

УДК 621.039.54

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТВЭЛОВ РЕАКТОРА ТИПА БРЕСТ СО СМЕШАННЫМ НИТРИДНЫМ УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ ТОПЛИВОМ, ОБЛУЧЕННЫХ В БОР-60 И БН-600

*Грачев А.Ф., Жеребцов А.А., Забудько Л.М. (ИТЦП «Прорыв», г. Москва),
Звир Е.А., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н. (АО «ГНЦ НИИАР, г. Димитровград»),
Скупов М.В., Иванов Ю.А. (АО «ВНИИНМ», г. Москва),
Поролло С.И. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)*

В рамках проекта «Прорыв» разработана комплексная программа расчетно-экспериментального обоснования твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом реакторов БН-1200 и БРЕСТ на период до 2020 г. На данной стадии поставлена задача обосновать начальный этап эксплуатации реакторных установок. Для БРЕСТ-ОД-300 это соответствует максимальному выгоранию топлива ~6% тяж. ат. с повреждающей дозой ~85 смещ./ат., для БН-1200 — 7,5% тяж. ат., ~95 смещ./ат.

Для обоснования работоспособности твэлов в БН-600 на облучение было поставлено 18 экспериментальных ТВС, из них завершено облучение 10 ТВС. Все твэлы сохранили герметичность. В горячей лаборатории АО «ГНЦ НИИАР» закончены послереакторные исследования семи ЭТВС. В реактор БОР-60 поставлены на облучение девять ЭТВС, продолжается облучение четырех. В горячей лаборатории АО «ГНЦ НИИАР» закончены послереакторные исследования одной из них.

Облучение экспериментальных ТВС в БН-600. В БН-600 обеспечиваются наиболее представительные условия испытаний топлива в части длительности облучения при постоянных рабочих параметрах, минимальном влиянии переходных режимов и вариации мощности. Для представительности испытаний твэлов реакторов типа БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 в части соответствия выгорания, скорости выгорания и дозы их размещают на периферии активной зоны и в экранной зоне. Это приводит к значительной радиальной неравномерности выгорания и повреждающей дозы по сечению ТВС. В реальной активной зоне БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 параметры облучения штатных твэлов имеют значительный диапазон в зависимости от места расположения ТВС. Таким образом, облучение в условиях значительного градиента энерговыделения по сечению позволяет обосновать работоспособность твэлов с разной линейной мощностью при требуемом выгорании. В БН-600

облучают комбинированные ТВС, которые содержат твэлы с нитридным и оксидным топливом, и экспериментальные с нитридными твэлами.

Подробная информация о составе экспериментальных ТВС БН-600 со смешанным нитридным топливом была представлена в комплексной программе [1]. Дополнительно к ней осенью 2017 г. в БН-600 была загружена ЭТВС-16, весной 2018 г. — ЭТВС-17 и ЭТВС-18 с твэлами типа БН-800 и оболочкой из стали ЭП-823-Ш. Каждая ТВС содержит 127 твэлов. В настоящее время завершены испытания и послереакторные исследования:

КЭТВС-1, -6 и -7 с твэлами штатной конструкции БН-600, в состав которых входят 4 твэла с нитридным и 123 штатных твэла с оксидным топливом;

КЭТВС-2 и ЭТВС-4 с твэлами типа БН-1200, в состав первой входят 4 твэла с нитридным и 57 твэлов со смешанным оксидным топливом, в состав второй — 61 твэл с нитридным топливом;

КЭТВС-3 и ЭТВС-5 с твэлами типа БРЕСТ, в состав первой 4 твэла со смешанным нитридным и 57 твэлов с оксидным урановым топливом, во второй — 61 твэл со смешанным нитридным топливом (табл. 1).

В 2018 г. без разгерметизации завершено облучение ЭТВС-8, -9 и -10 с твэлами типа БН-1200 и БРЕСТ, в каждой ТВС 61 твэл со смешанным нитридным топливом. Завершение послереакторных исследований запланировано на 2019 г.

Облучение экспериментальных ТВС в БОР-60. В настоящее время в активной зоне БОР-60 находятся три облучательных устройства с твэлами реактора типа БРЕСТ с оболочкой из стали ЭП-823-Ш: ОУ-2, -4 и -6. Твэлы ОУ-4 имеют свинцовый подслои. Максимальные параметры достигнуты в твэлах ОУ-2 — по состоянию на май 2018 г. максимальная повреждающая доза составила 74,8 смещ./ат., максималь-

Таблица 1. Параметры твэлов экспериментальных ТВС, облученных в БН-600

Тип твэла	Число микрокампаний	Максимальное выгорание, % тяж. ат.	Максимальная доза, смещ./ат.	Максимальная линейная мощность, кВт/м	Оболочка твэла		
					диаметр, мм	толщина, мм	материал
Твэл БН-800:							
КЭТВС-1	3	5,5	55	38	6,9	0,4	ЧС-68-ИД х.д.
КЭТВС-6	2	3,9	37,5	39	6,9	0,4	
КЭТВС-7	4	7,5	74	38	6,9	0,4	
Твэл БРЕСТ-300:							
КЭТВС-3	4	4,5	53	37,5	9,7	0,5	ЭП-823-Ш
ЭТВС-5	4	3,8	48	40	9,7	0,5	
ЭТВС-9	4	4	49	40	9,7	0,5	
Твэл БН-1200:							
КЭТВС-2	4	5	56,1	44	9,3	0,5	ЭК-164-ИД х.д.
ЭТВС-4	4	5	58	47	9,3	0,5	
ЭТВС-8	5	5,9	71	46,5	9,3	0,5	
ЭТВС-10	5	6	73,6	46,5	9,3	0,5	

ное выгорание топлива 5% тяж. ат. При достижении повреждающей дозы 58 смещ./ат. ОУ-2 была выгружена из активной зоны для замены шестигранного чехла, после чего вновь возвращена в активную зону для продолжения облучения. Аналогичная переоцехловка ОУ-4 была выполнена после достижения повреждающей дозы 55 смещ./ат. Твэлы всех выгруженных и облучаемых экспериментальных сборок БОР-60 сохранили герметичность.

Такие сложные манипуляции с облученными твэлами свидетельствуют о том, что прочность оболочек твэлов из стали ЭП-823-Ш сохраняется при облучении до дозы 74,8 смещ./ат. с учетом выгрузки, промежуточной отмычки, переоцехловки и повторной загрузки в реактор. При этом следует учитывать, что длительность микрокампаний в БОР-60 примерно в 2 раза короче, чем в БН-600, поэтому переходных режимов (выход на мощность, останов реактора) при одинаковом выгорании больше. Так, за время облучения ОУ-2 с июня 2013 г. по конец 2017 г. реактор имел более 30 остановов и повышения мощности. Условия облучения оболочек твэлов из стали ЭП-823-Ш в БОР-60 с точки зрения влияния низкотемпературного радиационного охрупчивания существенно хуже, чем в БН-600. Это связано с более низкой температурой натрия на входе в ТВС.

Положительные результаты облучения твэлов типа БРЕСТ в БОР-60 позволили получить разрешение на продление облучения ЭТВС-11 с твэлами типа БРЕСТ в БН-600, в которой в настоящее время достигнуто максимальное вы-

горание топлива более 6% тяж. ат., максимальная повреждающая доза более 70 смещ./ат. без разгерметизации твэлов.

Послереакторные исследования. Завершены послереакторные исследования двух твэлов, облученных в составе ОУ-1 БОР-60 до максимального выгорания 1,3% тяж. ат. с повреждающей дозой ~19 смещ./ат. и 3,2% тяж. ат. с повреждающей дозой 46 смещ./ат. Также завершены исследования твэлов, облученных в БН-600 в составе комбинированной экспериментальной ТВС-3 до максимального выгорания 4,5% тяж. ат. и ТВС-5 до максимального выгорания 3,8% тяж. ат. Сохранили герметичность все твэлы. Оболочки всех исследованных ТВС и ТВС за время облучения сохранили целостность и первоначальную форму, дефектов конструктивных элементов не выявлено.

Первые результаты исследований твэлов со смешанным нитридным топливом в составе ОУ-1 реактора БОР-60 и КЭТВС-1 реактора БН-600 выявили следующие особенности, которые были зафиксированы во всех исследованных твэлах с оболочкой из стали ЧС-68-ИД, ЭК-164-ИД х.д. и ЭП-823-Ш [2]:

большее увеличение длины твэлов и овальности оболочки, чем у твэлов с оксидным топливом;

более высокое коррозионное повреждение оболочки со стороны топлива;

снижение до нулевой пластичности оболочек из стали ЭП-823-Ш в нижней части твэла при испытаниях кольцевых образцов даже при низкой дозе (первый твэл ОУ-1);

Таблица 2. Основные результаты исследования твэлов ОУ-1, КЭТВС-3, ЭТВС-5 с нитридным топливом

Тип твэла	Максимальное выгорание, % тяж. ат.	Максимальная доза, смещ./ат.	Удлинение оболочки, мм	Глубина коррозии оболочки, мкм	Механические свойства
ОУ-1:					
твэл 1	1,3	18	3	100, нет азотирования	В кольцевых образцах выявлена область низкотемпературного радиационного охрупчивания материала, соответствующая нижней зоне топливного столба
твэл 7	3,2	46	3	50—60, есть слабое азотирование на глубину до 10 мкм в верхней области активной части	
КЭТВС-3:					
твэл 31	4,34	49,7	5,29	50	Оболочки всех твэлов показывают высокие прочностные свойства и достаточный запас пластичности
35	4,43	51,4	4,66	50	
26	4,54	53	0,98	170	
40	4,2	47,5	1,13	100	
ЭТВС-5:					
твэл 15	3,76	46,6	0,8	—	В кольцевых образцах выявлена область низкотемпературного радиационного охрупчивания материала, соответствующая нижней зоне топливного столба и верхней зоне нижнего газосборника
24	3,77	46,9	2,2	—	
28	3,69	45,2	0	—	
32	3,64	44,1	0	—	
33	3,78	47	1,7	50 — 60	
37	3,70	45,3	0	20 — 30	
42	3,78	47	1,2	30 — 40	
51	3,80	47,5	0	40 — 50	
				Коррозия локализована преимущественно на небольших участках по периметру оболочки, азотирование не обнаружено	В продольных сегментных образцах выявлен значительный запас прочности и пластичности материала во всех исследованных сечениях по длине оболочки твэла

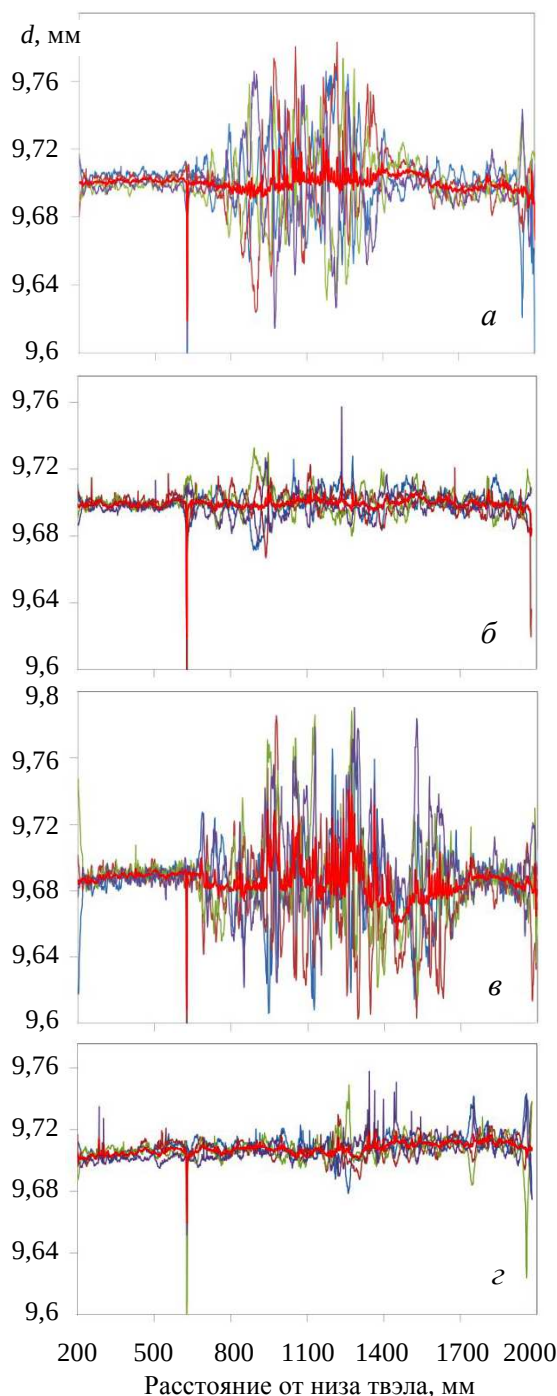
снижение до нулевой пластичности оболочки из стали ЧС-68-ИД в верхних частях твэлов при испытаниях кольцевых образцов (ТВС-1).

В табл. 2 приведены основные результаты послереакторных исследований твэлов ОУ-1, КЭТВС-3 и ЭТВС-5. В КЭТВС-3 облучали по два твэла, изготовленных в АО «СХК» и АО «ВНИИНМ». Все твэлы ЭТВС-5 изготовлены в АО «СХК», твэлы ОУ-1 — в АО «ВНИИНМ».

Формоизменение твэлов. Послереакторные исследования выявили взаимосвязь удлинения твэлов и овальности оболочек. На рис. 1 видно, что удлинились только твэлы 15 и 24 на 0,8 и 2,2 мм с мелкой локальной овальностью оболочек, зарегистрированной в виде многочисленных пиков на профилограммах в области топливного столба. Измерение длины и профилометрия твэлов показали, что четкой корреляции между формоизменением оболочек (удлинение, овализация), выгоранием нитридного топлива и повреждающей дозой нет. Возможной причиной этого может быть деформация обо-

лочки, главным образом, при выходе реактора на мощность при воздействии на нее фрагментированной таблетки.

В более холодном и плотном, чем оксидное, нитридном топливе в твэлах с увеличенным исходным зазором в условиях низкого выгорания топлива создаются условия для перемещения фрагментов топливных таблеток при выходе реактора на мощность. Перекося таблеток и последующее локальное нагружение оболочки, в том числе и через образующиеся мелкие топливные фрагменты приводят к ее овализации. Возникающая в этом случае неупругая деформация не ограничивает работоспособность твэлов, что подтверждает опыт облучения в эксперименте с максимальным выгоранием топлива 12,1% тяж. ат. Послереакторные исследования твэлов после двух этапов облучения показали, что с ростом выгорания в условиях плотного термомеханического взаимодействия топлива с оболочкой происходит снижение эллипсности оболочки [3]. Профилометрия твэлов КЭТВС-3



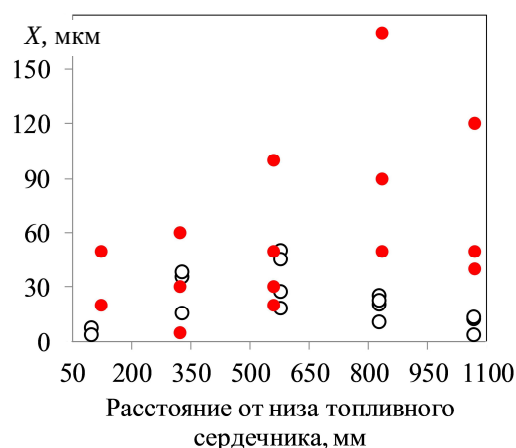
Р и с. 1. Профилограмма твэла 15 (а), 28 (б), 24 (в), 32 (г) ЭТВС-5

и ЭТВС-5 показала, что термомеханическое взаимодействие топлива с оболочкой может быть уменьшено до масштаба, характерного для твэлов с оксидным топливом, путем управления микроструктурой топливной таблетки, снижением исходного зазора в рамках технологических возможностей, введением фасок на таблетках. Запланированные изменения в технологии изготовления таблеток, прежде всего в режимы нитрирования порошка и спекания таблеток,

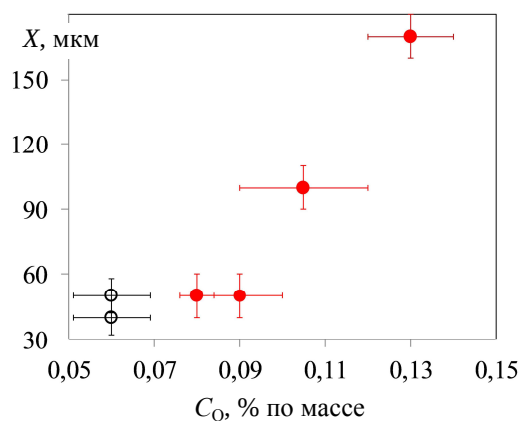
снизят овализацию оболочек и удлинение твэлов.

Коррозия оболочки. Анализ показал, что нет корреляции глубины коррозионного повреждения оболочки со стороны нитридного топлива с выгоранием и повреждающей дозой (рис. 2). Исследования коррозионного состояния оболочек из ферритно-мартенситной стали ЭП-823-III в КЭТВС-3 и ЭТВС-5 при разном исходном содержании кислорода в нитридном топливе позволили установить зависимость глубины коррозии от содержания кислорода и сформулировать требования к его ограничению на уровне $<0,1\%$ (рис. 3).

Механические свойства оболочки. Для стали ферритно-мартенситного класса характерно низкотемпературное радиационное охрупчивание, которое наблюдается в области рабочей температуры $280\text{—}460\text{ }^{\circ}\text{C}$ независимо от вида топлива. Наиболее отчетливо это проявилось в твэлах ОУ-1 реактора БОР-60, для кото-



Р и с. 2. Коррозия оболочек твэлов из стали ЭП-823-III в ЭТВС-5 (○) и КЭТВС-3 (●)



Р и с. 3. Зависимость глубины коррозии от содержания кислорода в твэлах ЭТВС-5 (○) и КЭТВС-3 (●)

Т а б л и ц а 3. Механические испытания образцов оболочки твэлов 26 и 31 КЭТВС-3

Вид образца	$T_{\text{обл}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{исп}}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\delta_0, \%$	$\delta_{\text{p}}, \%$
Твэл 26						
Кольцевой	380—400	380	624	702	4,7	3,3
		380	690	718	1,2	0,7
Продольный		380	597	713	6	3,6
		380	554	665	5,6	2,9
Кольцевой	435—445	440	459	471	1,3	0,6
Продольный		440	542	560	0,9	0,5
Кольцевой	485—495	490	471	542	2,2	1
		490	342	452	3	2,5
Продольный	580	490	504	588	3,8	2,5
Кольцевой		490	475	579	2,4	2,1
		580	392	419	7,5	2,3
		580	381	442	9,1	4
Твэл 31						
Продольный	380—400	20	697	797	4	3,1
		380	633	777	5,5	3,5
Продольный	435—445	20	743	870	5,5	5,1
		440	483	593	5,3	3,4
Кольцевой	485—495	20	746	811	1,2	2,5
		20	757	839	3	4,3
		20	727	852	3,1	4,1
Продольный		490	530	434	3,3	2,6
		490	536	670	8,7	4,8
Кольцевой	580	20	777	914	4,1	2,9
		20	810	950	4,7	3,5
		20	799	894	4,1	2,6
		580	390	406	13,7	1,4
		580	415	437	12,6	1,9
		580	427	443	8,9	1,3

рого характерна низкая температура теплоносителя на входе и соответственно низкая температура оболочки. В этом случае на кольцевых образцах зафиксирована нулевая пластичность. Однако представительные для фактических условий эксплуатации оболочек твэлов механические испытания с применением продольных сегментных образцов свидетельствуют о значительном запасе прочности и пластичности материала во всех исследованных сечениях по длине оболочки твэла (см. табл. 2).

Механические свойства оболочки твэлов КЭТВС-3 также свидетельствуют о достаточном запасе работоспособности при достигнутых параметрах облущения (табл. 3).

Газовыделение и распухание топлива. Важными параметрами, определяющими работоспособность твэлов с нитридным топливом, являются наработка и выход газообразных продуктов деления и гелия под оболочку, а также распухание топлива. Объем при нормальных условиях и состав газа в свободном объеме твэ-

лов определяли с помощью установки лазерного прокола и масс-спектрометрического анализа (табл. 4, 5). Близкие отношения Хе/Кг в разных твэлах при одинаковом изотопном составе делящихся компонентов косвенно подтверждают правильность полученных результатов.

Как следует из табл. 5, количество газообразных продуктов деления под оболочкой твэлов мало, сравнение их объема с оценкой наработанного количества показывает, что выход из топлива в разных твэлах составляет 1,3—5,6%. Низкий выход соответствует атермическому механизму газовойделения на начальном этапе эксплуатации при низкой температуре топлива. Разный выход газообразных продуктов деления может быть связан с особенностями исходных характеристик партий топлива, влияющих на атермический выход, например, с различной степенью фрагментации и разным количеством микротрещин.

Выход криптона и ксенона из топлива двух твэлов ОУ-1 в целом соответствует ожидаемому

Т а б л и ц а 4. Объем и состав газовой фазы в твэлах ЭТВС-5

Номер твэла	Свободный объем, см ³	Объем газа при н.у., см ³	Давление газа, МПа	Состав газовой фазы, % по объему						
				He	N ₂	O ₂	Ar	CO ₂	Kr	Xe
32	63	75,2	0,12	82,94	0,404	0,008	0,041	0,011	1,205	15,39
51	62,3	79	0,13	79,18	0,314	0,004	0,032	0,006	1,513	18,95
33	62	75,3	0,12	81,51	0,324	0,01	0,009	0,004	1,355	16,79
42	60,3	91,8	0,15	69,96	0,359	0,014	0,047	0,007	2,21	27,4
37	63	82,5	0,13	76,05	0,181	0,009	0,021	≤0,004	1,745	21,99
28	62,4	94,3	0,15	70,04	0,217	0,004	0,019	≤0,004	2,18	27,53
24	61,7	68,4	0,11	85,24	0,182	0,01	0,014	≤0,004	1,078	13,47
15	60	62,9	0,11	89,67	0,092	0,005	0,021	≤0,04	0,748	9,46

Т а б л и ц а 5. Объем газов в твэлах ЭТВС-5, см³

Номер твэла	He	Kr	Xe	Xe/Kr
32	62,4	0,9	11,6	12,8
51	62,6	1,2	15	12,5
33	61,4	1	12,6	12,4
42	64,2	2	25,2	12,4
37	62,7	1,4	18,1	12,6
28	66	2,1	26	12,6
24	58,3	0,7	9,2	12,5
15	56,4	0,5	6	12,6

и согласуется с выходом под оболочку твэлов КЭТВС-1 и -6. Эти результаты также совпадают с данными реактора БР-10 и зарубежными, согласно которым скорость выхода газообразных продуктов деления увеличивается с выгоранием, заметный рост газовой выделенности наблюдается после достижения инкубационного периода, зависящего от температуры топлива. Для всех твэлов с нитридным топливом отмечаются по-

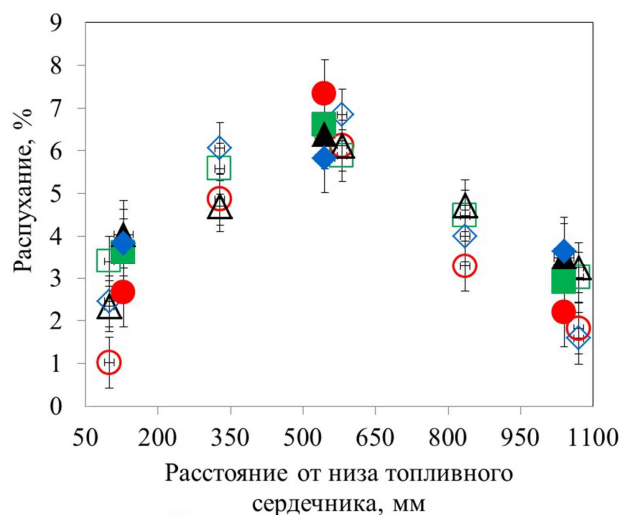
вышенная наработка гелия и его выход под оболочку, что должно учитываться при обосновании работоспособности.

Обобщенные данные о скорости набухания смешанного нитридного топлива ОУ-1, КЭТВС-3 получены методом гидростатического взвешивания (табл. 6). Результаты планиметрии топлива в данном случае не использовали, поскольку растрескивание таблеток приводит к большей погрешности в определении набухания топлива. При облучении температура топлива существенно изменяется, соответственно и скорость набухания на разных этапах облучения. Температуру топлива рассчитывали с помощью кода ДРАКОН для двух вариантов геометрии твэла: увеличенный с учетом допуска исходный зазор между топливом и оболочкой и номинальный размер зазора.

Приведенное в табл. 6 набухание усреднено по радиусу таблетки в разных сечениях по высоте и времени (по выгоранию).

Т а б л и ц а 6. Усредненная во времени скорость набухания нитридного топлива в твэлах ОУ-1, КЭТВС-3

ТВС	Максимальная температура топлива, °С				Максимальное выгорание, % тяж. ат.	Максимальное распухание, %	Скорость распухания по высоте топливного сердечника, %/ % тяж. ат.
	Начало облучения		Конец облучения				
КЭТВС-3, зазор: увеличенный номинальный	1282	1136	1368	1136	4,54 4,43	9	2,1, низ 2,1, центр 1,65, верх
ОУ-1, зазор: твэл 1 номинальный	1260		1300		1,3		1,74, центр 1,04, верх
твэл 7 увеличенный номинальный	1345	1300	1450	1398	3,2	8,8	1,5, низ 2,8, центр 1,9, верх



Р и с. 4. Осевое распухание нитридного топлива по высоте топливного столба в ТВЭлах 32 (○, ●), 37 (△, ▲), 42 (◇, ◆), 52 (□, ■) ЭТВС-5, определенное по планиметрии и плотности соответственно

Максимальное распухание смешанного нитридного топлива в ТВЭлах ЭТВС-5 составляет $7,3 \pm 0,8\%$, что соответствует скорости распухания $2,0 \pm 0,2\%$ на 1% тяж. ат. выгорания по измерению диаметра и плотности таблеток (рис. 4).

Следует отметить, что во всех исследованных ТВЭлах ОУ-1, КЭТВС-3, ЭТВС-5 зазор меж-

ду топливом и оболочкой не выбран, что соответствует свободному распуханию топлива. Для всех исследованных ТВЭлов максимальное распухание и максимальная скорость распухания отмечаются в сечениях, близких к сечению максимального энерговыделения.

Таким образом, послереакторные исследования семи экспериментальных ТВС БН-600 и одной ТВС БОР-60 показали, что ТВЭлы герметичны. Максимальная повреждающая доза ТВЭлов с оболочкой ЭП-823-Ш ~ 75 смещ./ат., выгорание 5% тяж. ат. достигнуто в ОУ-2 БОР-60.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Троянов В.М., Грачев А.Ф., Забудько Л.М. и др. Программа и некоторые результаты реакторных испытаний смешанного нитридного топлива в быстрых реакторах. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 2, с. 75—79.
2. Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Глушенков А.Е. и др. Исследования смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в рамках проекта «Прорыв». — Там же, 2017, т. 122, вып. 3, с. 156—167.
3. Рогозкин Б.Д., Степеннова Н.М., Федоров Ю.Е. и др. Результаты испытаний смешанного мононитридного топлива $45\%PuN + 55\%UN$ и $60\%PuN + 40\%UN$ в реакторе БОР-60 до выгорания $\sim 12\%$ тяж. ат. — Там же, 2011, т. 110, вып. 6, с. 332—346.

Поступила в Редакцию 20.09.18

УДК 621.039

УСТАНОВКА КАРБОТЕРМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА НИТРИДОВ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СМЕШАННОГО НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА

Смирнов В.П., Павлов С.В., Иванов Д.В., Шамсутдинов Р.Н. (ООО НПФ «Сосны», г. Димитровград),
Инютин Н.В., Сидоренко Д.М., Солопеко А.В. (ООО НПО «ГКМП», г. Брянск), Сайфутдинов С.Ю.
(АО «ТВЭЛ», г. Москва), Давыдов А.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва), Чамовских Ю.В., Сергеев Н.Г.
(АО «СвердНИИХиммаш», г. Екатеринбург), Зозуля Д.В. (АО «СХК», г. Северск)

Один из вариантов замыкания ядерного топливного цикла (ЯТЦ) предполагает использование смешанного нитридного уран-плутониевого топлива в быстрых реакторах. В рамках проекта «Прорыв» на площадке АО «Сибирский химический комбинат» создается Опытно-демонстрационный энергетический комплекс (ОДЭК) для отработки технологий замкнутого ЯТЦ [1]. Топливо для реакторной установки БРЕСТ-ОД-300, входящей в состав ОДЭК, будет изготавливаться на базе модуля фабрики/рефабрикации с использованием

как ранее наработанного плутония, так и плутония, полученного в процессе эксплуатации (рис. 1).

Нитрид урана и плутония синтезируют по карботермической технологии восстановления металлов из оксидов с одновременным нитрированием [2—6]. На первом этапе порошки UO_2 и PuO_2 смешивают, добавляют углерод и стеарат цинка. Из полученной шихты прессуют шашки диаметром 18—20 мм, высотой 3—5 мм и массой 7—9 г. Содержание UO_2 и PuO_2 составляет 85 и 15% соответственно. Полученные шашки