$ ) [3], дальнейшее повышение удельной тепловой мощности, а следовательно и плотности потока нейтронов было уже сопряжено с появлением пристеночного кипения на поверхности твэлов. Специальными экспериментами [4] было показано, что коррозионная стойкость материала оболочек твэлов (сплав САВ-1) в специфических условиях пристеночного кипения еще достаточно высока для весьма ограниченного срока работы твэла в таком режиме, тем не менее появление паровой фазы в активной зоне могло оказывать нежелательное влияние на регулирование реактора. Поэтому были исследованы возможности повышения удельной тепловой мощности путем изменения конструкции твэлов.

Для условий реактора ВВР-М были определены оптимальные сочетания толщины твэлов и зазора между ними для различного числа твэлов в сборке при сохранении размеров элементарной ячейки, т. е. без изменения конструкции решеток и бериллиевого отражателя [5]. Выбор был остановлен на 6-элементной сборке с толщиной твэлов 1,25 мм и зазором 1,5 мм (ТВС типа ВВР-М3). Центральный твэл этой сборки из технологических соображений был выполнен в виде стержня. Новый тип твэлов обеспечивал увеличение удельной теплопередающей поверхности в 1,8 раза, что при некотором ухудшении условий теплоотдачи давало выигрыш в удельной тепловой мощности в 1,5 раза при сохранении прежних ограничений на температуру оболочки твэлов. Такая конструкция ТВС позволяла осуществить постепенный переход на новые ТВС, т. к. допускала одновременную эксплуатацию в активной зоне старых и новыхборок.

Дальнейшее совершенствование сборок шло по двум направлениям. Во-первых, было существенно уменьшено гидравлическое сопротивление и улучшена равномерность охлаждения твэлов за счет изменения конструкции концевых деталей. Во-вторых, была увеличена загрузка топлива почти в 2 раза, что уменьшало топливную составляющую эксплуатационных затрат и повышало коэффициент размножения в активной зоне.

Первые ТВС усовершенствованной конструкции (ТВС типа ВВР-М5, рис. 1) были загружены в реактор в октябре 1978 года. По мере выгорания активная зона догружалась этими же сборками, и к лету 1980 года реактор был переведен на них полностью.

До перехода на новые ТВС реактор работал обычно на мощности  $< 16$  МВт из-за теплотехнических ограничений на ТВС типа ВВР-М2. При переходе на ТВС типа ВВР-М5 мощность реактора была повышена до 18 МВт, несмотря на уменьшение числа ТВС в активной зоне с  $\sim 200$  до  $\sim 130$ . Увеличение полной и удельной мощности реактора сопровождалось ростом нейтронного потока в экспериментальных каналах. Кроме того, в освободившиеся ячейки активной зоны были помещены дополнительные экспериментальные устройства.

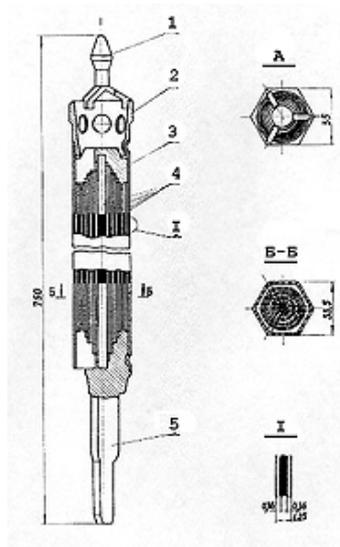
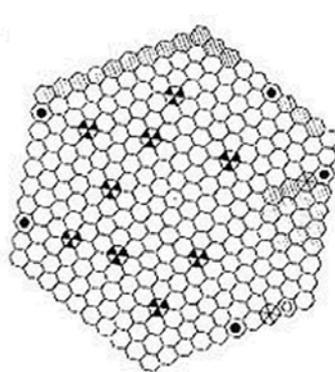
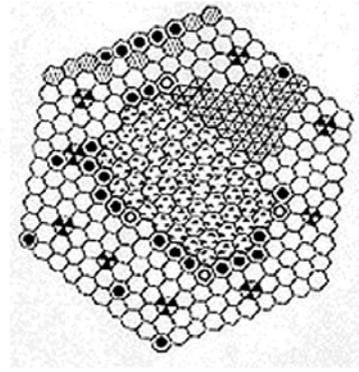


Рис. 1. Кассета шеститрубная ВВР-М5. 1 – головка; 2 – пояс; 3 – венчик; 4 – твэлы; 5 – хвостик



ОБОЗНАЧЕНИЯ:  
 - стержни регулирования  
 - ампулы  
 - свинцовый экран  
 - бериллиевые вытеснители  
 - петлевой канал  
 - ТВС ВВР-М2



ОБОЗНАЧЕНИЯ:  
 - водная полость  
 - стержни регулирования  
 - ампулы  
 - свинцовый экран  
 - бериллиевые вытеснители  
 - штанги  
 - ТВС ВВР-М5

Рис. 2. Картограмма № 402

Рис. 3. Картограмма № 739

Если на твэлах ВВР-М2 из 271 ячейки активной зоны на экспериментальные устройства выделялось 60–65 ячеек, то на твэлах ВВР-М5 реально используется 110–130 ячеек. Практически почти каждая вторая ячейка активной зоны загружена

экспериментальным устройством. На рис. 2 и 3 показаны картограммы типовых загрузок активной зоны твэлами ВВР-М2 (картограмма № 402, 1971 год) и твэлами ВВР-М5 (картограмма № 739, 1989 год). Из-за меньшего годового расхода твэлов снизилась топливная составляющая затрат реактора в 1,4 раза по сравнению с твэлами ВВР-М3 даже в том случае, когда избыточная реактивность тратилась в основном на увеличение числа экспериментальных устройств в активной зоне [6].

Несмотря на уменьшение толщины плакирующего слоя и увеличение концентрации осколков деления в сердечнике твэлов, времени их пребывания в реакторе и удельной энергонапряженности, дозиметрическая обстановка на реакторе практически не изменилась.

Переход на тонкую оболочку несколько увеличил выход осколков деления в воду первого контура. Активность  $^{85m}\text{Kг}$  возросла с  $(1-2)\cdot 10^{-6}$  до  $(3-6)\cdot 10^{-6}$  Ки/л. Тем не менее мощности дозы в насосной, активность воздуха в технологических помещениях и другие параметры, характеризующие условия работы в здании реактора, не изменились. Например, активность воздуха над баком реактора как была на уровне  $(0,2-7,0)\cdot 10^{-7}$  Ки/л, так и осталась  $(0,5-3,2)\cdot 10^{-6}$  Ки/л в 1980–1981 гг. Объясняется это обстоятельство очень просто – осколочные продукты не определяют условия работы на реакторе, их вклад сам по себе мал.

Аналогична ситуация и с выбросом радиоактивных газов в атмосферу, он сохраняется с 1972 года на примерно постоянном уровне: 0,12 Ки/(МВт·ч) и определяется активационным изотопом  $^{41}\text{Ar}$ .

В процессе перехода на ТВС ВВР-М5 были выполнены их всесторонние испытания вплоть до работы при форсированных удельных нагрузках до 900 кВт/л, что является рекордным для твэлов исследовательских реакторов бассейнового типа [7].

В таблице 1 приведены условия эксплуатации твэлов ВВР-М2 и ВВР-М5 в реакторе ВВР-М.

Таблица 1

Условия эксплуатации твэлов в реакторе ВВР-М ПИЯФ

п/п	Наименование параметра	Тип ТВС	
		ВВР-М2	ВВР-М5
1	Мощность реактора, МВт	16	18
2	Скорость воды, м/с	2,8	2,8
3	Средние удельные тепловые нагрузки, Вт/см <sup>2</sup> /кВт/л	37/130	35/230
4	Макс. удельные тепловые Вт/см <sup>2</sup> /кВт/л	80/300	121/800
5	Макс. расчетная температура оболочки твэла, °С	104	104
6	Температура воды на входе в активную зону, °С	50	50
7	Макс. коэффициент неравномерности энерговыделения в активной зоне	3,0	4,0

В таблице 2 представлены геометрические параметры твэлов ВВР-М2 и ВВР-М5, а также твэлов реакторов HFIR и MTR.

Таблица 2

Геометрические параметры твэлов

п/п	Тип ТВС	Толщина твэла	Толщина лакирующей оболочки	Толщина топливного слоя	Удельная поверхность теплосъема
		мм	мм	мм	см
1	ВВР-М2	2,5	0,9	0,7	3,67
2	ВВР-М3	1,25	0,48	0,29	6,60
3	ВВР-М5	1,25	0,6	0,53	6,60
4	HFIR	1,27	0,38	0,51	6,52
5	MTR	1,27	0,38	0,51	3,60*

\* С учетом конструкционных материалов.

Температурные измерения в активной зоне реактора с помощью ТВС ВВР-М5, оснащенной миниатюрными термопарными датчиками, а также измерения зазоров вблизи наружного твэла, выполненные в 116 точках активной зоны, позволили установить, что номинальная величина зазора в некоторых местах вблизи таких устройств, как бериллиевый отражатель, ампулы, штанги, каналы СУЗ, не гарантирована. Это обстоятельство связано, в первую очередь, с изменением центровки или изменением размеров самих устройств, длительное время находящихся в эксплуатации. Ухудшение теплоотвода со стороны меньшего зазора провоцирует термический прогиб наружного твэла в сторону горячей грани, что может привести к повышению температуры твэла. Учет этого обстоятельства потребовал бы снижения допустимой мощности реактора, т.е. ухудшения экономических показателей реактора. Эта проблема была решена путем оребрения наружных твэлов ТВС ВВР-М5 встречными ребрами высотой 0,5 мм и шириной 1,5 мм (рис. 4 [8]).

Постановка таких твэлов вблизи экспериментальных устройств позволяет сохранить минимальный зазор, что устраняет опасность местного перегрева твэлов. Реакторные испытания 60 сборок позволили сделать заключение о том, что работоспособность оребренной сборки (ТВС ВВР-М7) до выгорания 40% топлива практически не отличается от неоребреного прототипа, и принять их для серийного выпуска в качестве штатных ТВС реактора ВВР-М.

Таковы основные моменты исследования и модернизации твэлов реактора ВВР-М, которые не только обеспечили более чем тридцатилетнюю работу реактора на мощности, в полтора раза превышающей проектную, но и дали возможность постановки на нем уникальных экспериментов с расположением экспериментальных устройств непосредственно в активной зоне реактора.

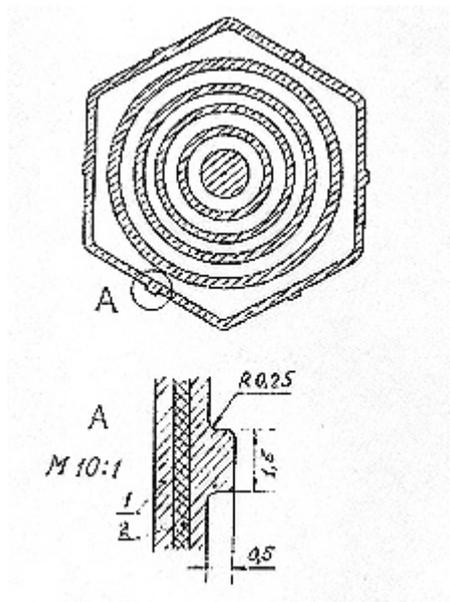


Рис. 4. Поперечное сечение ТВС типа ВВР-М7 с оребренным твэлом

Следует также отметить, что каждый этап модернизации твэлов был связан с преодолением целого ряда технологических трудностей. Главная из них заключалась в освоении технологии изготовления тонкостенных твэлов с малой толщиной плакирующей оболочки. Следующий этап заключался в замене сплавной топливной матрицы на металлокерамическую без изменения размеров твэлов (ТВС типа ВВР-М6). И, наконец, последний этап – формирование сравнительно толстого ребра на тонкой оболочке твэла. Все эти трудности были успешно преодолены заводом-изготовителем.

Серийному выпуску каждого типа твэлов предшествовали длительные реакторные и петлевые испытания с подробным исследованием герметичности сборки в зависимости от выгорания, которые проводились на реакторе ВВР-М.

В результате этой работы была создана сборка твэлов с теплотехническими качествами на уровне лучших зарубежных сборок, которая имела одно существенное преимущество – позволяла оперативно менять конфигурацию активной зоны, создавая возможность размещения в ней различных экспериментальных устройств. По удельной поверхности теплосъема сборка ВВР-М5(М7) превосходит сборку реактора МТР, специально созданную с учетом возможностей размещения в этом реакторе экспериментальных каналов. К достоинствам новой сборки следует отнести также и то ее качество, что она обеспечивает высокие удельные тепловые параметры при малом статическом давлении. Глубина бассейна реактора ВВР-М всего лишь 3,5 м, что существенно расширяет возможности экспериментов по сравнению с другими бассейновыми реакторами, где глубина > 7 м.

Создание новых твэлов следует рассматривать как одну из самых значительных работ коллектива Отдела физики и техники реакторов, как работу, которая во многом предопределила возможности и успехи физических исследований, выполненных на реакторе ВВР-М.

## Литература

1. Г.А. Кирсанов, К.А. Коноплёв, Р.Г. Пикулик, Ж.А. Шишкина. Гидравлика активной зоны реактора ВВР-М. Атомная энергия **39(5)**. 1975. С. 320–323.
2. Г.А. Кирсанов, К.А. Коноплёв, А.Н. Сясин, Ж.А. Шишкина. Определение предельной плотности теплового потока для ТВС реактора ВВР-М. Препринт ЛИЯФ–285. Л. 1976. 17 с.
3. Г.А. Кирсанов, К.А. Коноплёв, Ж.А. Шишкина. К определению критических тепловых нагрузок и коэффициентов запаса до кризиса в исследовательских реакторах бассейнового типа. Атомная энергия **61(1)**. 1986. С. 41–42.
4. Г.А. Кирсанов, К.А. Коноплёв, Р.Г. Пикулик. Коррозия твэла ВВР-М в условиях пристеночного кипения. Атомная энергия **38(2)**. 1975. С. 98–100.
5. П.М. Верховых, В.С. Звездкин, Г.А. Кирсанов, К.А. Колосов, К.А. Коноплёв, Ю.П. Сайков. К проекту реконструкции активной зоны реактора ВВР-М. Атомная энергия **41(3)**. 1976. С. 201–203.
6. А.Н. Ерыкалов, В.С. Звездкин, Г.А. Кирсанов, К.А. Коноплёв, В.С. Львов, Ю.В. Петров, А.П. Рузманов. Тонкостенные твэлы ВВР-М5 для исследовательских реакторов. Атомная энергия **60(2)**. 1986. С. 103–106.
7. Г.А. Кирсанов, К.А. Коноплёв, А. Финдайзен, Ж.Ш. Шишкина. Сравнение теплотехнических возможностей ТВС для реактора ВВР-М. Атомная энергия **67(2)**. 1989. С. 97–100.
8. А.С. Захаров, В.С. Звездкин, К.А. Коноплёв, Г.А. Кирсанов, Р.Г. Пикулик, С.П. Орлов, В.С. Львов, Ю.П. Сайков. ТВС реактора ВВР-М с оребренным наружным твэлом. Атомная энергия **74(1)**. 1993. С. 88–90.