

Заключение. Наличие в трехгранных ячейках перемешивающей решетки для ТВС двух отогнутых лопаток вместо одной способствует одновременному образованию в канале поперечных течений с двумя противоположными направлениями. Это приводит к повышению эффективности перемешивания теплоносителя. При опоре одной лопатки на другую создается более устойчивая структура к их деформации при образовании внешнего воздействия.

Для оценки эффективности использования модернизированной перемешивающей решетки в ТВС ВВЭР необходимы опыты по кризису теплообмена.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Расчетно-экспериментальные исследования массообмена потока теплоносителя в ТВСА реакторов типа ВВЭР при использовании перемешивающих решеток. — В сб.: 6-я научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 26—30 мая 2009 г., ОКБ «Гидропресс», доклад 128.
2. Пометько Р.С., Селиванов Ю.Ф. Результаты исследований кризиса теплообмена и перемешивания теплоносителя применительно к реакторам ВВЭР. — В сб.: 3-я научно-технич. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 26—30 мая 2003 г., ОКБ «Гидропресс», т. 5, с. 153—162.
3. Иванов А.В., Сенин И.С., Цирин С.И. и др. Структура пластинчатой решетки для тепловыделяющей сборки. Пат. № 2581620 С1. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2016, № 11 (электронная версия).
4. Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А., Хробостов А.Е. Исследования эффективности перемешивания и массообмена потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР при использовании перемешивающих решеток типа «закрутка вокруг твэла». — В сб.: «Теплогидравлические аспекты безопасности активных зон, охлаждаемых водой и жидкими металлами». Обнинск, 15—17 октября 2008 г., ГНЦ РФ — ФЭИ, с. 96—104.
5. Бородин С.С., Дмитриев С.М., Легчанов М.А. и др. Исследования локального массообмена теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР при использовании перемешивающих решеток типа «порядная прогонка». — Там же, с. 105—110.

Поступила в Редакцию 25.12.18

УДК 621.039.531

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ТВЭЛОВ БН-600 СО СМЕШАННЫМ НИТРИДНЫМ УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ ТОПЛИВОМ И ОБОЛОЧКОЙ ИЗ СТАЛИ ЧС68-ИД х.д.

Грачев А.Ф., Забудько Л.М. (ИТЦП «Прорыв», г. Москва),

Иванов Ю.А., Скупов М.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва),

Звир Е.А., Крюков Ф.Н., Никитин О.Н. (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград),

Мариненко Е.Е., Поролло С.И. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)

e-mail:info@propyv2020.ru

Одной из задач проекта «Прорыв» является обоснование работоспособности твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200 [1]. В связи с ограниченным опытом облучения таких твэлов в быстрых реакторах в БН-600 в целях безопасности испытаний в экспериментальную ТВС включили четыре твэла с нитридным топливом, остальные 123 штатных твэла имели урановое оксидное топливо. Конструкция первых твэлов со смешанным нитридным топливом для испытания в БН-600 сохранила штатную геометрию и штатный материал оболочки ЧС68-ИД х.д. Данный тип испытаний не является полностью представительным для твэлов реакторов БРЕСТ и БН-1200 как по их геометрии, так и параметрам облучения, в первую очередь, скорости вы-

горания смешанного нитридного топлива. Однако такие испытания позволяют в короткие сроки получить данные о набухании смешанного нитридного топлива и газовыделении в зависимости от температуры топлива при разном выгорании, а также о коррозионной совместимости топлива с оболочкой. Всего для облучения в активной зоне БН-600 были изготовлены три комбинированные экспериментальные ТВС с твэлами штатной геометрии — КЭТВС-1, -6, -7. В настоящее время завершены облучение и послереакторные исследования твэлов. В настоящей статье представлены основные результаты исследований.

Геометрия и параметры облучения твэлов. Конструкция твэлов КЭТВС-1 характеризуется увеличенным исходным зазором между

топливными таблетками и оболочкой $0,3^{+0,1}$ мм [2]. Это было обусловлено необходимостью гарантированного при облучении свободного распухания смешанного нитридного топлива в отсутствие жесткого контактного взаимодействия с оболочкой и получения корректных данных о зависимости скорости распухания от выгорания и температуры топлива. Кроме того, предполагали, что более поздний контакт топлива с оболочкой с увеличенным исходным зазором повысит работоспособность твэлов. Все остальные твэлы с нитридным топливом были изготовлены с номинальным диаметральной зазором 0,2 мм (табл. 1). Послереакторные исследования показали, что все твэлы сохранили герметичность при фактических параметрах облучения (табл. 2).

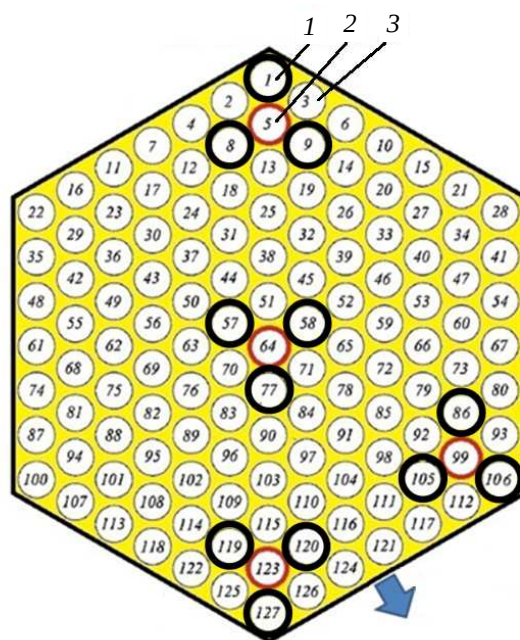
Т а б л и ц а 1. Характеристики твэлов с оболочкой из стали ЧС68-ИД х.д.

Параметр	Твэл с нитридным топливом		Твэл с диоксидным топливом
	КЭТВС-1	КЭТВС-6, -7	КЭТВС-1, -6, -7
Диаметр оболочки, мм:			
наружный	6,9	6,9	6,9
внутренний	6,1	6,1	6,1
Диаметр таблетки, мм	5,8	5,9	5,95
Диаметральный зазор между топливом и оболочкой, мм	0,3	0,2	0,15

Т а б л и ц а 2. Параметры облучения твэлов с нитридным топливом

Параметр	КЭТВС-1	КЭТВС-6	КЭТВС-7
Длительность облучения, число микрокампаний	3	2	4
Максимальное выгорание топлива, % тяж. ат.	5,5	3,9	7,5
Максимальная повреждающая доза, смещ./ат.	55	37,5	73,6
Максимальная линейная мощность, кВт/м	38	39,3	38

Схема расположения четырех твэлов со смешанным нитридным топливом с ориентацией относительно центра активной зоны на примере КЭТВС-1 показана на рис. 1.



Р и с. 1. Картограмма расположения твэлов в КЭТВС-1: 1, 2 — исследованные твэлы с оксидным и нитридным топливом соответственно; 3 — штатные твэлы с оксидным топливом (→ — ориентация КЭТВС по направлению к центру активной зоны)

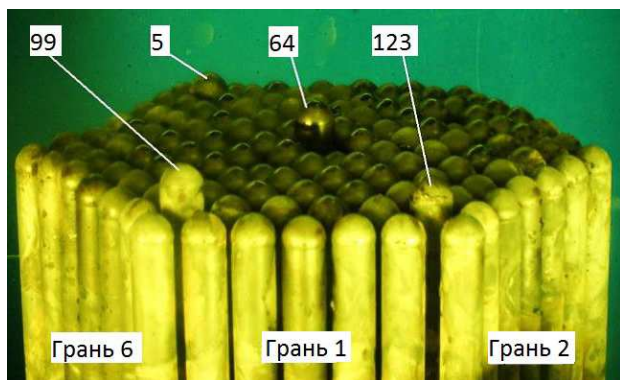
Неразрушающие послереакторные исследования. В каждой КЭТВС неразрушающими методами были исследованы все четыре твэла со смешанным нитридным, а также соседние с диоксидом урана — 12 твэлов в КЭТВС-1 и по 4 твэла в КЭТВС-6, -7. По результатам визуальной инспекции механических дефектов на поверхности твэлов, дефектов сварных швов, разрыва дистанционирующей проволоки не обнаружено. Вихретоковая дефектоскопия свидетельствует об отсутствии повреждений оболочек, которые могли бы существенно повлиять на работоспособность твэлов. Гамма-спектрометрическое исследование показало наличие криптона в газосборниках всех исследованных твэлов, что свидетельствует о герметичности оболочек твэлов, и разное соотношение пиков ^{85}Kr и ^{58}Co в твэлах с разным топливом, что свидетельствует о более высоком выходе газообразных продуктов деления из оксидного топлива по сравнению с нитридным. Гамма-сканирование показало, что распределение плутония в твэлах с нитридным топливом равномерно по высоте, осевого массопереноса нет, температура обоих видов топлива недостаточна для миграции твердых продуктов деления. Миграция цезия свидетельствует о более высокой температуре сер-

дечника в твэле с оксидным топливом по сравнению с нитридным.

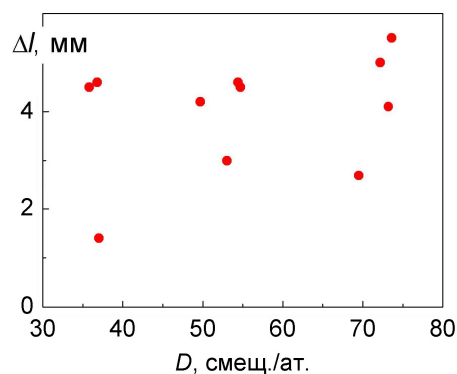
Рентгеновской радиографией твэлов зафиксированы хорошо различимые таблетки активной зоны и торцевых экранов, зазоры между оболочкой и таблетками, закладные детали. Каких-либо аномалий в состоянии твэлов не выявлено. Важной особенностью состояния топливного столба твэлов с нитридным топливом является эксцентричное расположение некоторых топливных таблеток относительно их центральной оси. В твэлах КЭТВС-1 имеются места как с наличием, так и с отсутствием зазора (или зазоры меньше предела разрешения данным методом) между таблетками и оболочкой. Во всех твэлах КЭТВС-6 хорошо различимы зазоры между оболочкой и таблетками, по длине активной части всех твэлов КЭТВС-7 имеются участки, где зазор топливо—оболочка не обнаруживается, и участки, где зазор сохранился.

Первичными исследованиями КЭТВС-1, -6, -7 установлено, что длина твэлов со смешанным нитридным топливом больше (рис. 2). Впервые разница в увеличении длины твэлов с нитридным топливом и повышенная локальная овализация оболочки по сравнению с соседними твэлами с оксидным топливом были зафиксированы в КЭТВС-1 [2]. Для остальных сборок это явление подтвердилось. Как показал анализ, удлинение твэлов не зависит от выгорания и повреждающей дозы (рис. 3).

Профилометрия твэлов всех КЭТВС показала, что максимальное увеличение диаметра твэлов со смешанным нитридным топливом меньше, чем твэлов с урановым оксидным топливом. В твэлах с нитридным топливом обнаружены

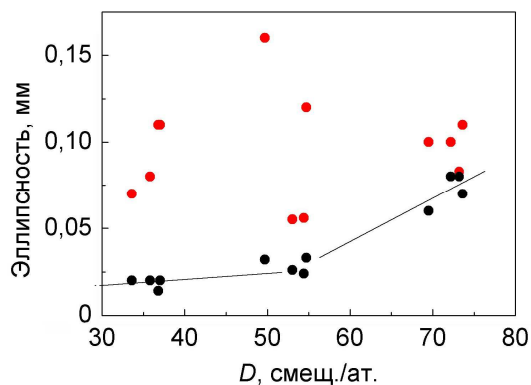


Р и с. 2. Верхний торец КЭТВС-7 после облучения (цифры — номер твэла с нитридным топливом)



Р и с. 3. Увеличение длины нитридных твэлов КЭТВС-1, -6, -7 в зависимости от повреждающей дозы после вычета удлинения вследствие вакансионного распухания оболочки

многочисленные локальные овализации оболочек на всей длине топливного сердечника. Видно, что размер и характер дозовой зависимости эллипсности двух типов твэлов существенно различны (рис. 4). В твэлах с оксидным топливом зафиксирована начальная стадия механического взаимодействия твэлов в пучке, который сдерживается нераспухающим шестигранным чехлом из стали ЭП-450-III. Такой тип эллипсности является характерным для оболочек твэлов из аустенитной стали. Эллипсность оболочек возрастает с ростом повреждающей дозы, что было показано при исследовании штатных твэлов БН-600. Твэлы с нитридным топливом показывают более высокую эллипсность, чем соседние с оксидным топливом. При этом дозовая зависимость почти отсутствует. Следует отметить достаточно большой разброс эллипсности оболочек твэлов с нитридным топливом, в особенности твэлов КЭТВС-1 с максимальным исходным зазором между топливом и оболочкой.

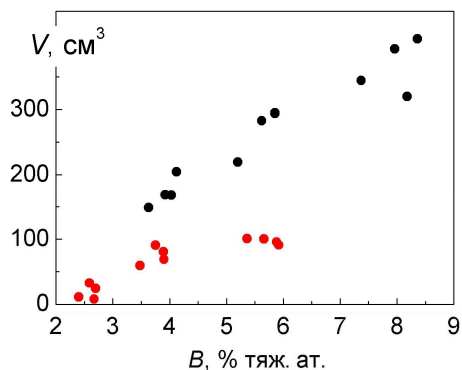


Р и с. 4. Дозовая зависимость эллипсности твэлов КЭТВС-1, -6, -7 со смешанным нитридным (●) и урановым оксидным топливом (●)

Сравнительный анализ профилометрии твэлов со смешанным нитридным топливом КЭТВС-1, -2, -3, -6 БН-600, ОУ-1 БОР-60, эксперимента с максимальным выгоранием 12,1% тяж. ат, а также твэлов, облученных в реакторе Дзёё (Япония), показал, что увеличенная овализация характерна для всех твэлов с оболочкой из стали как аустенитного, так и ферритно-мартенситного класса [2—5].

Измерения количества и состава газовой фазы под оболочкой твэлов КЭТВС-1, -6, -7 подтвердили их герметичность, зафиксировали меньший выход газообразных продуктов деления из смешанного нитридного топлива по сравнению с топливом из диоксида урана, что коррелирует с содержанием ^{85}Kr в газосборниках твэлов методом гамма-спектрометрии. Газ под оболочками твэлов, в основном, состоит из двух продуктов деления (ксенона и криптона), а также гелия, который образуется в нитридном топливе в результате ядерных реакций на атомах азота. Содержание остальных газов O_2 , N_2 , CO_2 , Ar незначительно. Заметное газовыделение из смешанного нитридного топлива начинается при выгорании свыше 2% тяж. ат., но уже при выгорании 4% тяж. ат. наблюдается тенденция к насыщению (рис. 5). При этом в целом газовыделение из смешанного нитридного топлива значительно меньше, чем из штатного оксидного, облученного в схожих условиях.

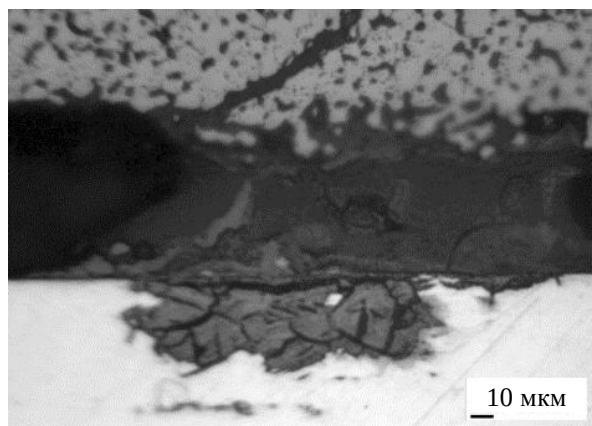
Материаловедческие исследования. Как показывают металлографические и планиметрические исследования, во всех сечениях исследованных твэлов с нитридным топливом КЭТВС-1 и -6 имеется зазор между топливом и оболочкой. По данным планиметрии твэлов КЭТВС-7 в



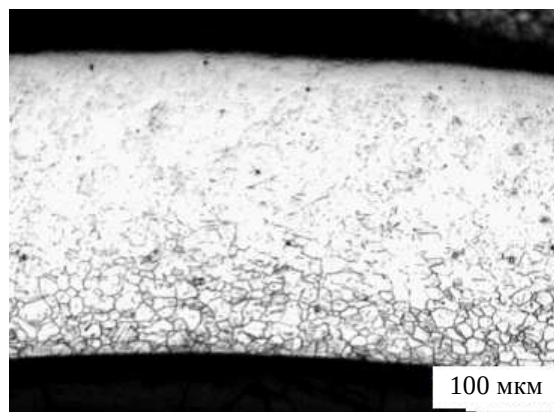
Р и с. 5. Зависимость выхода газа под оболочку из твэлов со смешанным нитридным (●) и урановым оксидным топливом (●) КЭТВС-1, -6, -7 от выгорания

центральных сечениях трех твэлов № 64, 99, 123 зазоры выбраны. По результатам исследований можно выделить четыре основных вида коррозионного воздействия на оболочку со стороны топлива, а именно поверхностную и подповерхностную язвенную коррозию, повышенную травимость границ зерен, а также азотирование и науглероживание внутренней поверхности (рис. 6, 7). Максимальная глубина язвенной коррозии наблюдается в твэлах КЭТВС-1, минимальную степень язвенного коррозионного повреждения имеют твэлы КЭТВС-7. Глубина зоны повышенной травимости не столь заметно различается для твэлов разных КЭТВС: 160 (КЭТВС-6), 200 (КЭТВС-7) и 240 мкм (КЭТВС-1). Глубина азотирования оболочки незначительная и находится в пределах 10—20 мкм. Науглероживание оболочки на максимальную глубину 60 мкм обнаружено лишь на твэлах КЭТВС-7 с максимальным выгоранием.

Наименьшая степень язвенной коррозии твэлов с максимальным выгоранием не совсем



Р и с. 6. Вид язвенной коррозии на внутренней поверхности оболочки твэла № 64 КЭТВС-7

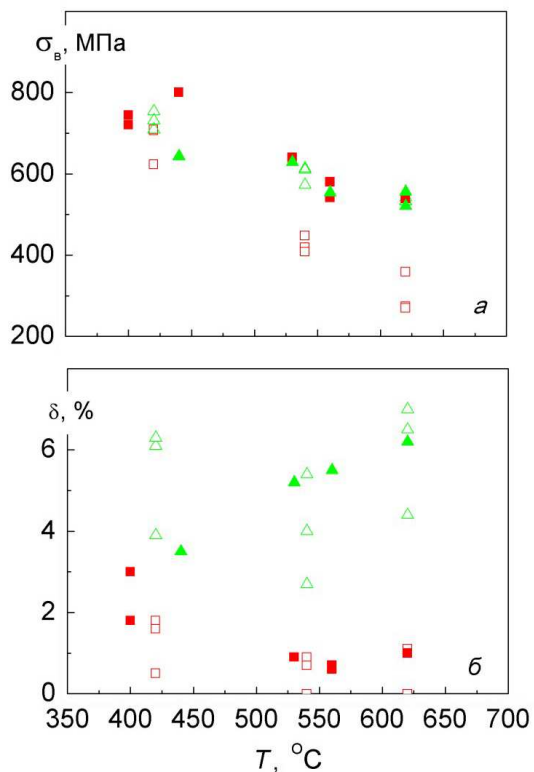


Р и с. 7. Повышенная травимость границ зерен со стороны внутренней поверхности оболочки твэла № 99 КЭТВС-6

понятна. Топливные таблетки по содержанию примесей, плотности и др. близки. Возможной причиной повышенной язвенной коррозии твэлов КЭТВС-1 может быть более высокая температура топлива, связанная с увеличенным зазором между топливом и оболочкой. Расчеты с использованием кода ДРАКОН показывают, что максимальная температура топлива в КЭТВС-1 на $\sim 100^\circ\text{C}$ выше, чем в твэлах КЭТВС-6, -7. Возможной причиной снижения коррозии могло быть также совершенствование технологии изготовления топливных таблеток [6]. Изготовление твэлов КЭТВС-1 со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом — первый отечественный опыт изготовления полномасштабных твэлов БН-600.

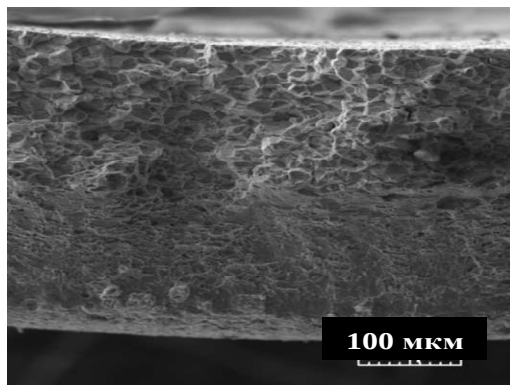
Электронно-зондовые исследования состава и распределения химических элементов в зоне коррозии твэлов КЭТВС-6, -7 для выяснения причин и механизмов явления подтвердили ранее полученные при исследовании твэлов КЭТВС-1 результаты. Основная закономерность в составе продуктов коррозии во всех твэлах — наличие кислорода и отличающееся от состава хромоникелевой стали содержание основных компонентов: повышенное содержание хрома и пониженное железа и никеля. Указанная закономерность позволяет сделать вывод об окислительной природе коррозии.

Проведенные ранее исследования твэлов КЭТВС-1, -6 показали, что кратковременные механические свойства оболочек твэлов с нитридным по сравнению с оксидным топливом, облученных в одинаковых условиях, хуже. Различие заключается в снижении прочности и пластичности оболочек в средней и верхней частях твэлов. Такое различие связывается со значительным коррозионным повреждением оболочки, которое наблюдалось для твэлов со смешанным нитридным топливом. При этом оболочки твэлов КЭТВС-6 по сравнению с КЭТВС-1 показали более высокие механические характеристики. Это, по всей видимости, связано с облучением до более низкой повреждающей дозы 37 смещ./ат. твэлов КЭТВС-6 по сравнению с 53 смещ./ат. твэлов КЭТВС-1, а также с более низкой температурой испытания образцов из верхних сечений твэлов (640 вместо 670°C). Механические испытания оболочек твэлов КЭТВС-7 подтвердили ранее полученные результаты (рис. 8).



Р и с. 8. Зависимость предела прочности (а) и относительного удлинения (б) продольного образца оболочки твэла № 64 с нитридным ($\square$) и № 71 с оксидным топливом ($\triangle$), кольцевого образца оболочки твэла № 64 с нитридным ($\blacksquare$), № 71 с оксидным топливом ($\blacktriangle$) КЭТВС-7 от температуры облучения/испытания

Фрактографические исследования образцов после механических испытаний показали хрупкий межкристаллитный характер излома с внутренней поверхности оболочки на глубину ~ 200 мкм (рис. 9). Это совпадает с данными о наличии зоны повышенной травимости границ зерен в этой области. В оболочках твэлов с оксидным топливом, облученных в таких же условиях, подобных явлений не наблюдается. Таким



Р и с. 9. Зона хрупкого межкристаллитного разрушения образца со стороны внутренней поверхности оболочки твэла со смешанным нитридным топливом

образом, можно предположить, что основной причиной различия механических свойств является межзеренное повреждение внутренней поверхности оболочек ТВЭлов с нитридным топливом.

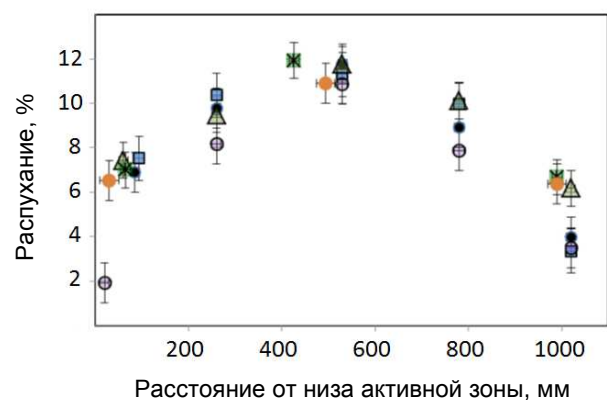
Сравнение механических свойств кольцевых образцов показало, что увеличение повреждающей дозы не привело к заметному изменению прочностных свойств оболочек ТВЭлов КЭТВС-7. При этом пластические характеристики оболочек КЭТВС-6 были выше.

Распухание смешанного нитридного топлива оценивали двумя способами: по изменению плотности методом гидростатического взвешивания и диаметра топливных таблеток (планиметрические измерения). Несмотря на сравнительно большую погрешность измерения распухания по плотности, связанную, в основном, с разбросом данных об исходной в разных партиях топлива, полученные двумя методами данные имеют хорошее совпадение и отражают закономерности изменения свободного распухания по высоте топливного столба в известных условиях облучения (рис. 10).

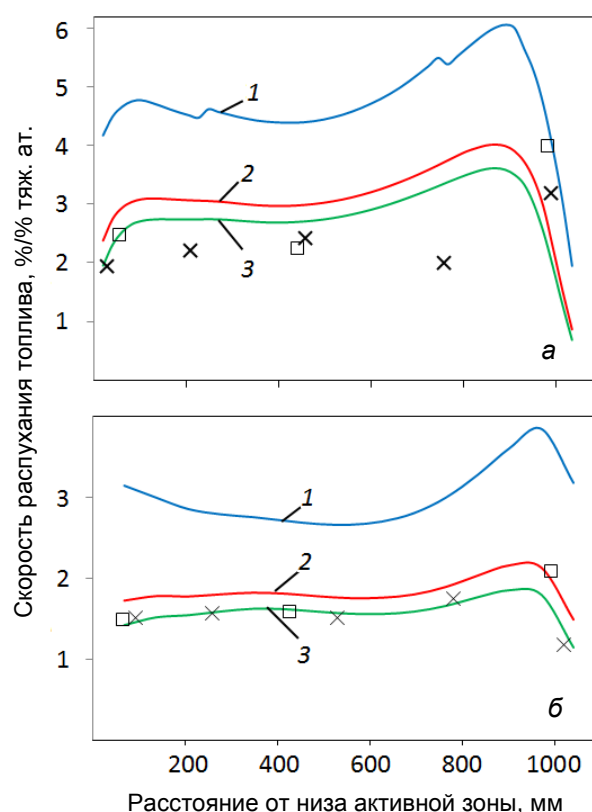
На рис. 11 на примере КЭТВС-1, -7 показана экспериментальная и расчетная по коду ДРАКОН скорость распухания смешанного нитридного топлива [6]. В расчетном обосновании рассмотрены три варианта:

максимальный зазор между топливом и оболочкой в пределах допусков на таблетку и оболочку, минимальная плотность топливной таблетки;

минимальный зазор между топливом и оболочкой в пределах допусков на таблетку и обо-



Р и с. 10. Распухание смешанного нитридного топлива в ТВЭле № 99 (■), № 123 (●) КЭТВС-7 по гидростатическому взвешиванию, в ТВЭле № 5 (○), № 64 (●), № 99 (■), № 123 (Δ) по планиметрии



Р и с. 11. Экспериментальная по данным планиметрии (x) и гидростатическому взвешиванию (□) и расчетная с помощью кода ДРАКОН с максимальным зазором и минимальной плотностью (1), с номинальными геометрическими параметрами и плотностью (2) и минимальным зазором и максимальной плотностью скорость распухания (3) смешанного нитридного топлива ТВЭла № 123 КЭТВС-1 (а) и КЭТВС-7 (б)

лочку, максимальная плотность топливной таблетки;

номинальные геометрические параметры и плотность.

Для всех трех КЭТВС наблюдается удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных для второго и третьего вариантов параметров. Для КЭТВС-1 максимальная скорость распухания смешанного нитридного топлива наблюдается в верхних сечениях топливного столба с максимальной температурой в конце облучения (см. рис. 11, а).

Для КЭТВС-6 в отличие от КЭТВС-1 максимальная скорость распухания нитридного топлива наблюдалась в центральных сечениях топливного столба. По-видимому, это связано с более низкой температурой и с менее значительным изменением ее первоначального осевого распределения: максимальная температура топлива в начале облучения в КЭТВС-6 на

~150 °С ниже, чем в КЭТВС-1, в конце облучения, наоборот, на ~80 °С выше, в центральном сечении твэла КЭТВС-1 максимальная температура топлива снизилась на ~650 °С, в КЭТВС-6 — на ~320 °С. Характер изменения температуры обусловлен разным выгоранием топлива и соответствующим изменением проводимости зазора топливо—оболочка. В КЭТВС-7 максимальная скорость распухания наблюдается в верхних сечениях топливного столба с максимальной температурой в конце облучения (см. рис. 11, б). Для нитридного топлива КЭТВС-7, в основном, характерна более низкая скорость распухания (менее 2%/ % тяж. ат.), чем в КЭТВС-1, -6, причем не только экспериментальная, но и расчетная. Это подтверждает наличие плотного контактного взаимодействия топлива с оболочкой в КЭТВС-7, приводящего к снижению скорости газового распухания (табл. 3).

Таблица 3. Распухание смешанного нитридного топлива

Параметр	КЭТВС-1	КЭТВС-6	КЭТВС-7
Максимальная температура топлива, °С:			
начало кампании	1650	1499	1504
конец кампании	1353	1435	1189
Максимальное выгорание, % тяж. ат.	5,5	3,9	7,5
Максимальное распухание, %	13,6	10,5	11,9
Скорость распухания, %/ % тяж. ат.	1,83—4,0	0,8—2,7	1,2—2,2

Выводы. Послереакторные исследования комбинированных экспериментальных ТВС подтвердили работоспособность твэлов со смешанным нитридным топливом до максимального выгорания 7,5% тяж. ат. Сравнительный анализ позволил установить общие закономерности поведения при облучении твэлов со смешанным

нитридным топливом и оболочкой из аустенитной стали ЧС68-ИД х.д. Результаты испытаний послужили основанием для начала облучения в БН-600 экспериментальных ТВС, которые полностью укомплектованы твэлами со смешанным нитридным топливом в конструктивном исполнении, близком к конструкции твэлов реакторов БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200. Облучение таких ТВС необходимо для получения статистически достоверного массива данных о радиационных характеристиках используемого смешанного нитридного топлива с оболочкой из стали ЭП-823 и ЭК-164.

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. Грачев А.Ф., Забудько Л.М., Звир Е.А. и др. Результаты исследований твэлов типа БРЕСТ со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, облученных в БОР-60 и БН-600. — Там же, 2018, т. 125, вып. 5, с. 278—284.
4. Рогозкин Б.Д., Степеннова Н.М., Федоров Ю.Е. и др. Результаты испытаний смешанного моноснитридного топлива (45%PuN+55%UN и 60%PuN+40%UN) в реакторе БОР-60 до выгорания ~12% тяж. ат. — Там же, т. 110, 2011, вып. 6, с. 332—346.
5. Tanaka K., Maeda K., Katsuyama K. et al. Fission gas release and swelling in uranium-plutonium mixed nitride fuels. — J. Nucl. Mater., 2004, v. 327, № 1, p. 77—87.
6. Ganina S.M., Folomeev V.I., Marinenko E.E., Zabudko L.M. Problems of calculation modelling of nitride fuel performance: DRAKON code. — In: Proc. Intern. Conf. «Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development». Yekaterinburg, 26—29 June 2017, p. 58.

Поступила в Редакцию 31.01.19