

5. **Elliot A., Stuart C.** Coolant Radiolysis Studies in the High Temperature, Fuelled U-2 Loop in the NRU Reactor. AECL EACL, 2008.
6. **Elliot A., Stuart C.** Radiation chemistry in reactor systems: does modelling provide answers or only insights? — In: 6th Intern. Workshop on LWR Coolant Radiolysis and Electrochemistry. Korea, 27 October, 2006, CD № 1.
7. **Bartels D., Wu W., Kanjana K. e.a.** Laboratory and modelling studies in search of the critical hydrogen concentration. — In: 9th Intern. Workshop on Radiolysis, Electrochemistry & Materials Performance. France, 28 September, 2012, CD № 1.
8. **Архипов О.П., Бугаенко В.Л., Кабакчи С.А.** Программное средство МОРАВА Н2. М., 2017.
9. **Arkhipov O.P., Kabakchi S.A.** Verification of computer code for calculation of coolant radiolysis in the VVER reactor core with regard for boiling in its upper part. — In: Intern. Conf. Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems. Canada, October, 2010, CD № 1.
10. **Архипов О.П., Кабакчи С.А.** Краевой эффект при радиоллизе теплоносителя в активной зоне ВВЭР. — Атомная энергия, 2001, т. 90, вып. 4, с. 273—277.

Поступила в Редакцию 15.12.16

УДК 621.039.54

РАСПУХАНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ ТОПЛИВНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДИОКСИД УРАНА—СИЛУМИН В ОПЫТНЫХ ТВЭЛАХ РЕАКТОРА СМ

*Гильмутдинов И.Ф., Шишин В.Ю., Крюков Ф.Н., Кузьмин С.В., Силантьев П.П., Миндукушева И.А.,
Старков В.А., Пименов В.В. (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград)*

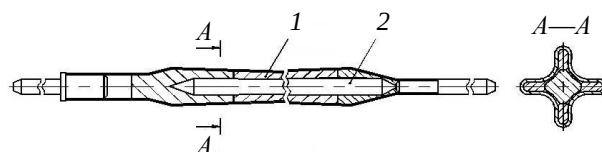
Настоящая работа является продолжением исследований, направленных на расширение экспериментальных возможностей реактора СМ для высокодозового облучения материалов атомной техники и повышения наработки изотопной продукции. Важная часть модернизации реактора связана с созданием ТВЭЛ с меньшим поглощением нейтронов. Использование таких ТВЭЛов позволит повысить плотность потока нейтронов, увеличит запас реактивности, снизит концентрацию и потребление топлива.

Ранее проведенные реакторные испытания и материаловедческие исследования первого из трех предложенных вариантов исполнения ТВЭЛов — с монолитным (сплошным) сердечником на основе гранул диоксида урана в матрице из силумина выявили некоторые их особенности, ограничивающие ресурс, и предполагаемые возможности ТВЭЛов второго и третьего вариантов исполнения [1]. Испытания и исследования ТВЭЛов второго исполнения — с вытеснителем в сердечнике и такой же, как и в ТВЭЛх первого исполнения, топливной композицией показали их преимущества, которые выражаются в отсутствии перегрева, существенно меньшем распухании и взаимодействии компонентов топливного сердечника и, как следствие, меньшем формоизменении ТВЭЛов.

В настоящей работе рассмотрены реакторные испытания ТВЭЛов второго варианта исполнения и их послереакторные материаловедческие

исследования. Основное внимание уделено анализу распухания топливной композиции как одного из явлений, влияющих на работоспособность ТВЭЛа.

Характеристика ТВЭЛов и условия их испытаний. Опытные ТВЭЛы всех трех вариантов исполнения (или конструкции) имеют крестообразную оболочку толщиной 0,2 мм из коррозионно-стойкой стали X16H15M3Б (ЭИ-847) с закруткой по длине для самодистанционирования. В ТВЭЛх второго варианта размещен вытеснитель из низколегированного алюминия, вследствие чего топливная композиция расположена на участках выступов (четырех симметричных относительно оси ТВЭЛа). Материалом топлива служит дисперсионная композиция на основе гранул UO_2 в матрице из силумина. Фракционный состав гранул составляет 0,2—0,315 мм, их объемная доля в композиции ~0,45, пористость не более 8% (рис. 1). Расположение топлива на участках выступов ТВЭЛов, как предполагалось, улучшает температурный режим. Расчетными исследованиями показано, что размещение вытеснителя в центре сердечника, обеспечиваю-



Р и с. 1. ТВЭЛ со слабопоглощающим нейтроны матричным материалом и вытеснителем: 1 — топливная композиция; 2 — вытеснитель

щего равномерное распределение топливных частиц, снижает максимальную температуру топлива на 70—80 °С и неравномерность энерговыделения по периметру твэла в 1,16 раза [1, 2].

Реакторные испытания твэлов осуществляли в специально разработанном инструментальном облучательном устройстве — экспериментальной ТВС с восемью твэлами, которую размещали в одном из каналов отражателя СМ. Относительное энерговыделение по твэлам сборки варьировалось от 0,85 до 1,17 (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Изменение объема твэлов после реакторных испытаний

Номер твэла	Выгорание ^{235}U , %	Энерговыделение, отн. ед.	Увеличение объема $\Delta V/V_0$, %
1	42,2	$1,06 \pm 0,03$	9,6
2	39,8	$0,97 \pm 0,02$	10,9
3	45	$1,17 \pm 0,03$	11,2
4	36,4	$0,85 \pm 0,02$	8,9
5	37,5	$0,89 \pm 0,02$	9,5
6	41,7	$1,03 \pm 0,03$	8,9
7	39,2	$0,92 \pm 0,02$	10,4
8	43,9	$1,12 \pm 0,03$	9,2

Основные параметры реакторных испытаний следующие [3]:

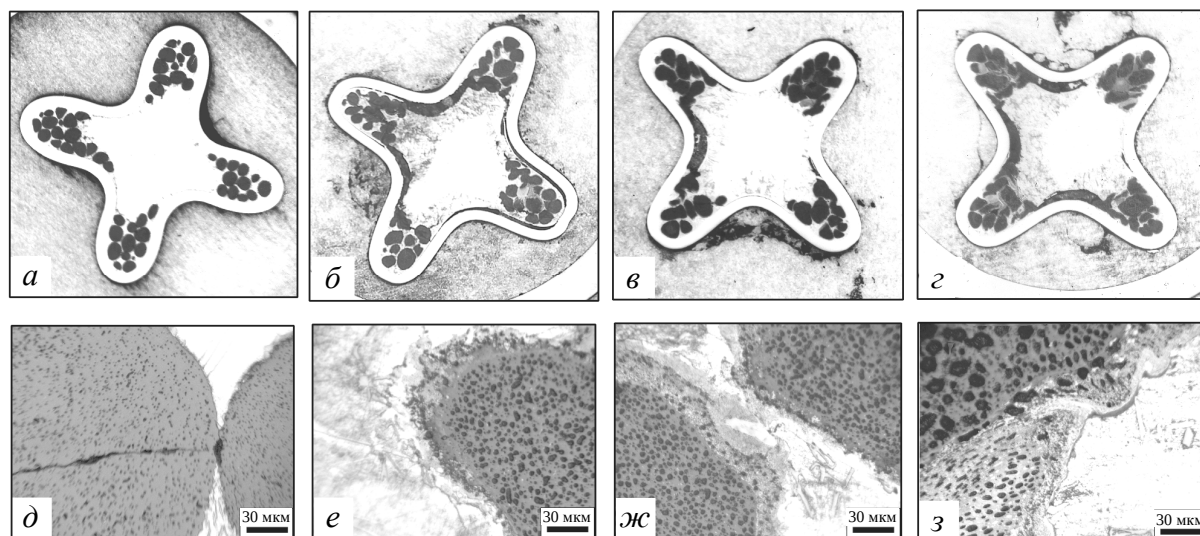
Температура сердечника, °С:	
максимальная расчетная . . .	333*
допустимая . . .	430
Плотность теплового потока с поверхности твэла, МВт/м ² :	
максимальная расчетная . . .	8
допустимая . . .	11,3
Среднее выгорание ^{235}U , % . . .	40,7
Время работы на мощности, эф. сут . . .	46
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов ($E < 0,5$ эВ), $10^{14} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$. . .	3,2
Максимальный флюенс быстрых нейтронов ($E > 0,1$ МэВ), 10^{21} см^{-2} . . .	3

*Рассчитывали методом конечных элементов, исходную теплопроводность топливной композиции — по формуле [4].

Допустимая температура топливной композиции 430 °С установлена на основе реакторных петлевых испытаний твэлов с аналогичными композициями [3]. Теплофизические свойства сердечника с объемной долей топливных частиц 45% рассчитывали в предположении однородности его структуры (равномерное распределение топливных частиц в матрице).

Состояние твэлов после облучения. Материаловедческие исследования. По результатам реакторного контроля при облучении все твэлы сохранили герметичность. После реакторных испытаний для оценки состояния твэлы, топливный сердечник и оболочку осматривали визуально, γ -сканировали, измеряли размеры, исследовали структуру. По результатам визуального осмотра твэлы сохранили целостность и форму, вся поверхность темно-серого цвета, гладкая, матовая и без повреждений. Состояние материала оболочки удовлетворительное. γ -Сканирование показало, что распределение радионуклидов по длине твэлов имеет косинусоидальный вид, обусловленный соответствующим аксиальным распределением плотности потока нейтронов в канале с облучавшимися твэлами, и не содержит аномалий, свидетельствующих о перегреве или исходной неравномерности загрузки топлива. Результаты γ -сканирования позволили также определить максимальное выгорание топлива по среднему в твэлах.

В твэлах второго варианта исполнения структура сердечников изменилась. Эти изменения обусловлены облучением, дисперсной природой сердечника и соответствуют процессам, обычно наблюдаемым в подобных композициях при испытании в реакторе в нормальных условиях, — образование пористости в частицах UO_2 , их набухание, взаимодействие с матрицей (рис. 2). Характер изменений был разным в зависимости от расположения твэлов в облучательном устройстве и места вырезки образца для исследований, т.е. в зависимости от параметров испытаний — плотности нейтронного и теплового потоков, выгорания в твэле. Наиболее развитую пористость, интенсивное набухание частиц и взаимодействие с матрицей наблюдали в твэле с максимальными параметрами испытаний на участке из его середины (см. рис. 2, з, з). В то же время структура топливной композиции свидетельствует о том, что температура сердеч-



Р и с. 2. Макро- и микроструктура необлученного образца твэла (а, д), облученного в сечении центральной плоскости активной зоны с минимальным (б, е), средним (в, ж) и максимальным энерговыделением (г, з)

ника в твэлах с вытеснителем не превышала допустимой. Следует также отметить отсутствие заметного изменения профиля твэлов после облучения, его распрямления даже в наиболее напряженном по условиям испытания твэле (см. рис. 2, б, в, г).

Изменение геометрических размеров твэлов и топливного сердечника оценивали по измерению объема и геометрических параметров поперечного сечения. Объем твэлов после облучения измеряли пикнометрическим методом, изменение объема в результате облучения получали сравнением с исходным значением (см. табл. 1). Объем увеличивается в узком диапазоне 8,9—11,2% и максимален для твэла с наибольшим энерговыделением и выгоранием (твэл 3 в соответствии с обозначением в табл. 1).

Оценка распухания по изменению геометрических параметров твэлов в поперечном сечении с применением видеосистемы анализа изображений, приведенная в табл. 2, также показала максимальное распухание твэла с наиболее напряженными условиями испытаний и минимальное твэла с менее напряженными условиями (в табл. 2 твэлы 3, 4 соответственно). Распухание топливного сердечника твэла 3 в месте наибольшего выгорания относительно невысокое 14%. Это отражается и на форме профиля твэлов. На макроснимках поперечного сечения облученных твэлов заметного распрямления оболочки и увеличения размеров по впадинам не наблюдается (см. рис. 2, б, в, г).

Т а б л и ц а 2. Изменение геометрических параметров поперечного сечения твэлов

Номер твэла	Место вырезки образца	Изменение $\Delta S/S_0$, %*	
		Твэл	Сердечник (с вытеснителем)
3	Верхняя часть твэла (120 мм от его середины)	5	7,3
	Середина твэла (центральная плоскость активной зоны)	10,4	14,3
	Нижняя часть твэла (120 мм от его середины)	0,7	3,6
4	Верхняя часть твэла (120 мм от его середины)	2,4	1,8
	Центральная плоскость активной зоны	8,6	9,9
	Нижняя часть твэла (120 мм от его середины)	1,4	0,8
6	Верхняя часть твэла (120 мм от его середины)	3,8	5,6
	Центральная плоскость активной зоны	5,7	9,6
	Нижняя часть твэла (120 мм от его середины)	6,4	4,7

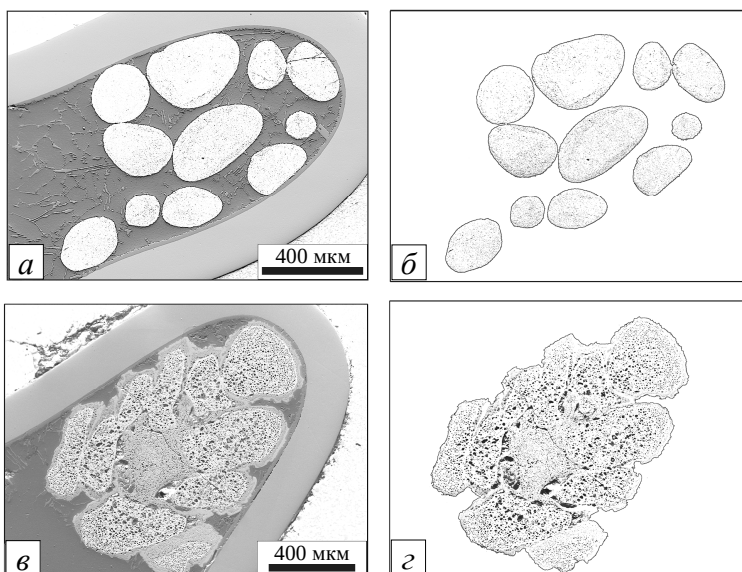
*Погрешность измерения площади сечения $\pm 1,5\%$.

Распухание топливной композиции. Анализ измерений и расчетов. Поскольку при облучении в топливной композиции взаимодействуют частицы диоксида и матрица, то общее выражение для распухания $(\Delta V/V_0)_{\text{т.к}}$ можно представить суммой распухания, обусловленно-

го твердыми $(\Delta V/V_0)_{\text{ПД}_\text{тв}}$ и газообразными продуктами деления $(\Delta V/V_0)_{\text{ПД}}$ и изменением объема $(\Delta V/V_0)_{\text{вз}}$ вследствие указанного взаимодействия компонентов сердечника.

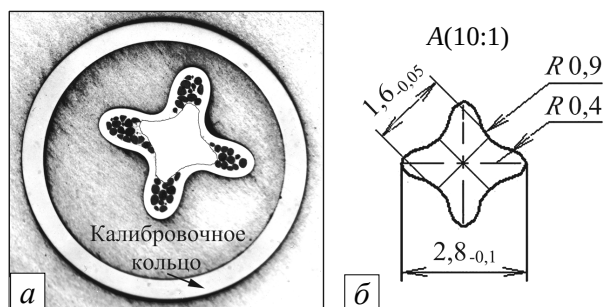
Вклад каждого из указанных компонентов и общее распухание оценены с применением видеосистемы анализа изображений на снимках поперечного сечения топливной композиции, которая в твэлах этого исполнения расположена на участках выступов (четырех симметричных относительно оси твэла). Общее распухание и его газовая составляющая могут быть измерены непосредственно — по увеличению площади указанных участков и площади пор в топливной фазе на данной площади соответственно. За исходные площадь топливной композиции и площадь пор в ней, точнее, в топливной фазе принимали среднюю измеренную в образцах необлученного твэла.

Для нахождения площади сечения топливной композиции $S_{\text{т.к}}$ измеряли площадь сечения топливного сердечника $S_{\text{т.с}}$ и площадь сечения вытеснителя $S_{\text{в}}$, площадь сечения топлива определяли как разность указанных величин. Площадь сечения вытеснителя измеряли на шлифе необлученного твэла — по макроснимку (рис. 3, а) и чертежу (рис. 3, б). За расчетную принята средняя измеренная площадь $3,2 \text{ мм}^2$. На рис. 4 показаны измеряемые участки топливной композиции в необлученном твэле и твэле 3, в табл. 3 — результаты измерения распухания топлива и газообразной составляющей, а также их разность — распухание за счет твердоосколочной составляющей и взаимодействия частиц



Р и с. 4. Электронно-микроскопическое изображение одного из ребер образца из твэла-свидетеля (а) и облученного твэла 3 (с) и их бинаризованное изображение для расчета площади пор (б, д соответственно)

UO_2 и матрицы. Распухание топлива за счет газообразной составляющей рассчитывали как разность площади пор в топливе после облучения и до него (см. рис. 4). Исследования проведены на образцах из центральной плоскости активной зоны твэлов 3 и 6 с максимальным и средним выгоранием (энерговыведением). Названные составляющие распухания приведены в абсолютных величинах. Для их оценки в принятых величинах — относительном изменении измеряемых характеристик — необходимо разделить приведенные в табл. 3 значения либо на исходную площадь сечения топливной композиции $S_{\text{т.к}}^0$, т.е. учитывать только распухающую часть сердечника, либо на исходную площадь всего сердечника $S_{\text{т.с}}^0$ (топливо и нераспухающий вытеснитель). Исходные величины



Р и с. 3. Макроизображение шлифа, вырезанного из необлученного твэла, с выделенным вытеснителем (а) и чертеж вытеснителя (б)

Т а б л и ц а 3. Параметры распухания топлива в исследуемых твэлах

Параметр	Номер твэла	
	3	6
Увеличение площади топлива $\Delta S_{\text{т.к}}$, мм^2	1,01	0,68
Площадь пор в топливе, мм^2 :		
до облучения	0,15	0,15
после облучения	0,91	0,66
Увеличение площади топлива за счет, мм^2 :		
газообразных продуктов деления	0,76	0,51
твердых продуктов деления и взаимодействия гранул диоксида с матрицей	0,25	0,17

площади сердечника $S_{т.с}^0$ и композиции $S_{т.к}^0$ измерены на образцах необлученного твэла, средняя площадь $S_{т.с}^0$ составила $7,03 \text{ мм}^2$, соответственно площадь $S_{т.к}^0$ должна быть равна $3,83 \text{ мм}^2$. В табл. 4 приведено набухание топливной композиции и топливного сердечника, а также вклад составляющих, указанных в табл. 3.

Т а б л и ц а 4. Распухание топливного сердечника и топливной композиции

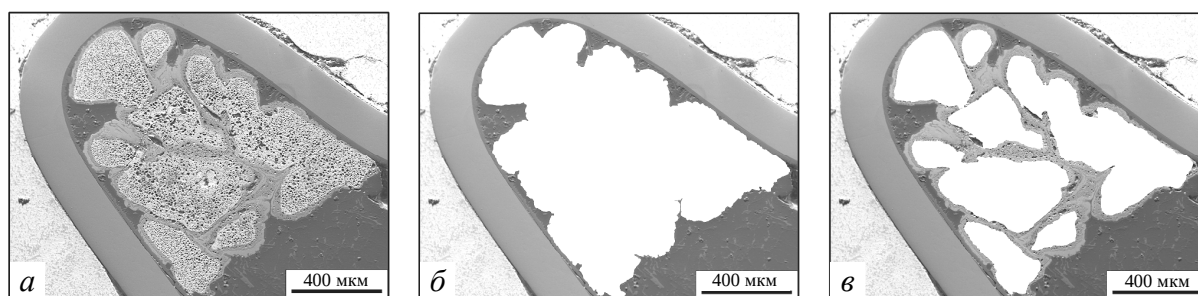
Параметр	Номер твэла	
	3	6
Общее распухание, %:		
топлива $\Delta S_{т.к}/S_{т.к}^0$	26,4	17,8
сердечника $\Delta S_{т.с}/S_{т.с}^0$	14,4	9,7
Распухание за счет газообразных продуктов деления, %:		
топлива	19,8	13,3
сердечника	10,8	7,3
Распухание за счет твердых продуктов деления и взаимодействия, %:		
топлива	6,5	4,4
сердечника	3,6	2,4

Объемное изменение при взаимодействии компонентов. Вклад в увеличение объема при взаимодействии частиц диоксида с матрицей оценен исходя из некоторых исходных положений и экспериментальных данных. Взаимодействие топливных частиц с матрицей (силумин) и преобразование структуры не могут, в принципе, не изменять объем. Это изменение может либо вносить дополнительный вклад в набухание сердечника, либо в определенной мере компенсировать распухание. Расчет объемного изменения из-за взаимодействия компонентов сердечника связан с оценкой кристаллохимических параметров структурных состав-

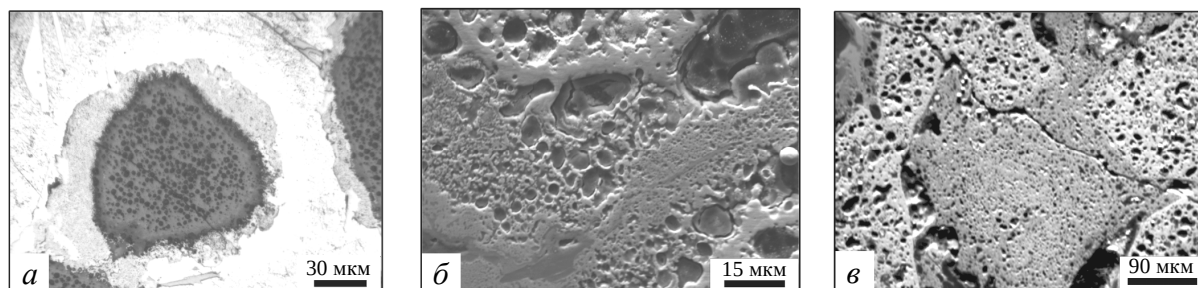
ляющих композиции на разных стадиях структурной перестройки. При составлении общего выражения для изменения единицы объема композиции оценивали параметры решетки матрицы и образовавшегося нового, строго говоря, материала в топливном сердечнике с учетом соответствующего содержания этих компонентов в топливе и их объема.

В твэлах с вытеснителем как локальная, так и средняя температура в сердечнике не превышала допустимую, поэтому взаимодействие между топливными гранулами и матрицей, в основном, частичное, ограничивается образованием промежуточного слоя взаимодействия, толщина которого не превышает 40 мкм. Однако в некоторых ребрах в их средней части на удалении от оболочки и вытеснителя обнаружены частицы топлива, которые провзаимодействовали с матрицей и в которых пористость существенно ниже (см. рис. 4, в). Объемная доля слоя взаимодействия в исследованных сечениях примерно одинаковая и составляет в среднем ~20%. Ее рассчитывали по электронно-микроскопическому изображению каждого ребра, вычитая из площади топливной фазы, включающей в себя непровзаимодействовавшие гранулы диоксида урана и слой взаимодействия, площадь непровзаимодействовавшего диоксида (рис. 5).

Образованный вокруг топливных частиц слой неоднороден, состоит, в основном, из элементов взаимодействующих компонентов — алюминия, урана, кислорода и в меньшей степени кремния как неосновного элемента матрицы, а также осколочных элементов (рис. 6, а, б). Анализ термодинамических условий образования слоя и исследование его структуры и состава, выполненное ранее для данной топливной композиции и близкого ей по составу керметного топлива, дают основание предполагать, что



Р и с. 5. Электронно-микроскопическое изображение одного из ребер образца, вырезанного из облученного твэла 3 (а), и изображение этого же участка с выделенной топливной фазой (б) и топливными частицами, не затронутыми взаимодействием с матрицей (в)



Р и с. 6. Оптическое изображение слоя взаимодействия между матрицей и топливными частицами (а), электронно-микроскопическое изображение такого же слоя (б) и частица диоксида урана после взаимодействия с алюминием (в) в твэле 3

первично при взаимодействии диоксида урана и силумина образуются мелкодисперсные интерметаллиды урана UAl_3 с малым содержанием кремния и оксид алюминия Al_2O_3 . Состав полностью прореагировавших топливных частиц более равномерен и близок к интерметаллиду UAl_3 с поправкой на выгорание в нем урана (см. рис. 6, в). Однако наличие кристаллической решетки интерметаллида в сердечниках исследованных твэлов рентгеноструктурным анализом не обнаружено. Образование интерметаллида UAl_3 наблюдали, в том числе идентифицировали с помощью рентгеноструктурного анализа в керметных композициях с гранулами диоксида урана в силумине, прорабатываемых для активной зоны плавучих энергоблоков и атомных электростанций малой мощности. Наиболее вероятными причинами отсутствия на рентгенограммах линий UAl_3 , а также Al_2O_3 может быть потеря их кристалличности под действием высокой плотности деления, т.е. полная или частичная аморфизация, дискретная локализованность искоемых фаз, понижающая чувствительность рентгеноструктурного анализа. В самом деле, длительность образования слоя взаимодействия в керметных твэлах для названных энергоблоков в соответствии со временем их реакторных испытаний несравненно больше, чем в скоротечных испытаниях твэлов в реакторе СМ, и соответствующие фазы, в первую очередь, интерметаллидная — уран-алюминиевая могли кристаллизоваться.

Объемное изменение из-за взаимодействия топливных частиц с матрицей в исследуемой композиции рассчитано в предположении, что образующийся при облучении переходный слой взаимодействия представляет собой интерметаллид UAl_3 . Это изменение, отнесенное к единице объема композиции — величина $\Delta V_{вз}$, оценивали как разность объема компонентов

(фаз) до и после изменения структуры топливной композиции при облучении. Объемное изменение $\Delta V_{вз}$ рассчитано на основе условий кристаллической стехиометрии — обеспечения требуемого числа атомов в элементарных ячейках компонентов системы, сохранения числа атомов в системе компонентов материала сердечника и др. Объемное изменение керметной композиции диоксид урана—силумин с объемной долей алюминия 0,47 оценивается по формуле

$$\Delta V_{вз} = -0,06 C_{Al},$$

где C_{Al} — доля провзаимодействовавшего алюминия.

Таким образом, величина $\Delta V_{вз}$ в композиции диоксид урана—силумин отрицательная, т.е. взаимодействие приводит к уменьшению объема композиции и в небольшой степени компенсирует распухание. Максимальное уменьшение объема при взаимодействии всего алюминия матрицы $C_{Al} = 1$ составит $\sim 0,06$, т.е. $\sim 6\%$. В твэле 3 объемная доля провзаимодействовавшего материала составила $\sim 22\%$, следовательно, изменение объема составит $-1,3\%$. Примерно такое же значение $-1,4\%$ и в твэле 6.

Следует отметить, что топливные частицы с матрицей взаимодействуют в условиях облучения и деления урана, в том числе в образовавшемся продукте взаимодействия, вносит вклад в распухание топлива, обозначенное в табл. 4 как распухание за счет газообразных и твердых продуктов деления.

Таким образом, основной вклад в распухание топливной композиции в твэлах с вытеснителем в сердечнике вносят газообразные продукты деления, что проявляется в появлении газонаполненных пор в топливном материале. Газообразное распухание составляет $\sim 3/4$ общего распухания композиции. С учетом объемного

изменения из-за взаимодействия частиц диоксида урана с матрицей в указанных твэлах от $-1,3$ до $-1,4\%$ вклад в распухание за счет твердых продуктов деления составляет $\sim 30\%$. Эффект взаимодействия отрицательный — вклад в распухание -5% , т.е. объем образовавшегося при взаимодействии материала сокращается, сердечник уплотняется.

Заключение. Исследования позволяют отметить преимущества в поведении при облучении опытных твэлов с дисперсионной топливной композицией диоксид урана—силумин и вытеснителем в сердечнике. Применение вытеснителя позволило равномерно распределить топливные частицы в сердечнике и снизить его рабочую температуру. Вследствие этого твэлы показали удовлетворительную радиационную стойкость при плотности теплового потока $5,8—8$ МВт/м² и выгорании до 45% . Признаков перегрева матрицы и потери ею способности к удержанию газообразных продуктов деления не обнаружено.

Распухание топливной композиции в наиболее напряженном по параметрам испытаний твэле составило 26% , сердечника (топливо + вытеснитель) — 14% , что соответствует ожидаемым пределам для достигнутого выгорания. Измерение распухания и анализ исследования структуры топлива после облучения дают основания полагать, что из трех возможных составляющих распухания: за счет газообразных и твердых продуктов деления и изменения струк-

туры (появления промежуточного материала вследствие взаимодействия компонентов — частиц диоксида и матрицы) основной вклад вносит распухание за счет газообразных продуктов деления, примерно $3/4$ общего распухания. Взаимодействие компонентов топлива приводит к уплотнению сердечника, способствует некоторой компенсации распухания. Эта компенсация — объемный эффект взаимодействия возрастает по мере увеличения степени взаимодействия компонентов.

Исследования позволяют утверждать, что глубина выгорания твэлов с вытеснителем при достигнутой плотности теплового потока не является предельной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гильмутдинов И.Ф., Шишин В.Ю., Старков В.А. и др. Исследование опытных дисперсионных твэлов с матрицей на основе алюминия для высокопоточных исследовательских реакторов. — Атомная энергия, 2015, т. 118, вып. 2, с. 80—84.
2. Цыканов В.А., Клинов А.В., Старков В.А. и др. Основные итоги первого этапа модернизации активной зоны СМ. — Там же, 2007, т. 102, вып. 2, с. 86—92.
3. Клинов А.В., Калинин Н.К., Пименов В.В. и др. Испытания экспериментальных ТВС с малым вредным поглощением нейтронов в реакторе СМ. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2013, № 2, с. 114—122.
4. Грачев В.Д. Некоторые вопросы математической реализации метода конечных элементов в задачах реакторной теплофизики: Препринт НИИАР-6 (652). М., ЦНИИАтоминформ, 1985.

Поступила в Редакцию 26.09.17

УДК 621.039.548.5

АКСИАЛЬНАЯ И АЗИМУТАЛЬНАЯ АСИММЕТРИЯ ОКИСЛЕНИЯ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ РБМК-1000

Сухих А.В., Сагалов С.С. (АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград),
Павлов С.В. (ДИТИ НИЯУ МИФИ, ООО НПФ «Сосны», г. Димитровград)

Материаловедческие исследования обработавших ТВС РБМК выявили на оболочках твэлов из сплава Zr—1%Nb (Э-110) два вида коррозии: равномерную и нодулярную (очаговую). В интервале $1500—3000$ сут эксплуатации скорость равномерной коррозии уменьшается и толщина оксидных пленок, хорошо сцепленных с металлом, не превышает 20 мкм. Очевидно, что равномерная оксидная пленка такой толщи-

ны не может оказывать значительного влияния на ресурс твэлов. Нодулярная коррозия сплава Э-110 снижает технико-экономические показатели и безопасность эксплуатации АЭС с РБМК-1000 из-за утонения оболочек твэлов и появления большого количества шлама в контуре циркуляции теплоносителя. Однако до настоящего времени нет общепризнанного понимания механизмов ее возникновения и развития [1].