

Газовыделение из таблеток модельного оксидного топлива на основе урана

В. Г. Баранов, А. В. Тенишев, А. В. Хлунов

Выделение технологических газов H_2 , H_2O , CO , CO_2 , Ag из образцов модельного смешанного оксидного топлива (МОКС) $U_{1-y}Ce_yO_{2\pm x}$ изучали путем термоэкстракции в вакууме при 1873 К, в котором Се является как имитатором растворимых в матрице продуктов деления и выгорающего поглотителя нейтронов, так и аналогом плутония. Концентрация Се в образцах составляла от 0 до 25 масс.% ($y = 0 - 0,3434$), а кислородный потенциал ΔG_{O_2} поверхности образцов составлял от -350 до -260 кДж/моль при 1873 К. Было установлено, что удельное газовыделение из образцов $U_{1-y}Ce_yO_{2\pm x}$ зависит от содержания церия, пористости, кислородного потенциала и радиального градиента температуры.

Введение

Стратегией развития атомной энергетики России поставлена задача повышения рентабельности и конкурентоспособности энергетических ядерных реакторов и строительства усовершенствованных АЭС в первой половине XXI века [1].

Рентабельность энергетических реакторов зависит от эффективности использования ядерного топлива, определяемой уровнем достигнутых выгораний. Одним из наиболее перспективных путей увеличения глубины выгорания ядерного топлива является повышение ресурсных характеристик твэлов путем улучшения структуры топлива, а также снижение повреждаемости их оболочек за счет уменьшения механического взаимодействия топливо – оболочка. Для решения этой проблемы предложено модифицированное оксидное ядерное топливо (МОЯТ) на основе UO_2 с выгорающим поглотителем нейтронов (5 – 8 масс.% Gd_2O_3) и легирующими добавками оксидов Al, Si и Nb, суммарное содержание которых не превышает 0,4 масс. % [2].

В связи с тем, что технологические газы (ТГ) H_2 , H_2O , CO , CO_2 , Ag и др., выделяясь из спеченных топливных таблеток на основе UO_2 , могут снижать теплопроводность зазора сердечник – оболочка, вызывать водородное охрупчивание оболочки твэла, её науглероживание, транспортные реакции в

топливном сердечнике, а также повышать газовое распухание таблеток при высоких выгораниях, их количество согласно ТУ на штатные таблетки не должно превышать 50 мм³/г, причем содержание водорода должно быть не более 12 мм³/г. Кроме того, для уменьшения окисления оболочки твэла величина кислородного потенциала спеченных топливных таблеток должна находиться в довольно узком интервале, например, при 700 К от -300 до -460 кДж/моль. Это требование существенно ограничивает величину отношения O/M ($M = U + Pu$) смешанного ядерного топлива на основе UO_2 . По техническим условиям допустимое содержание углерода в таблетках составляет 100 ± 20 ppm, что при образовании из него CO и CO_2 может увеличить удельный объем ТГ до ~ 200 мм³/г UO_2 . Проведенные в МИФИ исследования газовыделения из таблеток UO_2 , содержащих добавки оксидов Се, Gd, Nb и др., показали резкое увеличение в выделяющихся ТГ концентрации CO и CO_2 , которое может возрастать по мере выгорания топлива. Так, было обнаружено, что в таблетках UO_2 — 20 масс.% CeO_2 газовыделение превышает 100 мм³/г. Поскольку газовыделение под оболочку твэла — одна из важнейших характеристик топлива с точки зрения обеспечения безопасности его эксплуатации, особенно при достижении глубоких выгораний, то это говорит о необходимости более детального исследования процесса газовыделения из таблеток как

МОКС-топлива $(U_{0,8}Pu_{0,2})O_{2-x}$, так и МОЯТ, в котором наряду с 5–8 масс.% выгорающего поглотителя Gd_2O_5 в краевой зоне будут накапливаться растворимые продукты деления (РЗЭ, Zr, Ti и др.) и актиноиды в 2–3 раза быстрее, чем в среднем по радиусу сердечника, в результате чего их суммарное количество может достигать 12–15 масс.% при среднем выгорании 80 ГВт·сут/т U.

Цель работы — определение зависимости удельного газовыделения из таблеток $(U,Ce)O_{2+x}$ от концентрации церия, пористости, величины О/М ($M=U+Ce$) и длительности хранения после спекания.

Характеристика образцов модельного МОКС-топлива

Образцы UO_2-CeO_2 , содержащие 0,5, 10, 15, 20 и 25 масс.% CeO_2 , были получены методом порошковой металлургии, включающим следующие операции: а) подготовка шихтового состава; б) многоступенчатое механическое смешивание компонентов в заданной пропорции; в) получение прессовок ($P=100$ МПа); г) дробление и измельчение прессовок; д) получение гранулята требуемой фракции; е) холодное двухстороннее прессование таблеток при давлении $P=200$ МПа, плотность $5,0 \pm 0,3$ г/см³; ж) сушка и предварительный отжиг при 1073 К в течение 1 часа; з) высокотемпературное спекание таблеток в газовой среде $Ag-7\% H_2$ при 1873 К в течение 2 часов.

Плотность образцов определяли методом гидростатического взвешивания в воде. Абсолютная погрешность определения плотности составляет $\pm 0,03$ г/см³ при доверительной вероятности 0,95.

Для выявления микроструктуры были проведены металлографические исследования торцевых поверхностей таблеток. Средний размер зерна для образца UO_2 составляет от 3 до 20 мкм, при этом поры диаметром 0,5–1,5 мкм имеют бимодальное распределение, причем во всех крупных зернах имеются поры. Микроструктура образцов UO_2 , содержащих от 5 до 25 масс.% CeO_2 , однофазная и существенно отличия от UO_2 не имеет, за исключением большего количества пор.

Рентгенографический анализ таблеток

$U_{1-y}Ce_yO_{2-x}$

Рентгенографический анализ таблеток модельного МОКС-топлива $U_{1-y}Ce_yO_{2\pm x}$, содержащих CeO_2 от 0 до 25 масс.% ($y=0-0,3434$), с целью определения их фазового состава и отношения О/М, проводили на дифрактометре ДРОН-3 на CuK_{α} -излучении с исполь-

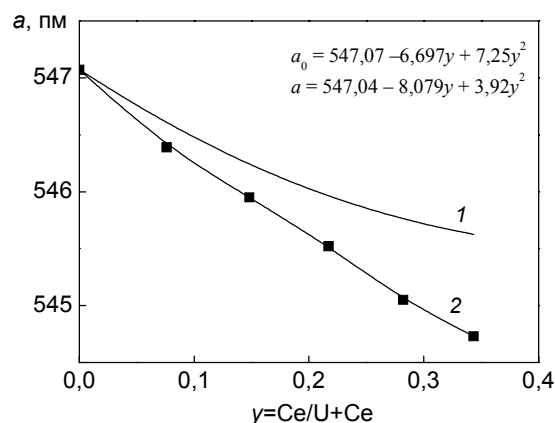


Рис. 1. Зависимость параметра решетки образцов $(U,Ce)O_2$ от содержания церия: 1 – отношение $O/(U+Ce) = 2,000$ [3], 2 – отношение $O/(U+Ce)$ от 2,00 ($y=0$) до 1,984 ($y=0,3434$).

зованием монохроматического рассеянного излучения. Поскольку все образцы оказались однофазными, то это свидетельствует об образовании твердого раствора на основе UO_2 .

Определение параметров решетки проводили по дифракционным максимумам (422), (511), (622) и (533), съемку вели в дискретном режиме с последующей обработкой результатов методом экстраполяции на $\theta = 0^\circ$. Точность определения параметра решетки не хуже $\pm 0,05$ пм. Рассчитанные параметры решетки образцов $U_{1-y}Ce_yO_{2\pm x}$, позволили описать зависимость a от концентрации церия y следующим уравнением

$$a = 547,04 - 8,079y + 3,92y^2. \quad (1)$$

На рис. 1 приведены найденная нами зависимость параметра решетки a от содержания церия для отношения $O/(U+Ce) < 2$, а также зависимость a_0 от y для $O/(U+Ce) = 2,000$ из работы [3]

$$a_0 = 547,07 - 6,697y - 7,25y^2. \quad (2)$$

Для определения $\Delta a = a_0 - a$ из уравнений (1) и (2) следует

$$\Delta a = 0,032 + 1,382y + 3,33y^2. \quad (3)$$

Проведенные исследования кислородного потенциала полученных образцов $(U,Ce)O_2$ при 1873 К дали среднюю величину -290 ± 5 кДж/моль.

Используя полученные нами результаты [4] кулонометрического титрования уран-цериевых образцов $U_{0,718}Ce_{0,282}O_{2\pm x}$ в интервале 1123–1323 К, выполняемого при их окислении от 2,000 до 2,007 и восстановлении от 2,000 до 1,981, была построена зависимость $\Delta \bar{G}_{O_2}$ от отношения $O/(U+Ce)$ при 1873 К, приведенная на рис. 2, из которой следует что для образцов, содержащих 20 масс.% CeO_2 ($y=0,282$), при $\Delta \bar{G}_{O_2} = -290$ кДж/моль отношение О/М составляет 1,993. Затем, используя величину Δa из уравне-

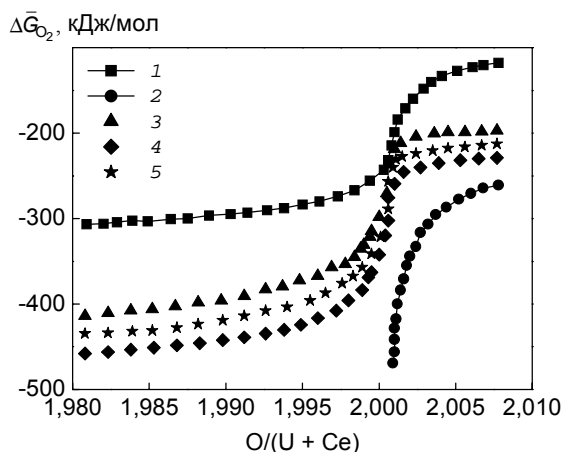


Рис. 2. Температурная зависимость $\Delta\bar{G}_{O_2}$ уран-цериевого оксида $U_{0,718}Ce_{0,282}O_{2\pm x}$ от отношения $O/(U + Ce)$: 1 – экстраполяция ($y = 0,252$; $T = 1873$ К), 2 – UO_2 ($y = 0$; $T = 1873$ К), 3 – 5 – кулонометрическое титрование в интервале 1123 – 1223 – 1323 К [5].

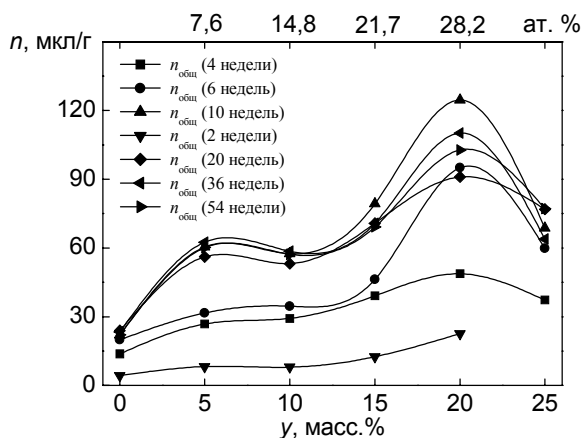


Рис. 3. Концентрационная зависимость удельного газовойделения $n_{\text{общ}}$ из образцов $U_{1-y}Ce_yO_{2-x}$ при длительности хранения после спекания от 2 до 54 недель.

ния (3), была получена зависимость величины отклонения от стехиометрии

$$x = \frac{0,032 + 13,82y + 3,33y^2}{13,39 + 126,418y}, \quad (4)$$

где y — содержание церия, которое использовали для определения нестехиометрии образцов $U_{1-y}Ce_yO_{2\pm x}$ спеченных в газовой среде $Ar - 7\% H_2$ при 1873 К.

Исследование газовойделения из образцов $U_{1-y}Ce_yO_{2-x}$

Удельное газовойделение из образцов модельного смешанного оксидного топлива $U_{1-y}Ce_yO_{2-x}$, где церий является как имитатором выгорающего поглотителя нейтронов, растворимых в матрице продуктов деления (ПД), так и аналогом плутония, определяли методом термоэкстракции при 1873 К в вакуум. Концентрация церия в образцах составляла от 0 до 25 масс. % ($y = 0 - 0,3434$), а величина нестехиометрии x изменялась от +0,001 ($y = 0$) до -0,018 ($y = 0,076$). Концентрационная зависимость удельного газовойделения $n_{\text{общ}} = n_{H_2} + n_{H_2O} + n_{CO} + n_{CO_2}$, при длительности хранения от 2 до 54 недель представлена на рис. 3, а значения плотности, объема пор, кислородного потенциала и парциального давления кислорода при 1873 К, а также удельное газовойделение n_i приведены в таблице.

Анализ полученных результатов зависимости газовойделения из образцов $U_{1-y}Ce_yO_{2-x}$ от содержания Ce и величины $\Delta\bar{G}_{O_2}$ показывает, что максимальные измеренные значения $n_{\text{общ}}$ достигают $125 \text{ мм}^3/\text{г}$ UO_2 , а предельные могут доходить до $160 - 200 \text{ мм}^3/\text{г}$

UO_2 , при условии наличия градиента кислородного потенциала между поверхностью образца и его внутренней частью. Это необходимое условие для диффузии кислорода и образования CO/CO_2 .

Коэффициенты диффузии кислорода \tilde{D}_O в образцах $(U, Ce)O_{2-x}$ и UO_{2+x} были измерены в интервале 1000 – 1600 К с помощью устройства, включающего твердоэлектродную гальваническую ячейку, обладающую кислородной проводимостью, путем пропускания постоянного тока через ячейку и измерения ЭДС ячейки во времени [5, 6]. Величина \tilde{D}_O для образцов $U_{0,718}Ce_{0,282}O_{1,998}$ и $UO_{2,001}$ при 1600 К составила соответственно $1,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$ и $3,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными работы [7], в которой для $U_{1-y}Ce_yO_{2-x}$ при 1873 К получено значение $3,87 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$, а также с результатами работ [8 – 10] для UO_2 , в которых величина \tilde{D}_O не превышает $4,7 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$.

По-видимому, такое различие в величине \tilde{D}_O для образцов $(U, Ce)O_2$ и UO_2 является основной причиной столь существенного увеличения газовойделения из образцов оксидного ядерного топлива на основе UO_2 при наличии в них растворенных атомов имитаторов ПД, плутония или пластифицирующих добавок оксидов Nb, Cr, Ti и др.

Полученные результаты по газовойделению говорят о том, что количество термоэкстрагированных газов из образцов $(U, Ce)O_2$ зависит от пористости таблеток, содержания в них оксида церия, а также степени нестехиометрии. При этом содержание в них $(H_2 + H_2O)$ изменяется в довольно узком

Выделение из спеченных таблеток $U_{1-y}Ce_yO_{2\pm x}$ технологических газов $n_{общ}$, n_{H_2} , n_{H_2O} , n_{CO} , n_{CO_2} , а также значения $\Delta\bar{G}_{O_2}$ и величина P_{O_2} при 1873 К

№ образца,	τ , недели	Ce,		ρ , г/см ³	$V_{пор}$, мм ³ /г	n_i , мм ³ /г					P_{O_2} , 10 ⁻⁹ атм	$\Delta\bar{G}_{O_2}$, кДж/моль
		масс. %	мол. %			Общ	H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂		
Ce 0-2	2	0	0	9,85	10,32	29,3	2,25	0,40	25,8	0,9	0,26	-343
Ce 0-3	8			9,84	10,40	21,8	2,18	0,36	18,6	0,7	0,28	-343
Ce 0-4	10			9,94	9,40	23,0	1,65	0,32	20,3	0,9	0,37	-338
Ce 0-5	21			9,92	9,6	23,6	1,32	0,34	20,8	1,2	0,65	-330
Ce 0-6	36			9,93	9,5	23,8	2,50	0,39	20,16	0,71	0,25	-344
Ce 0-7	54			9,85	10,3	22,5	1,33	0,43	19,3	1,4	1,05	-322
Ce 5-2	2	5	7,6	8,70	22,14	26,8	3,06	0,49	23,0	2,3	2,04	-312
Ce 5-3				8,87	19,9	24,3	0,5	0,40	19,6	3,7	7,25	-292
Ce 5-4	8			8,94	19,1	31,3	1,0	0,44	27,0	2,6	1,91	-313
Ce 5-5				9,00	18,32	56,3	0,66	0,48	47,5	7,7	5,3	-297
Ce 5-6	10			8,92	19,32	46,7	0,92	0,47	40,6	4,6	2,64	-308
Ce 5-7	21			8,96	18,8	56,1	0,94	0,52	48,6	6,0	3,14	-305
Ce 5-8				8,86	20,1	59,4	0,56	0,59	47,11	11,42	10,57	-286
Ce 5-9	36			8,71	22,0	62,4	0,62	0,70	48,88	12,17	12,5	-283
Ce 5-10				8,93	19,19	59,7	0,48	0,62	45,6	13,1	16,7	-279
Ce 5-11	54			8,92	19,32	60,6	0,46	0,56	46,8	12,8	15,0	-280
Ce 10-2	2	10	14,8	8,05	29,8	26,4	0,43	0,44	20,9	4,7	10,3	-286
Ce 10-3	8			8,26	26,7	25,4	0,41	0,40	20,0	4,6	10,5	-286
Ce 10-4	10			8,30	26,1	58,2	0,84	0,56	49,5	7,3	4,4	-299
Ce 10-5	21			8,26	26,7	53,1	0,87	0,58	45,0	6,7	4,5	-299
Ce 10-6	36			8,15	29,1	58,9	0,32	0,61	40,5	17,5	38,0	-266
Ce 10-7	54			8,08	29,4	57,6	0,32	0,61	39,8	17,0	37,0	-267
Ce 15-2	2	15	21,7	7,72	33,5	45,4	0,54	0,53	36,3	8,0	9,8	-287
Ce 15-3	8			7,87	31,0	35,1	0,47	0,56	26,9	7,2	14,2	-281
Ce 15-4	10			7,76	32,8	69,1	0,74	0,61	57,2	10,6	6,9	-293
Ce 15-5	21			7,75	33,0	70,9	0,72	0,68	57,5	12,0	8,9	-289
Ce 15-6	36			7,76	32,8	70,4	0,48	0,79	50,58	18,57	27,3	-271
Ce 15-7	54			7,67	34,3	79,3	0,48	0,79	57,07	20,97	27,3	-271
Ce 20-2	2	20	28,2	7,36	38,0	48,5	0,43	0,64	35,6	11,8	6,3	-294
Ce 20-3	8			7,55	34,7	85,1	0,86	0,82	68,9	14,5	9,0	-289
Ce 20-4	10			7,37	37,9	103,1	0,80	0,95	80,1	21,2	11,9	-284
Ce 20-5	21			7,48	35,9	90,9	0,48	0,77	66,1	23,5	25,6	-272
Ce 20-6	36			7,37	37,9	109,9	0,48	0,83	78,56	30,04	30,0	-270
Ce 20-7	54			7,50	35,6	124,9	0,40	1,07	77,43	46,97	73,0	-256
Ce 25-2	2	25	34,4	7,29	37,6	37,3	0,39	0,76	25,2	10,9	38,1	-266
Ce 25-3	8			7,34	36,7	59,9	0,37	0,83	39,3	19,3	49,0	-262
Ce 25-4	10			7,30	37,4	76,6	0,68	0,91	58,1	17,1	47,6	-278
Ce 25-5	21			7,28	37,8	77,0	0,47	0,73	56,3	19,5	24,3	-273
Ce 25-6	36			7,31	37,2	63,9	0,47	0,82	45,09	17,50	30,5	-269
Ce 25-7	54			7,25	38,4	69,0	0,39	0,87	45,3	22,4	49,5	-262

интервале (от 1 до 3 мм³/г), а количество CO + CO₂ достигает значений от 20 до 60 мм³/г, причем общее удельное газовыделение изменяется от 20 мм³/г ($y=0$) до 100 мм³/г ($y=0,282$).

Обсуждение результатов

После спекания при 1873 К и охлаждения таблеток $U_{1-y}Ce_yO_{2\pm x}$ до комнатной температуры и последующего заполнения печи воздухом происходит некоторое окисление поверхности таблеток, вслед-

ствие чего в приповерхностных слоях последних увеличивается содержание кислорода и, следовательно, возникает направленный к центру таблеток градиент кислородного потенциала, вызывающий диффузию кислорода в том же направлении.

Этот процесс приводит к образованию в закрытых порах в результате взаимодействия кислорода с примесным углеродом соответствующих количеств CO и CO₂, отношение которых CO/CO₂ будет расти по мере охлаждения таблеток. Таким образом, в спеченных таблетках в закрытых порах наряду с

газами H_2 и H_2O , которые есть в газовой среде при спекании таблеток, будут присутствовать также газы CO и CO_2 . При этом, суммарное содержание газов H_2 и H_2O в порах в процессе диффузии кислорода не изменяется, а уменьшается только отношение H_2/H_2O , в то время как суммарное содержание CO и CO_2 будет расти.

Кроме того, в процессе достижения термодинамического равновесия поверхности втулки с окружающей газовой средой при термоэкстракции за счет диффузии кислорода и углерода будут образовываться CO и CO_2 , соотношение между которыми зависит от кислородного потенциала образца. В результате сумма $n_{CO} + n_{CO_2}$ в несколько раз больше $n_{H_2} + n_{H_2O}$.

Поскольку церий — химический аналог плутония, то полученные результаты по газовыделению из спеченных таблеток $U_{1-y}Ce_yO_2$ ($y > 0,03$), которые превышают предельное значение 50 мм^3 , установленное ТУ на штатные таблетки, могут свидетельствовать о том, что подобное значительное или более высокое газовыделение будут иметь таблетки из смешанного уран-плутониевого оксидного топлива. Это указывает на необходимость дальнейших исследований в этом направлении с целью разработки дополнительных методик по снижению газовыделения из таблеток МОКС-топлива.

Проведенные последние измерения периода решетки образцов оксидного ядерного топлива, полученных путем спекания при 1873 К в аргоно-водородной среде, UO_{2+x} , $(U, Gd)O_{2+x}$, $(U, Nb)O_{2+x}$, $(U, Ce)O_{2+x}$, показали, что у всех образцов приповерхностный слой имеет величину отношения О/М больше, чем на глубине, превышающей $50 - 100 \text{ мкм}$.

Следовательно, в таблетках оксидного ядерного топлива на основе UO_2 после их спекания всегда имеется градиент кислорода, направленный от поверхности вглубь таблетки. При термической экстракции технологических газов из топливных таблеток количество выделившихся из неё CO и CO_2 зависит как от пористости, так и от величины кислородного потенциала таблетки и градиента О/М. Поскольку в исходном порошке UO_2 всегда имеется углерод, количества которого достаточно для образования $150 - 200 \text{ мм}^3$ ($CO + CO_2$) на $1 \text{ г } UO_2$, то это в $3 - 4$ раза превышает предельно допустимую норму газовыделения, равную $50 \text{ мм}^3/\text{г}$.

Для штатных таблеток UO_2 , не содержащих легирующих добавок и полученных по заводской технологии, «штатная» величина О/У обычно составляет от $2,000$ до $2,005$, а кислородный потенциал при 1273 К имеет значение ниже -320 кДж/моль . В результате при термоэкстракции из таких таблеток

выделяется в основном водород, около $5 - 6 \text{ мм}^3/\text{г}$, количество которого, как правило, равно объему пор, а содержание CO и CO_2 не превышает $0,5 - 1 \text{ мм}^3/\text{г}$. Газовыделения из таких таблеток в $5 - 8$ раз меньше предельно допустимой величины по ТУ.

Однако, введение легирующих элементов в таблетки UO_2 (МОЯТ) приводит к изменению отношения О/М и увеличению градиента кислородного потенциала, вследствие чего резко повышается концентрация CO и CO_2 в термоэкстрагированных газах, общее содержание которых может превысить $50 \text{ мм}^3/\text{г}$. Аналогичная ситуация будет возникать в топливных таблетках на основе UO_2 и в процессе их эксплуатации в твэле из-за образования растворимых в матрице UO_2 продуктов деления (Nd, Y, Ce, Pu и т.д.), что приведет к существенному газовыделению из топлива при росте температуры таблеток с увеличением выгорания и образования периферийной *rim*-зоны и радиального градиента кислородного потенциала.

Выводы

1. Удельное газовыделение из образцов модельного смешанного оксидного топлива $U_{1-y}Ce_yO_{2\pm x}$ зависит от концентрации церия, пористости, кислородного потенциала и величины радиального градиента кислорода.

2. Исследования газовыделения из образцов $(U, Ce)O_{2\pm x}$, где церий является как имитатором продуктов деления и выгорающего поглотителя нейтронов, так и аналогом плутония и других актиноидов, показали, что содержание растворимых продуктов деления и актиноидов в матрице UO_2 и наличие градиента кислородного потенциала приводят к существенному повышению выделения технологических газов CO/CO_2 , объем которых может превышать $160 - 200 \text{ мм}^3/\text{г } UO_2$, что сравнимо с величиной ГПД, выделяющихся из ОЯТ при выгорании $80 \text{ ГВт-сут/г } U$.

3. На основании полученных данных по газовыделению из таблеток $(U, Ce)O_2$ при окислении их поверхности можно утверждать, что в процессе выгорания в таблетках МОЯТ будет расти доля CO/CO_2 в удельном газовыделении вследствие повышенного в $2 - 3$ раза выгорания на поверхности топливной таблетки и возникновения в результате этого радиального градиента кислородного потенциала.

Литература

1. Стратегия развития атомной энергетики в первой половине XXI века. М: ФГУП «ЦНИИАтоминформ», 2001, 64 с.

2. Бибилашвили Ю.К. Состояние работ по совершенствованию материалов и твэлов для реакторов ВВЭР и РБМК. Тез. доклада на международной конференции “Атомная энергетика на пороге XXI века”. Электросталь, 2000, с. 3.
3. Norris D.J.R., Ray P. Oxygen potential a lattice parameter measurements in $(U, Ce)O_{2-x}$. J. Nucl. Mater., 1983, v. 116, p. 184 – 194.
4. Баранов В.Г., Иванова Н.А. Кислородный потенциал уран-цериевого оксида. Перспективные материалы. 2008, № 4, с. 40 – 44.
5. Баранов В.Г., Годин Ю.Г., Хлунов А.В.. Способ определения коэффициента диффузии кислорода в металлах и окислах. Авт. св-во СССР № 911292, Б.И., 1982, №9.
6. Баранов В.Г., Годин Ю.Г., Хлунов А.В.. Устройство для измерения коэффициента диффузии кислорода в металлах и окислах. Авт. св-во СССР № 966581, Б.И., 1982, № 38.
7. Bayoglu A.S., Lorenzelli R. Diffusion de l'oxygene dans $(U,Ce)O_{2+x}$. J. Nucl. Mater., 1981, v. 101, p. 235 – 237.
8. Taylor P. Thermodynamic and kinetic aspects of UO_2 fuel oxidation in air at 400 – 2000 K. Journal of Nuclear Materials, 2005, v. 344, p. 206 – 212.
9. Hj Matvke. Diffusion processes in nuclear fuels. Journal of the Less Common Metals, 1986, v. 121, p. 537 – 564.
10. Lewis B.J., Thompson W.T., Akbari F., Thompson D.M., Thurgood C., Higgs J. Thermodynamic and kinetic modelling of fuel oxidation behaviour in operating defective fuel. Journal of Nuclear Materials, 2004, v. 328, p. 180 – 196.

Баранов Виталий Георгиевич — Московский инженерно-физический институт (государственный университет), кандидат технических наук, заведующий НИС. Специалист в области радиационной физики твердого тела и реакторного материаловедения.

Хлунов Александр Витальевич — Министерство образования и науки, кандидат технических наук, директор департамента. Специалист в области радиационной физики твердого тела и реакторного материаловедения.

Тенишев Андрей Вадимович — Московский инженерно-физический институт (государственный университет), кандидат технических наук, доцент. Специалист в области радиационной физики твердого тела и реакторного материаловедения.