

5. Александров К.А., Афанасьев В.А., Ефимов В.Н. Основные результаты исследований на реакторе БОР-60 по диагностике закипания натрия в активной зоне. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов, 1982, вып. 3(25), с. 44—49.
6. Гаджиев Г.И., Ефимов В.Н., Минаков А.А. и др. Экспериментальные возможности реактора БОР-60 для исследований аварийных режимов в тепловыделяющих сборках. — Там же, 1992, вып. 6, с. 45—51.
7. Поляков В.И. Управление радиационным состоянием АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. — Там же, 1990, вып. 1, с. 60—66.

УДК 621.039.542:621.039.548

РАЗРАБОТКА И ИСПЫТАНИЕ ТВЭЛОВ БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С ВИБРОУПЛОТНЕННЫМ ОКСИДНЫМ ТОПЛИВОМ

*Маершин А.А., Цыканов В.А., Голованов В.Н., Скиба О.В., Гаджиев Г.И.,
Корольков А.С., Боброва Н.В., Кислый В.А., Тейковцев А.А. (ГНЦ РФ — НИИАР)*

В течение последних 25 лет в ГНЦ РФ — НИИАР велись и в настоящее время продолжают комплексные исследования в обоснование возможности реализации короткого замкнутого топливного цикла ядерных реакторов. В отличие от традиционных водных методов переработки ядерного топлива в основу работ положены принципы сухой технологии:

пирозлектрохимические методы переработки высокоактивного ядерного топлива в солевых расплавленных системах с получением гранулята, непосредственно пригодного для изготовления твэлов виброуплотнением;

виброуплотнение для изготовления твэлов из гранулированного топлива;

автоматизированные дистанционно управляемые процессы для изготовления гранулированного топлива, твэлов и ТВС.

Эти виды технологии позволяют учесть современные требования безопасности и экологичности процесса и существенно расширить возможности оксидного топлива для улучшения технико-экономических показателей топливного цикла в целом. К настоящему времени первый этап работ по научно-экспериментальному обоснованию твэлов быстрых реакторов с виброуплотненным уран-плутониевым оксидным топливом в основном завершен. Конструкция твэла и обширный комплекс работ по изучению радиационной стойкости виброуплотненного топлива и твэлов на его основе, автоматизированная дистанционно управляемая технология изготовления твэла органически вписываются в концепцию замкнутого топливного цикла и имеют высокие технико-экономические и эксплуатационные показатели. Накоплен опыт проектирования, изготовления и эксплуатации оборудования по изготовлению гранулированного уранового и уран-плутониевого оксидного топлива и твэлов. Создан банк данных и расчетные коды. Начиная с 1981 г. активная зона реактора БОР-60 функционирует на основе виброуплотненного URuO_2 топлива. К настоящему времени достигнуто максимальное выгорание ТВС штатной конструкции 30%, отдельных экспериментальных твэлов — 32,3%. Пирозлектрохимическим методом переработано ~ 50 кг плутония оружейного качества, из него изготовлены и ведутся испытания 32 ТВС в реакторе БОР-60 и 3 ТВС в БН-600. Проведены успешные испытания шести ТВС с виброуплотненным URuO_2 топливом до выгорания 9,6% (максимальное выгорание отдельных твэлов ~ 10,8%).

Изготовление виброуплотненных твэлов. Виброуплотнение всегда рассматривалось как один из способов изготовления топливного сердечника, который позволяет существенно снизить стоимость производства твэлов и улучшить их эксплуатационные характеристики. Основными преимуществами виброуплотнения и твэлов с виброуплотненным топливом являются:

простота и надежность производственного процесса за счет меньшего числа технологических и контрольных операций, что облегчает его автоматизацию и дистанционное управление, благодаря чему оно может быть использовано при изготовлении ТВЭЛов из высокоактивного (регенсированного) топлива в защитных камерах;

возможность изготовления топливного сердечника с легко варьируемыми параметрами и на основе многокомпонентных композиций;

возможность использования гранулята любой формы как гомогенного состава, так и в виде механической смеси;

меньшее по сравнению с таблеточным сердечником термомеханическое воздействие виброуплотненного топлива на оболочку;

ослабленные требования к внутреннему диаметру оболочек ТВЭЛов.

В результате виброуплотнения эффективная плотность топливного сердечника для ТВЭЛов быстрых реакторов составляет $8,9\text{--}9,4\text{ г/см}^3$. Для сравнения, эффективная плотность топливного сердечника таблетированного топлива равна $8,5\text{--}8,6\text{ г/см}^3$. Распределение эффективной плотности топливного сердечника и плутония вдоль оси не превышает 5% номинального уровня.

Для коррекции кислородного потенциала топлива и устранения влияния технологических примесей в состав гранулированного топлива на стадии приготовления навески вводится геттер в виде гранул металлического урана. Частицы геттера имеют форму, близкую к сферической, с максимальным диаметром до 100 мкм. В процессе отработки технологии обеспечена равномерность распределения геттера по длине топливного сердечника в пределах $\pm 5\%$. В результате комплексных исследований, которые включали дореакторные и реакторные испытания (БОР-60, БН-350 и -600), а также послереакторные материаловедческие исследования, было оптимизировано содержание геттера с учетом термодинамических характеристик и необходимости достижения требуемого достехиометрического кислородного коэффициента топлива.

Возможность изготовления ТВЭЛов виброуплотнением продемонстрирована в двух вариантах: ручное в перчаточных боксах и дистанционное в защитных камерах. Опытно-промышленное изготовление виброуплотненных ТВЭЛов и ТВС БОР-60, БН-350 и -600 в дистанционных условиях было реализовано при работе установок «Орел» (1977—1986 гг., изготовлено около 300 ТВС БОР-60), ОИК (1989—1997 гг. — 26 ТВС типа БН-800) и макетной установки «Колибри» (1992—1997 гг. — 63 ТВЭЛ). В настоящее время функционируют две цепочки перчаточных боксов, на которых реализуются различные экспериментальные программы, а также изготавливаются опытные ТВЭЛы и ТВС БОР-60. Эксплуатация технологического оборудования опытно-исследовательского комплекса показала его высокую надежность. Выход годной продукции составил более 98%. Всего (по состоянию на май 2001 г.) изготовлено 728 ТВС, 29 966 ТВЭЛов (табл. 1).

С конца 1981 г. БОР-60 работает на виброуплотненном уран-плутониевом оксидном топливе. В последние годы в топливный цикл реактора вводится также регенерированный диоксид урана. К настоящему времени в реакторе испытано и испытывается около 500 ТВС со смешанным топливом (табл. 2). Результаты комплексных исследований по оптимизации конструкции ТВЭЛа показали, что наиболее радикальным способом, улучшающим работоспособность ТВЭЛов, является введение геттера в виде порошка металлического урана в состав топливного сердечника. Добавка геттера в количестве до 5% по массе обеспечила достижение выгорания до 11,5% тяж. ат. (максимальное выгорание составило 15—16% тяж. ат.). Повышение содержания геттера с 5 до 10% и увеличение плотности топливного сердечника позволили получить такое же глубокое выгорание, но при более высоких тепловых нагрузках и температуре оболочек.

Т а б л и ц а 1. Производство твэлов с виброуплотненным оксидным топливом

Вид топлива	Реактор	Число ТВС	Число твэлов
UPuO ₂ *	БОР-60	426	15 762
UPuO ₂ **	>>	32	1184
UPuO ₂ **	БН-350	2	254
UO ₂ ***	>>	7	889
UO ₂ ***	БН-600	4	508
UPuO ₂ **	>>	9	1143
UPuO ₂ *	>>	4	508
UPuO ₂ *,***	БФС	8	1016
UO ₂ *** + PuO ₂ ****	БОР-60	1	7
UO ₂ ***	>>	235	8695

*,** Плутоний реакторного (высокофоновый) и оружейного (низкофоновый) качества соответственно.
 *** Продукт переработки отработавшего топлива на РТ-1.
 **** Продукт переработки отработавшего топлива БОР-60 (24%) и БН-350 (4,9%).

Т а б л и ц а 2. Твэлы БОР-60

Топливная композиция	UO ₂ +PuO ₂ , UO ₂ +PuO ₂ +U, (UPu)O ₂ +U
Массовая доля PuO ₂ , %	20—28
Массовая доля геттера, %	3—10
Диаметр×толщина оболочки твэла, мм	6×0,3; 6,9×0,4
Максимальная линейная мощность, Вт/см	510
Максимальная температура оболочки, °С	722
Максимальное выгорание топлива, % тяж. ат.:	
ТВС базовой конструкции	21
экспериментальные ТВС	30
экспериментальные твэлы	32,3
Число ТВС:	
всего	442
достигших выгорания, % тяж. ат.:	
10—15	279
15—20	11
>20	10

Реакторные испытания и материаловедческие исследования. Послереакторные материаловедческие исследования ТВС подтвердили ранее полученные на экспериментальных твэлах со смешанным виброуплотненным топливом закономерности их поведения под облучением: газовыделение, изменение внешнего диаметра оболочки, формирование структуры топливного сердечника, распределение продуктов деления (Zr, Ce, Ru) и др. Механические свойства и набухание оболочек твэлов были близки к данным для экспериментальных твэлов с гомогенизированным топливом (UPu)O₂ и механической смесью UO₂+PuO₂, а также твэлов с топливом из таблеток диоксида урана. Было показано, что в твэлах с массовой долей геттера > 3% физико-химическое взаимодействие топлива с оболочкой отсутствует даже при максимальном выгорании, удельной тепловой нагрузке и температуре оболочки. Единственным лимитирующим фактором, который препятствует достижению выгорания более 20% тяж. ат. твэлов

БОР-60 данной конструкции, является повышенное распухание аустенитных оболочечных материалов при повреждающей дозе более 80 смещ./ат. (рис. 1). Реакторные испытания и материаловедческие исследования твэлов базовой конструкции, содержащих в составе топливной композиции геттер из порошка металлического урана и имеющих оболочки из перспективной ферритно-мартенситной стали, подтвердили их высокую работоспособность до выгорания ~ 30% тяж. ат. Отдельные экспериментальные твэлы достигли выгорания > 32% тяж. ат. При послереакторных исследованиях ни в одном из анализируемых поперечных сечений твэлов не наблюдалось термомеханического и физико-химического взаимодействия топлива с оболочкой. Типичная микро- и макроструктура виброуплотненного $(\text{UPu})\text{O}_2 + \text{U}$ топлива после испытаний в БОР-60 до выгорания 32% тяж. ат. приведена на рис. 2.

Анализ радиационных характеристик работоспособности твэлов с виброуплотненным оксидным топливом показал:

использование топливной композиции с добавкой геттера $(\text{UPu})\text{O}_2 + \text{U}$ позволяет полностью исключить коррозионные процессы, обусловленные наличием цезия и галогенов, а также возможными технологическими примесями, что снимает предел по выгоранию вследствие физико-химического взаимодействия топливо—оболочка;

наличие периферийного слоя исходной структуры топлива приводит к тому, что напряжения в оболочке при переходных процессах во много раз ниже, релаксация напряжений наступает значительно быстрее, чем в твэлах с таблеточным топливом. Как следствие отсутствует влияние на работоспособность твэлов перестановок в активной зоне ТВС с набросом мощности (табл. 3). Повышенная эффективная плотность топливного сердечника ($> 9 \text{ г/см}^3$) позволяет иметь достаточный запас по температуре плавления;

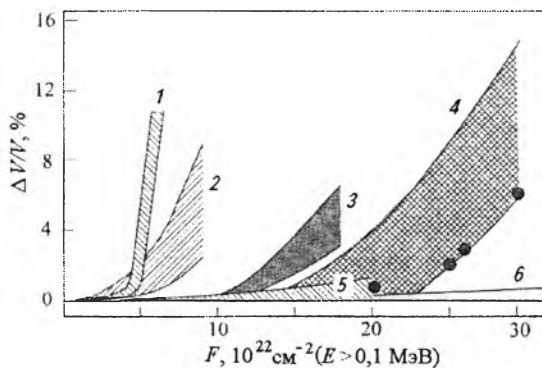


Рис. 1. Распухание нержавеющей стали 316 (1), сплава ЭИ-847 (2), ЧС-68 (3), модифицированной стали 316 (4), ЕМ12 (5), НТ-9 (6)



Рис. 2. Микро- и макроструктура поперечного сечения твэла БОР-60 выгоранием 32% тяж. ат.

Т а б л и ц а 3. Характеристики ТВС БОР-60, переставляемых при эксплуатации

Тип перестановки	Вид топлива	Число ТВС	Выгорание, % тяж. ат.	Число негерметичных ТВС
В пределах одного ряда	Таблеточное	4	10—12	2
	Виброуплотненное	16	8—24	2 (через 2 кампании после перестановки)
От центра к периферии	Таблеточное	18	10—12	—
	Виброуплотненное	57	7—22	—
От периферии к центру	Таблеточное	4	12—17	3
	Виброуплотненное	85	8—25	1 (через 5 кампаний после перестановки)

интегральное распухание виброуплотненного $(\text{UPu})\text{O}_2 + \text{U}$ топлива составило $0,6 \pm 0,1 \text{ \%} / \text{\%}$ выгорания;

не обнаружено влияния технологии получения гранулированного топлива $(\text{UPu})\text{O}_2$ или $\text{UO}_2 + \text{PuO}_2$ на работоспособность твэлов.

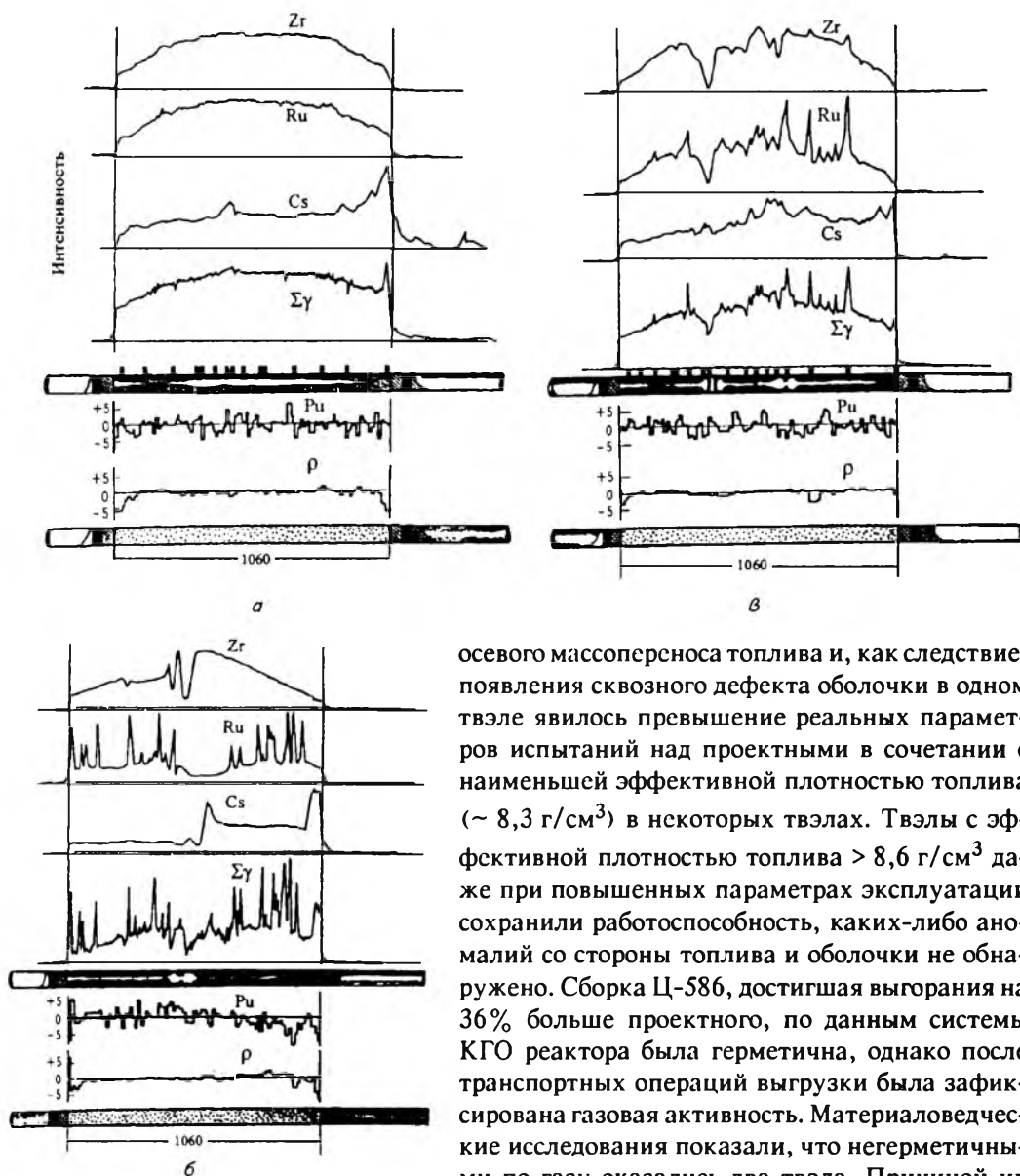
Т а б л и ц а 4. Испытания ТВС с виброуплотненным топливом

ТВС	БН-350			БН-600				
	П1—П7	Ц-585	Ц-586	НФ-0187	НФ-0287	Ву1—Ву4	НФ03—НФ06	Э1—Э3
Год изготовления	1982	1984	1984	1987	1987	1989—1990	1990—1991	1999
Состав топлива	UO_2	$(\text{UPu})\text{O}_2$		$(\text{UPu})\text{O}_2$		UO_2	$(\text{UPu})\text{O}_2$	$(\text{UPu})\text{O}_2$
Содержание геттера, (U мет.), %	5	5		10		10	10	7
Содержание плутония, %	—	20		22—28		—	~ 30	20
Обогащение по ^{235}U , %	27	—		—		—	—	—
Эффективная плотность, г/см ³	8,8	8,3—8,8		8,9—9,1		8,8—9,2	8,8—9,2	8,9—9,1
Материал оболочки твэлов	0X16H15M3Б			0X16H15M3БР		ЧС-68		
Материал чехла ТВС	X16H11M3Т			05X12H2M		05X12H2M		
Тепловая нагрузка, кВт/м	48	51	48	45	45	42	42—44	В реакторе
Температура оболочки, °С	710	740	690	670	670	680	680	То же
Повреждающая доза, смещ./ат.	45	30	42	53	77	27	76—77	>>
Выгорание, % тяж. ат.	7,2	4,7	6,8	6,8	9,6	3,6	9,6 (10,8)*	>>
Наличие негерметичных твэлов:								
по газу	1**	0	2**	0	0	0	0	>>
по топливу	0	1	0	0	0	2	0	>>

* Отдельных твэлов.

**При транспортных операциях.

В период с 1985 по 1986 г. в БН-350 облучали две экспериментальные ТВС со смешанным виброуплотненным оксидным топливом и семь ТВС с урановым виброуплотненным оксидным топливом (табл. 4). В процессе эксплуатации по данным системы КГО реактора одна из сборок со смешанным виброуплотненным оксидным топливом (ТВС Ц-585) была признана негерметичной до контакта топлива с теплоносителем. После проявления признаков разгерметизации на 45 сут эксплуатации (выгорание 1,2% тяж. ат.) сборку облучали еще 110 эф. сут. При разделке был обнаружен один дефектный твэл. Остальные твэлы внешних повреждений не имели. Нарушение целостности оболочки дефектного твэла произошло по центру активной зоны в виде поперечной трещины. В месте повреждения оболочки было топливо. Признаков развития дефекта, вымывания топлива и его взаимодействия с теплоносителем не обнаружено. Методами γ -сканирования были выявлены твэлы с осевым массопереносом топлива и зафиксирована корреляция этого явления с исходной эффективной плотностью топливного сердечника (рис. 3). Исследованиями установлено, что причиной



Р и с. 3. Зависимость массопереноса от эффективной плотности 8,6 (а), 8,5 (б), 8,4 г/см³ (в) в твэле БН-600

в сочетании с высоким уровнем напряжений, обусловленных механическим взаимодействием пучка распухающих твэлов между собой и с чехловой трубой. Запроектные параметры испытаний ТВС в БН-350 в сочетании с вариацией исходной эффективной плотности топливного сердечника позволили экспериментально подтвердить расчетные оценки предельных параметров эксплуатации твэлов. На основании результатов реакторных испытаний и материаловедческих исследований были внесены изменения в конструкцию и технологию изготовления твэлов для повышения надежности и ресурса работы, а именно:

увеличена минимальная эффективная плотность топливного сердечника до 8,6 г/см³ и массовая доля геттера до 10%;

применены более радиационно-стойкие конструкционные материалы.

осевого массопереноса топлива и, как следствие, появления сквозного дефекта оболочки в одном твэле явилось превышение реальных параметров испытаний над проектными в сочетании с наименьшей эффективной плотностью топлива ($\sim 8,3$ г/см³) в некоторых твэлах. Твэлы с эффективной плотностью топлива $> 8,6$ г/см³ даже при повышенных параметрах эксплуатации сохранили работоспособность, каких-либо аномалий со стороны топлива и оболочки не обнаружено. Сборка Ц-586, достигшая выгорания на 36% больше проектного, по данным системы КГО реактора была герметична, однако после транспортных операций выгрузки была зафиксирована газовая активность. Материаловедческие исследования показали, что негерметичными по газу оказались два твэла. Причиной их разгерметизации явилась чрезмерная овализация оболочки из стали ЭИ-847 в результате ее повышенного распухания и охрупчивания в сочетании с

Все эти усовершенствования конструкции были реализованы при изготовлении экспериментальных ТВС БН-600 (табл. 5).

Т а б л и ц а 5. Основные параметры твэлов быстрых реакторов

Параметр	БОР-60	БН-50	БН-600
Длина, мм:			
твэла	1082	1790	2400, 2440
газовой полости	273	300	600
нижней торцевой зоны воспроизводства	150	400	350
топливного сердечника	450	1060	950
верхней торцевой зоны воспроизводства	100	—	350
Диаметр оболочки, мм	6; 6,9	6,9	6,6
Толщина оболочки, мм	0,3; 0,4	0,4	0,4
Размер дистанционирующей проволоки, мм:			
круглой	1,05	1,05	1,15
эллипсной	0,6×1,3	0,6×1,3	0,6×1,3
Эффективная плотность топливного сердечника, г/см ³	8,3—9,5	8,4—8,8	8,8—9,2
Средняя массовая доля PuO ₂ в составе гранулята, %	15—40	20	30
Обогащение гранулята по ²³⁵ U, %	45—90	10	—
Неравномерность распределения по длине сердечника, %:			
эффективной плотности	±5	±5	±5
плутония	±5	±5	±5

В БН-600 были проведены испытания шести ТВС с виброуплотненным уран-плутониевым оксидным топливом, а также четырех ТВС с урановым оксидным топливом. Реакторные испытания шести ТВС со смешанным топливом при проектных параметрах эксплуатации успешно завершены. Максимальное выгорание составило 9,6% тяж. ат. (отдельных твэлов 10,8%) (см. табл. 4).

При проверке на установке КГО негерметичных твэлов в сборках не обнаружено. Результаты комплексных материаловедческих исследований твэлов ТВС выгоранием 6,8% тяж. ат. позволили установить, что:

общее состояние всех компонентов ТВС и твэлов удовлетворительное;

максимальные изменения диаметра оболочки и размера «под ключ» чехловой трубы не превысили 2%, что согласно критерию допустимого формоизменения свидетельствует о неисчерпаемости ресурса работоспособности ТВС;

не обнаружено негерметичных твэлов, нарушения сплошности топливного сердечника и осевого массопереноса топлива.

При металлографических исследованиях никаких аномалий, признаков перегрева, а также коррозионного повреждения оболочки со стороны топлива и теплоносителя не обнаружено. Сравнение структурных изменений топливного сердечника по результатам металлографического анализа с результатами теплофизического расчета выявило хорошее соответствие, что позволило провести верификацию расчетной программы твэлов ВИКОНД.

Таким образом, положительные результаты испытаний шести экспериментальных ТВС (две ТВС изготовлены в перчаточных боксах, четыре ТВС — дистанционно на автоматической линии) с виброуплотненным уран-плутониевым оксидным топливом в БН-600 и материаловедческих исследований твэлов подтвердили эффективность за-

ложенных технологических решений, однако для их полного обоснования и набора статистических данных требуется продолжение испытаний для получения массива облученных ТВС в количестве не менее 30.

Массовые испытания твэлов с виброуплотненным уран-плутониевым оксидным топливом в БОР-60 в сочетании с успешными испытаниями твэлов в БН-600, надежная работа установок опытно-исследовательского комплекса позволяют сделать вывод о реальной возможности использования твэлов с виброуплотненным оксидным топливом для создания безопасного, экономически выгодного уран-плутониевого топливного цикла на основе сухой технологии, а также утилизации как энергетического, так и оружейного плутония в ядерных реакторах.

УДК 621.039.542:621.039.548

ОПЫТ ИСПЫТАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЙ В БОР-60

*Маершин А.А., Цыканов В.А., Гаджиев Г.И., Головченко Ю.М., Корольков А.С.,
Голованов В.Н., Скиба О.В., Ефимов В.Н., Ваганов И.В., Кислый В.А.,
Косулин Н.С., Тейковцев А.А., Сюзев В.Н., Широкова Н.И. (ГНЦ РФ — НИИАР)*

Развитие быстрых реакторов предполагало обязательное достижение максимального коэффициента воспроизводства ($K_B \geq 1$) и использование высоких параметров энергетического цикла. Эти требования определили особенности технологических и конструктивных решений твэлов и ТВС, главными из которых являются высокая концентрация ядер делящихся и воспроизводящих изотопов в объеме активной зоны, применение топливных композиций и конструкционных материалов, обеспечивающих работу ТВС при большом энерговыделении и высокой температуре теплоносителя. С учетом этого, а также реального состояния технологии топливного цикла была принята последовательность изучения применения различных видов ядерного топлива, а именно:

оксидное топливо с $K_{BA} = 0,7-0,8$ и $K_B > 1$;

гетерогенные оксидно-металлические зоны для достижения $K_B = 1,5-1,6$ без изменения основного топлива;

перспективные виды топлива с повышенной концентрацией тяжелых атомов для достижения $K_{BA} = 1$ и $K_B > 1,3$.

В зонах воспроизводства гетерогенных вариантов рассматривается легированный и нелегированный уран. В качестве перспективных топливных композиций изучали карбидное, нитридное, металлическое топливо, а также кермет, в котором топливная часть в виде диоксида урана или плутония диспергирована либо в матрице из металлического урана, либо на основе инертных материалов. Химическая часть топливного цикла была ориентирована на традиционные водно-химические методы переработки отработавшего топлива.

Пересмотр концепции развития быстрых реакторов на современном этапе в сторону умеренной теплонапряженности, технологические достижения в области сухих методов переработки, а также полученные на сегодня научные результаты позволяют рассчитывать на существенное снижение стоимости топливной составляющей при реализации замкнутого цикла.

За последние годы проделана значительная работа по изучению работоспособности топливных композиций для активных зон и зон воспроизводства, включая и перспективные варианты. В таблице представлены перспективные топливные композиции, испытанные в реакторе БОР-60 за последние 30 лет.