

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов Ю.В., Разина Н.С., Шпанский С.В. ПУЧОК 2Б — программа для теплогидравлического анализа двухфазных потоков в стержневых сборках с учетом неомогенной структуры поперечного потока смешения. Доклад на семинаре СЭВ. Будапешт, ЦИФИ. 1978, т. 2, с. 761—774.
2. Коштылек Я., Свитах Ф. Оценка моделей для поперечного массо- и энергообмена при анализе по ячейкам пучков тепловыделяющих стержней. — Там же, с. 774—790.
3. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Кириллов П.Л. и др. Критический тепловой поток в треугольных пучках стержней (скелетные таблицы, версия 1997 года): Препринт ФЭИ-2603, 1998. 27 с.
4. Бобков В.П., Кириллов П.Л., Виноградов В.Н., Смогалева И.П. Табличный метод расчета критического теплового потока в водоохлаждаемых треугольных сборках стержней. — Атомная энергия, 1999, т. 87, вып. 1, с. 17—24.
5. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Зяткина О.А., Козина Н.В. Метод описания кризиса в каналах сложного поперечного сечения. — Теплоэнергетика, 1995, № 3, с. 37—46.
6. Бобков В.П., Виноградов В.Н., Зяткина О.А., Козина Н.В. Относительное описание кризиса в сборках стержней и других сложных каналах. — Там же, 1997, № 3, с. 1—7.
7. Groeneveld D., Joobor J., Leung L. e.a. The effect of fuel subchannel geometry on CHF. — In: Proc. NURETH-5, Salt Lake City, 1992, v. 3, p. 683—690.

Поступила в Редакцию 1.03.2000

УДК 621.039.542.34:621.039.526+621.039.546

ПОЛУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ТОРИЙСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИЦИЙ

Курина И.С., Дворяшин А.М., Гудков Л.С (ГНЦ РФ — ФЭИ им. А.И. Лейпунского)

В ФЭИ проводятся научно-исследовательские работы, которые связаны с разработкой технологии изготовления торийсодержащих топливных композиций на основе диоксидов урана и плутония, пригодных для использования в тепловых или быстрых реакторах. Значительное внимание при этом уделяется получению порошков со свойствами, оказывающими определяющее влияние на качество спеченных таблеток [1—3].

На начальном этапе возможного вовлечения тория в кампании действующих реакторов возникает проблема повышения поглощения нейтронов. В связи с этим необходимо увеличить загрузку ^{235}U , что может привести к неравномерности энерговыделения в активной зоне. Во избежание этого необходимо компенсировать повышение поглощения нейтронов неполной загрузкой тория. Для этого рассматривается возможность использования инертных разбавителей. В процессе разработки технологии изготовления торийсодержащего топлива на основе диоксидов урана или плутония были опробованы варианты с введением в топливные композиции таких инертных разбавителей, как оксиды магния или кальция. В качестве разбавителей оксиды магния и кальция выбраны не случайно. В ФЭИ разработана технология изготовления оксидного плутонийсодержащего топлива с оксидом магния в качестве инертной матрицы [4, 5]. Использование оксида кальция в качестве инертного разбавителя или добавки в композицию основывается на том, что кальций повышает плотность ториевого топлива и увеличивает размер кристаллитов при производстве порошков [6].

Большой интерес проявляется к металлическому торию в качестве матричного материала в топливе. В связи с этим возникла необходимость изучения поведения тория при возможном контакте с разными теплоносителями.

Цель настоящей работы — определение оптимальных технологических режимов изготовления топливных композиций на основе $(\text{U}, \text{Th})\text{O}_2$ без разбавителей и с разбавителями MgO или CaO , исследование взаимодействия этих композиций, а также металлического тория с теплоносителями (водой и натрием) в условиях, имитирующих разгерметизацию твэлов.

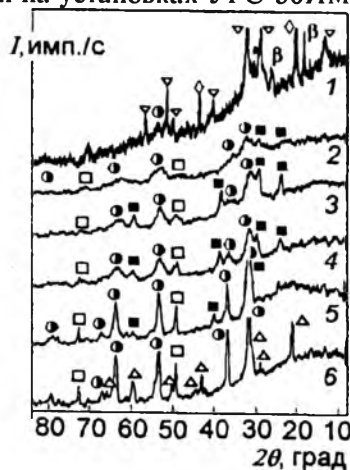
Изготовление и исследование топливных таблеток $(U, Th)O_2$, $(U, Th)O_2 + MgO$ и $(U, Th, Ca)O_2$. Предварительным расчетом определен состав топливных композиций для твэлов ВВЭР, % по массе: $25 UO_2 + 75 ThO_2$, $35 UO_2 + 33 ThO_2 + 32 MgO$ при использовании урана 20%-ного обогащения по ^{235}U , $6 PuO_2 + 84 ThO_2 + 10 CaO$ — плутония (в настоящей работе вместо плутония применяли имитатор — диоксид урана).

Технологическая схема изготовления топливных композиций включала операции соосаждения компонентов из раствора, термической обработки порошков, прессования и спекания таблеток [3—5]. Исходные компоненты (оксиды урана, тория, магния и металлический кальций) растворяли в азотной кислоте так, чтобы остаточная кислотность была минимальной (10—15 г/л HNO_3), а суммарная концентрация компонентов композиции составляла не более 70 г/л. Соосаждение проводили методом одновременного сливания в буфер азотно-кислого раствора, содержащего компоненты композиции, и раствора осадителя. В качестве осадителя использовали 25%-ный водный раствор аммиака, раствор щавелевой кислоты и 25%-ный раствор аммиака.

Процесс соосаждения проводили при $60 \pm 2^\circ C$ в два этапа: первый при $pH 7 \pm 0,2$, второй — при $pH 10 \pm 0,2$.

Уран и торий осаждались полностью во всех случаях. При осаждении раствором аммиака образуется объемистый плохо фильтрующийся осадок, который после термообработки превращается в грубые порошки. Осаждение растворами щавелевой кислоты и аммиака позволяет укрупнить частицы осадка, что ускоряет фильтрацию. Полученные после фильтрации осадки прокаливали на воздухе в муфельной печи типа СНОЛ при 500—1000 $^\circ C$ в течение 4 ч и восстанавливали водородом при 700 $^\circ C$ в течение 2 ч. В табл. 1 приведены результаты исследований порошков трех торийсодержащих композиций, полученных в результате соосаждения растворами щавелевой кислоты и аммиака. Фазовый состав порошков определяли на установках УРС-50ИМ и УРС-2.0. На рис. 1 показаны характерные дифрактограммы осадка и порошков, полученных после прокаливания, для топливной композиции $(U, Th)O_2 + MgO$. Торий после осаждения из раствора уже входит в твердый раствор $(U, Th)O_2$, фазы гидроксида тория не обнаружено. То же самое наблюдается и при получении топливных композиций $(U, Th)O_2$, $(U, Th, Ca)O_2$.

Полученные после двух термических обработок порошки смешивали с пластификатором (раствором 0,5% по массе парафина в CCl_4), высушивали и протирали через сито с размером ячеек 120 мкм. Таблетки прессовали при давлении 400 Па. Спекание проводили в печи типа СШВ в вакууме или водороде. В табл. 2 представлены усредненные результаты исследований таблеток различных топливных композиций (среднее от результатов исследований 8—12 таблеток). Качество таблеток (плотность, внешний вид) в наибольшей степени определяется температурой прокаливания осадков, оптимальными для композиции $(U, Th)O_2$, $(U, Th, Ca)O_2$ являются: 700 $^\circ C$, $(U, Th)O_2 + MgO$ — 1000 $^\circ C$. Такие порошки обладают оптимальными свойствами (текучестью, пластичностью, полной удельной поверхностью). Таблетки, изготовленные из этих порошков, имеют стабильную плотность и



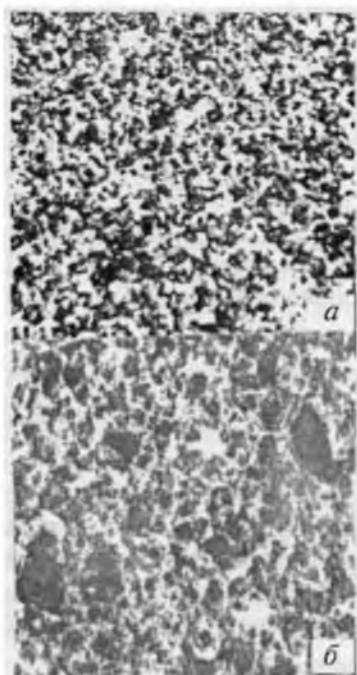
Р и с. 1. Дифрактограмма осадка (1) $(NH_4)_2O \cdot 4UO_3 \cdot 7H_2O$ ($\diamond$) + $(ThU)O_2$ ($\bullet$) + $Mg(OH)_2$ (∇) и прокаленного осадка $(ThU)O_2$ ($\bullet$) + U_3O_8 ($\blacksquare$) + MgO ($\square$) при 500 (2), 600 (3), 700 (4), 900 $^\circ C$ (5), $(ThU)O_2$ ($\bullet$) + $MgUO_4$ при 1000 $^\circ C$ (6) в случае изготовления топлива $(ThU)O_2 + MgO$

Т а б л и ц а 1. Характеристики порошков топливных композиций

Композиция	Фазовый состав осадка	Прокаливание на воздухе				Восстановление в водороде при 700 °С		
		T, °С	Цвет порошка	Фазовый состав	Параметр решетки, нм	Цвет порошка	Фазовый состав	Параметр решетки, нм
(U, Th)O ₂	(NH ₄) ₂ O·4UO ₃ ·7H ₂ O + (U, Th)O ₂	500	Оранжевый	(U, Th)O ₂	—	Серый	(U, Th)O ₂	—
		600	Коричнево-зеленый	(U, Th)O ₂	—	»	(U, Th)O ₂	—
		700	Коричневый	(U, Th)O ₂	—	»	(U, Th)O ₂	0,5551
		800	Темно-коричневый	(U, Th)O ₂	—	»	(U, Th)O ₂	0,5551
(U, Th)O ₂ + MgO	(NH ₄) ₂ O·4UO ₃ ·7H ₂ O + (U, Th)O ₂ + Mg(OH) ₂	500	Оранжевый	(U, Th)O ₂ в-д, U ₃ O ₈ д, MgO в-д	—	»	(U, Th)O ₂ в-д, MgO д	—
		600	Светло-коричневый	(U, Th)O ₂ в-д, U ₃ O ₈ д, MgO д	—	»	(U, Th)O ₂ в-д, MgO д	0,5512 (U, Th)O ₂
		700	Коричневый	(U, Th)O ₂ в-д, U ₃ O ₈ к, MgO д	—	»	(U, Th)O ₂ в-д, MgO д	—
		900	Коричневый	(U, Th)O ₂ к, U ₃ O ₈ к, MgO к	—	»	(U, Th)O ₂ к, MgO к	—
(U, Th, Ca)O ₂		1000	Темно-коричневый	(U, Th)O ₂ к, MgUO ₄ к	—	»	(U, Th)O ₂ к, MgO к	0,5505 (U, Th)O ₂ 0,4208 (MgO)
		700	Светло-горчичный	(U, Th, Ca)O ₂ в-д	0,5597	Светло-пепельный	(U, Th, Ca)O ₂ в-д	0,5597
		900	Темно-желтый	(U, Th, Ca)O ₂ к	0,5597	Пепельный	(U, Th, Ca)O ₂ к	0,5597
		1000	Хаки	(U, Th, Ca)O ₂ к	0,5597	Серый	(U, Th, Ca)O ₂ к	0,5597

Примечание: в-д — высокодисперсное, д — дисперсное, к — кристаллическое соединение.

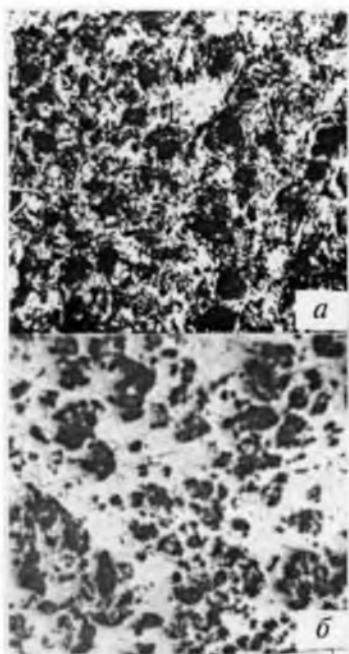
удовлетворительный внешний вид (отсутствуют дефекты). Их плотность можно регулировать изменением температуры спекания. Таблетки, изготовленные из порошков с неоптимальными свойствами, имеют сколы, трещины, искажения формы. На рис. 2, 3 показаны характерные микроstructures шлифов спеченных таблеток топливных композиций $(U, Th)O_2$ и $(U, Th)O_2 + MgO$, полученных по оптимальным и неоптимальным технологическим режимам. При сравнении можно отметить, что таблетка, изготовленная по неоптимальному технологическому режиму (см. рис. 2, б), имеет неравномерную структуру, неоднородную пористость, скопления пор. Микроstructure таблетки $(U, Th)O_2$, изготовленной из порошка, прокаленного при 700 °С (оптимальный режим), наиболее однородная, с мелкой пористостью, распределенной равномерно по всей площади шлифа (см. рис. 2, а). Микроstructure таб-



Р и с. 2. Структура шлифов таблеток $(U, Th)O_2$, изготовленных из прокаленных при 700 (а) и 800 °С (б) порошков $\times 200$

Т а б л и ц а 2. Характеристики таблеток топливных композиций

Композиция	Номер партии	Т прокалив- ния осадка, °С	Сырые таблетки		Т спекания, °С (среда)	Средний диаметр, мм	Усадка по диаметру, %	Спеченные таблетки		Внешний вид	Фазовый состав
			Средний диаметр, мм	Средняя плотность, г/см ³				Средняя плотность г/см ³	% расчетной		
$(U, Th)O_2$	1	500	8,80	4,84	1800 (вакуум)	7,60	13,6	7,13	70	Без дефектов	$(U, Th)O_2$
	2	600	8,78	4,67	1800 (*)	7,88	10,2	6,96	68	*	$(U, Th)O_2$
	3	700	8,74	4,92	1800 (*)	7,40	15,3	8,12	80	*	$(U, Th)O_2$
	4	800	8,72	4,86	1800 (*)	7,0	19,7	9,17	90	*	$(U, Th)O_2$
$(U, Th)O_2 + MgO$	1М	600	8,87	2,98	1600 (водород)	6,95	21,6	5,70	93,4	«Талия», трещины	$(U, Th)O_2 + MgO$
	2М	700	8,90	3,07	1600 (*)	6,90	22,5	5,84	95,7	Трещины	$(U, Th)O_2 + MgO$
	3М	1000	8,95	3,33	1600 (*)	7,20	19,6	6,04	99,0	Без дефектов	$(U, Th)O_2 + MgO$
$(U, Th, Ca)O_2$	1К	700	8,9	3,49	1750 (*)	7,15	19,7	7,83	93	*	$(U, Th, Ca)O_2$
	2К	900	8,9	4,03	1750 (*)	7,95	10,6	8,05	96	Форма конуса, трещины	$(U, Th, Ca)O_2$
	3К	1000	8,9	4,34	1750 (*)	8,05	9,6	8,11	97	*	$(U, Th, Ca)O_2$



Р и с. 3. Структура шлифов таблеток $(U, Th)O_2 + MgO$, изготовленных из прокаленных при 600 (а) и 1000 °С (б) порошков $\times 200$

летки топливной композиции $(U, Th)O_2 + MgO$, изготовленной по технологии, включающей прокаливание при 1000 °С (см. рис. 3, б), значительно отличается от микроstructures таблетки, полученной при температуре прокаливания порошка 600 °С (см. рис. 3, а). На рис. 3, б фаза MgO слабо проявляется, она внедрена в фазу $(U, Th)O_2$, в которой происходит сравнительное уменьшение параметра решетки с 0,5512 до 0,5505 нм (см. табл. 1).

Методом сканирующей электронной микроскопии с применением микрорентгеноспектрального анализа изучали морфологию и элементный состав частиц порошков, прокаленных на воздухе при температуре 500—1000 °С. Такие исследования и рентгеноспектральный микроанализ выполняли на сканирующей приставке ASID-4D электронного микроскопа JEM-100CX, оборудованного энергодисперсионным микроанализатором «Ксбекс» в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 40 кВ. В процессе исследования порошков, полученных после прокаливания осадков различных топливных композиций, наблюдали эффект морфологического превращения формы частиц [2]. Частицы порошков твердого раствора $(U, Th)O_2$ композиции $(U, Th)O_2 + MgO$ при температуре прокаливания

500—600 °С состоят из наслоившихся одна на другую

тонких пластинок-чешуек произвольного размера. При температуре прокаливания 700 °С начинает изменяться морфологическая структура частиц: слоистая структура распадается с образованием отдельных мелких глобул размером 0,02—0,05 мкм. Дальнейшее повышение температуры прокаливания приводит к коагуляции глобул, вероятно, вследствие изменения поверхностной энергии частиц порошка. После прокаливания при 900 °С частицы оксидов представляют собой сложный конгломерат с развитым поверхностным рельефом и состоят преимущественно из смеси неплотно сцепленных глобул различной дисперсности с характерным размером от 0,02 до 0,1 мкм. Прокаливание порошка при 1000 °С вызывает полное срастание глобул, в результате чего формируется слоисто-губчатая структура частиц оксидов, но с более грубым поверхностным рельефом, чем в случае прокаливания порошка при 500—600 °С. При 1000 °С образуется соединение $MgUO_4$ (см. табл. 1), сопровождающееся морфологическим изменением частиц порошков в системе $U_3O_8—MgO$. Этот факт был выявлен при получении топлива $UO_2 + MgO$ в работе [4]. Бездефектные таблетки композиции $(U, Th)O_2 + MgO$ получаются только в случае, если технологический процесс включает термическую операцию образования соединения $MgUO_4$.

Следует отметить, что атмосфера спекания значительно влияет на плотность таблеток. Так, спеченные в атмосфере водорода таблетки топливных композиций $(U, Th)O_2 + MgO$ и $(U, Th, Ca)O_2$, изготовленных из порошков с оптимальными свойствами, имеют высокую плотность: 99 и 93% соответственно (см. табл. 2). Плотность таблеток $(U, Th)O_2$, полученных из порошка, прокаленного при 700 °С, и спеченных в вакууме при 1800 °С, составляет 80% теоретического значения. Спекание тех же таблеток в водороде позволяет повысить их плотность еще на 10%. Более высокую плотность таблеток $(U, Th)O_2$ можно получить введением кальция в топливную композицию.

Взаимодействие металлического тория и топливных таблеток $(U, Th)O_2$ и $(U, Th)O_2 + MgO$ с теплоносителем. Были проведены исследования торийсодержащих топливных композиций на предмет их взаимодействия с теплоносителем в условиях, имитирующих аварийные ситуации. Наиболее распространенными теплоносителями являются вода для тепловых и натрия для быстрых реакторов. Испытаниям подвергали образцы композиций $(U, Th)O_2$ и $(U, Th)O_2 + MgO$ и металлический торий. Были проведены два вида изотермических испытаний: в контакте с дистиллированной водой и металлическим натрием. Испытания по взаимодействию с водой в течение 50 ч при 300 °С проводили в автоклаве, куда образцы помещали в открытых контейнерах. По окончании испытаний образец металлического тория разрушился при взаимодействии с водой и превратился в порошок с изменением фазового состава до ThO_2 . Образцы $(U, Th)O_2$ (партии 2, 3, см. табл. 2) хорошо выдержали испытания, не изменив внешнего вида и фазового состава. Образцы $(U, Th)O_2 + MgO$ (партии 1М, 2М) разрушились до порошка, сохранив фазовую основу $(U, Th)O_2$, тогда как MgO превратился в гидроксид магния. Эти таблетки были изготовлены из порошков, полученных при температуре прокаливания 600 и 700 °С. Топливные таблетки партии 3М хорошо выдержали испытания в воде, не изменив внешнего вида и состава. Эти образцы были получены из порошка, прокаленного при 1000 °С, т.е. таблетки топлива, изготовленные по технологическому процессу, включающему термообработку порошков при 1000 °С (с образованием фазы $MgUO_4$), позволяют получать таблетки с особыми свойствами.

Таким образом, для тепловых реакторов, где теплоносителем является вода, металлический торий использовать небезопасно, поскольку в случае разгерметизации оболочки произойдет его взаимодействие с водой с образованием новой фазы — оксида тория. При этом соответственно происходят объемные изменения топлива. Кроме того, образующийся порошок может вымываться в теплоноситель. Не взаимодействуют с водой топливные композиции $(U, Th)O_2$ и $(U, Th)O_2 + MgO$ (с температурой прокаливания порошка 1000 °С).

Для исследования взаимодействия топливных композиций с металлическим натрием из стали ЭИ-852 были изготовлены ампулы, в которые помещали образцы (топливные таблетки и торий). Зазоры в ампулах заполняли металлическим натрием, компенсационные объемы — смесью 80% Ag+20% Hg при атмосферном давлении. Ампулы герметизировали путем заваривания пробок аргоно-дуговой сваркой, после чего проверяли на герметичность при нормальных условиях гелиевым течеискателем. Готовые макеты были помещены в общий контейнер из нержавеющей стали, который после заполнения аргоном заваривали аргоно-дуговой сваркой. Контейнер с макетами устанавливали в печь сопротивления типа СШОЛ, выдерживали при 700 °С в течение 100 ч. Температуру контролировали хромель-алюмелевыми термопарами и поддерживали с точностью ± 5 °С.

По окончании испытаний все макеты сохранили геометрические размеры. После испытаний в контакте с натрием образец тория сохранил форму, но стал очень хрупким. Теплоноситель проник в открытые поры, образовалось небольшое количество («следы») соединения тория с натрием (неидентифицированная фаза). Кроме того, на поверхности образовалась пленка оксида тория, вероятно, из-за наличия незначительного количества примеси кислорода в натрии. Образцы партии № 2 (композиция $(U, Th)O_2$) и № 1М (композиция $(U, Th)O_2 + MgO$) стали очень хрупкими и при извлечении из натрия разрушились. Образцы партий № 3 и 3М сохранили целостность. Образцы $(U, Th)O_2$ партии № 3 и $(U, Th)O_2 + MgO$ партии № 3М были изготовлены по оптимальным режимам, вероятно, в связи с этим выдержали условия испытаний без разрушений и изменений фазовых составов (табл. 3). Таким образом, технология

изготовления топливных таблеток оказывает значительное влияние на их способность к взаимодействию с теплоносителем. Как показал рентгенофазовый анализ, основу образцов партий № 2 и 3 составляет фаза $(U, Th)O_2$, № 1М и 3М — $(U, Th)O_2 + MgO$. На поверхности всех образцов обнаружена неидентифицированная фаза соединения тория с натрием — аналог соединения в случае испытаний чистого тория. В большем количестве эта фаза присутствует на поверхности образцов партий № 2 и 1М, т.е. композиций, изготовленных по неоптимальным технологическим режимам.

Т а б л и ц а 3. Характеристика образцов после взаимодействия с натрием в течение 100 ч при 700 °С

Номер партии	Масса топливных блоков, г		Фазовый состав		Состояние
	до испытаний	после испытаний	до испытаний	после испытаний	
2	1,3810	1,15	$(U, Th)O_2$	$(U, Th)O_2$ в основе, неизвестная фаза — на поверхности	Разрушился
3	1,2869	1,279	$(U, Th)O_2$	$(U, Th)O_2$ в основе, следы неизвестной фазы — на поверхности	Сохранился
1М	1,9919	1,793	$(U, Th)O_2 + MgO$	$(U, Th)O_2 + MgO$ в основе, неизвестная фаза — на поверхности	Разрушился
3М	0,7343	0,712	$(U, Th)O_2 + MgO$	$(U, Th)O_2 + MgO$ в основе, следы неизвестной фазы на поверхности	Сохранился
Таблетка металлического тория	3,4511	3,46	Th	Th, следы ThO_2 и фазы Th с Na	Сохранился

Закключение. Таким образом, разработана технология изготовления топливных композиций $(U, Th)O_2$, $(U, Th, Ca)O_2$ и $(U, Th)O_2 + MgO$ методом соосаждения из раствора с последующими операциями термической обработки осадков, прессования и спекания таблеток. Выбраны оптимальные режимы получения бездефектных топливных таблеток $(U, Th)O_2$, $(U, Th, Ca)O_2$ и $(U, Th)O_2 + MgO$ с однородной микроструктурой, со стабильной плотностью и равномерной пористостью. Проведены исследования по изучению взаимодействия торийсодержащих топливных композиций $(U, Th)O_2 + MgO$ и $(U, Th)O_2$ с теплоносителями — водой при температуре 300 °С и натрием при 700 °С. Топливные таблетки $(U, Th)O_2$ и $(U, Th)O_2 + MgO$, полученные по оптимальным режимам, показали удовлетворительные результаты при контакте с водой. Совместимость с металлическим натрием композиций $(U, Th)O_2 + MgO$ и $(U, Th)O_2$, изготовленных по оптимальным технологическим режимам, удовлетворительная в исследуемых пределах температуры. Металлический торий сильно взаимодействует с водой и незначительно с натрием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Майоров А.А., Браверман И.Б. Технология получения порошков керамической двуокиси урана. М.: Энергоатомиздат, 1985.
2. Курина И.С. Способ получения изделий из керамики. Патент на изобретение № 2135429. Россия, 27.08.1999.
3. Курина И.С. Влияние температуры прокаливания порошков на качество оксидного топлива. — Атомная энергия, 1999, т. 86, вып. 3, с. 189—194.

4. Курина И.С., Лопатинский В.Н., Ермолаев Н.П. Разработка технологии и изучение свойств топливного материала на основе матрицы MgO . — Труды Технического совещания МАГАТЭ/ВНИИНМ. Москва, октябрь, 1996, с. 169—181.
5. Курина И.С., Мосеев Л.И. Получение и изучение свойств топливных таблеток композиции $PuO_2 + MgO$. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 5, с. 355—358.
6. Laha S., Das A. Isothermal grain growth and sintering in pure ThO_2 and $ThO_2 - CaO$ compositions. — J. Nucl. Mater., 1971, v. 39, p. 285—291.

Поступила в Редакцию 17.03.2000

УДК 541.15+621.039.577

РАДИОЛИЗ АММИАКА В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ПЕРВОГО КОНТУРА РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК ПЛАВУЧИХ ЭНЕРГБЛОКОВ

Буланов А.В., Колесов Б.И., Лукашенко М.Л., Худяков А.М.

(РНЦ «Курчатовский ин-т»),

Кабакчи С.А. (ГНЦ РФ — НИФХИ им. Л.Я. Карпова),

Архипов О.П. (ОКБ «Гидропресс»)

В работе [1] теоретически показано, что последствия радиолиза воды в замкнутом объеме могут быть различными в зависимости от того, происходит ли облучение при жестко зафиксированных внешних параметрах, например, мощности дозы или температуры или они изменяются в процессе облучения на некотором малом интервале. В первом случае, который обычно реализуется при изучении радиолитических процессов в лабораторных условиях, в облучаемой системе устанавливается стационарное состояние, а стационарная концентрация продуктов радиолиза однозначно определяется жестко фиксированными внешними параметрами. Во втором случае, характерном для радиолиза воды в технологических условиях, например, в первом контуре ВВЭР стационарная концентрация зависит не только от внешних параметров, но и от скорости их изменения в рассматриваемом интервале. Если эта скорость не превышает некоторого предела, то система будет успевать достигать стационарного состояния, т.е. радиолитическая система по существу будет обладать свойством саморегуляции относительно внешних параметров. Если же скорость изменения внешних параметров на малом интервале велика, то стационарного состояния здесь может не быть вовсе, т.е. у системы свойство саморегуляции будет отсутствовать.

В настоящей работе приведены экспериментальные данные водно-химических режимов реальных реакторных установок плавучих энергоблоков с водо-водяными реакторами. Первый контур реакторных установок в свете изучения радиолиза водных растворов в замкнутом объеме в условиях изменения внешних параметров в заданном регламентом эксплуатации реактора интервале представляется идеальным объектом. В замкнутом объеме без подпитки и межфазного газообмена деаэрированная вода или разбавленные водные растворы аммиака облучаются дозой, достаточной для установления радиационно-химического стационарного состояния.

В табл. 1 представлены данные об изменении состава водного раствора аммиака (корректирующей добавки), которые получены на стенде-имитаторе первого контура реакторных установок, размещенном на исследовательском реакторе. Облучали раствор смешанным n, γ -излучением в проточном режиме в отсутствие свободного объема при мощности реактора 80 МВт, температуре $265 \pm 20^\circ C$, давлении 14,5—16,5 МПа, обеспечивавшем его монофазность. Разбавление растворов с начальной концентрацией аммиака 21,3—22,2 и 35,4—41,4 мг/кг обоснованно, так как доверительный интервал регламентных производственных аналитических методик (газовая хроматография, фотокolorиметрический метод) определения концентрации компонентов составлял не более 20%.