

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ОКСИДОВ, СТРУКТУРИРУЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ НАНОТЕХНОЛОГИИ

И.С. Курина, О.В. Серебренникова, В.Н. Румянцев, А.М. Дворяшин
ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Представлены результаты исследований топливной композиции PuO_2 - MgO на основе PuO_2 и имитатора CeO_2 . При изготовлении порошков и модифицированных таблеток использована разработанная в ГНЦ РФ-ФЭИ водная нанотехнология получения оксидных керамических материалов, включающая в себя получение осадка, содержащего одновременно частицы разных размеров, в том числе наночастицы, с последующими операциями прокаливания, прессования и спекания. Такая технология позволяет модифицировать структуру спеченных таблеток. Модифицированные таблетки имеют аномально повышенную теплопроводность, измеренную методом осевого теплового потока.

Ключевые слова: топливо с инертной матрицей (IMF), нанотехнология, соосаждение, порошок, свойства, морфология, дифференциальный термический анализ, модифицированные таблетки, повышенная теплопроводность, микроструктура.

Key words: Inert Matrix Fuel, nanotechnology, coprecipitation, powder, properties, morphology, differential thermal method, modified pellets, increased thermal conductivity, microstructure.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из путей модернизации активных зон ядерных реакторов для выжигания плутония является использование принципиально нового топлива – без ^{238}U с заменой его инертным (неделящимся) разбавителем. В качестве инертного разбавителя (матрицы) PuO_2 в данной работе рассматривается оксид магния. Топливо с инертной матрицей (IMF) PuO_2 - MgO предназначено для утилизации плутония в быстрых натриевых реакторах.

Поведение топлива под облучением значительно зависит от свойств (плотности, пористости, микроструктуры, теплопроводности, механической прочности и т.д.) этого топлива, соответственно от способа его изготовления. В процессе изготовления топливных таблеток используют способы механического смешения порошков и соосаждения компонентов. При применении водного способа получения порошков такие технологические операции как осаждение и прокаливание оказывают решающее влияние на свойства готовой продукции [1, 2]. Многие исследователи работают над усовершенствованием свойств керамики. Как правило,

эти исследования сводятся к введению различных добавок, в том числе нанодобавок, в полученные порошки оксидов.

В ФЭИ разработана технология получения оксидных керамических материалов, включающая в себя получение осадка, содержащего одновременно частицы разных размеров, в том числе наночастицы, с последующим прокаливанием при температуре морфологического превращения частиц [2, 3]. Полученные порошки приобретают особые свойства. Использование таких порошков позволяет изготовить спеченные изделия модифицированной оксидной керамики (UO_2 , ThO_2 , $(\text{U,Th})\text{O}_2$, PuO_2+MgO , BaPuO_3 , MgO , Gd_2O_3 , MgAl_2O_4 , CeO_2+MgO и др.) [4–9], отличающиеся аномальным повышением теплопроводности с ростом температуры после 500–800°C (в 2–3 раза выше справочных данных при 800–1000°C), а также повышенной плотностью (98–99% теоретической плотности), пластичностью и термостойкостью.

В работе приведены результаты исследований порошков и спеченных таблеток топливной композиции $\text{PuO}_{2-x}\text{-MgO}$ с использованием PuO_2 и его имитатора CeO_2 .

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТОПЛИВНОЙ КОМПОЗИЦИИ $\text{PuO}_{2-x}\text{-MgO}$

Процесс изготовления топливных таблеток 40%мас. PuO_{2-x} +60%мас. MgO включал в себя операции химического соосаждения соединений плутония и магния из раствора, прокаливания осадка [2, 3], прессования и спекания таблеток. Были установлены оптимальные параметры технологического процесса получения топлива [5–7]. С помощью метода сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Quanta промышленной серии Inspect S, оснащенный рентгеновским энергодисперсионным спектрометром Genesis-4000 фирмы EDAX, в прокаленном при различных температурах осадке были обнаружены интересные эффекты. Порошок $\text{PuO}_2\text{-MgO}$ после прокаливания осадка при температуре 1000°C [5, 6] содержал частицы разного фракционного состава: частицы окатанной формы с размерами 1–2 мкм и ультрадисперсные частицы с размерами ≤ 100 нм (рис. 1а). Дальнейшее повышение температуры приводит к срачиванию (сплавлению) отдельных частиц (рис. 1б,в).

Фазовый состав порошка: PuO_2+MgO . Таблетки, полученные из этого порошка, не имели дефектов, а плотность их после спекания при 1500°C составила 90% теоретической плотности (ТП) [6, 7]. Фазовый состав таблеток соответствовал PuO_2 , MgO и предположительно $\text{Pu}_2\text{O}_3\cdot 2\text{PuO}_2$ с параметрами элементарных ячеек соответственно $5,395\pm 0.001$, $4,211\pm 0.001$ и $5,198\pm 0.001\text{Å}$ [8]. Отношение O/Pu составило 1,997–1,998.

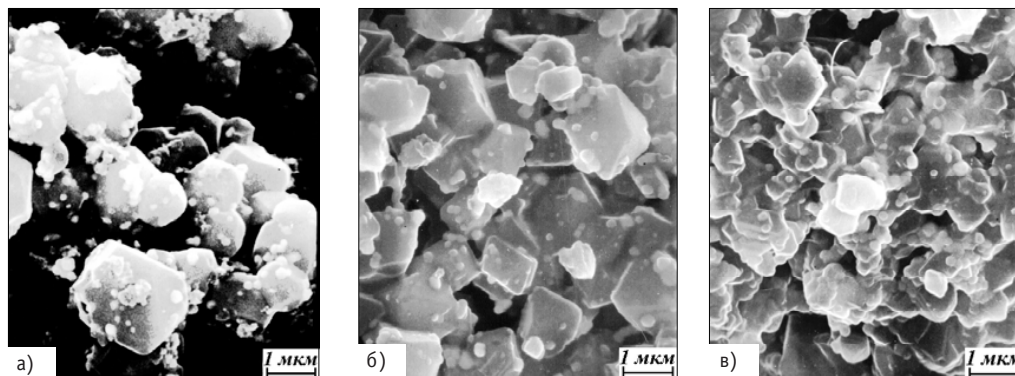


Рис. 1. Морфология ($\times 10000$) порошка 40%мас. PuO_{2-x} +60%мас. MgO , прокаленного при температурах, °C: 1000 (а), 1100 (б) и 1200 (в)

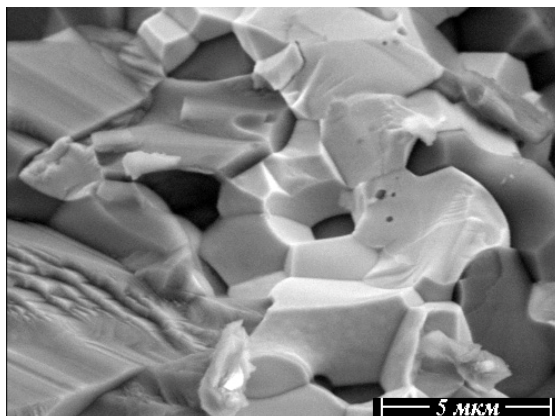


Рис. 2. Структура излома модифицированной таблетки 40%мас. PuO_{2-x} +60%мас. MgO

Исследование излома разрушенной таблетки $\text{PuO}_{2-x}\text{-MgO}$ (рис. 2) показало следующее [7, 10]. Светлые участки, обогащенные плутонием, имеют межкристаллитный характер разрушения с образованием хорошо выраженных зернограницных фасеток. Размер зерен составляет 3–5 мкм. Серые участки, обогащенные магнием, разрушились транскристаллитно, обнажив более крупные зерна (7–10 мкм), на которых видны ступеньки скола и веерные узоры. Следует отметить, что все зерна топлива $\text{PuO}_{2-x}\text{-MgO}$ отличаются монолитностью (т.е. отсутствием пористости). Ограниченные поры размером 2–3 мкм располагаются преимущественно по границам зерен.

Модифицированные топливные таблетки с подобной структурой имели аномально высокую теплопроводность (λ), измеренную методом осевого теплового потока в стационарном режиме в диапазоне температур 100–600°C. При температуре 500°C значения коэффициента теплопроводности для PuO_2 , MgO и $\text{PuO}_{2-x}\text{-MgO}$ составляют соответственно 3,5 [10], 10 [11] и 24,2 [5–7] Вт/м·град. Теплопроводность модифицированного топлива $\text{PuO}_{2-x}\text{-MgO}$ имеет повышенные значения по сравнению со справочными данными по теплопроводности отдельных компонентов PuO_2 и MgO , в данном случае более чем в два раза выше λ MgO .

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИЦИИ $\text{CeO}_2\text{+MgO}$

Изготовление. Ввиду технических трудностей, связанных с высокой токсичностью соединений плутония, на начальном этапе работы используют не оксид плутония, а оксид церия, на нем отрабатывают все технологические операции. Многие исследователи широко применяют церий как заменитель плутония в связи с тем, что по своим технологическим и физико-химическим свойствам оксиды церия и плутония довольно близки [12]. С целью изучения дополнительных свойств порошков, используемых для изготовления модифицированной керамической композиции $\text{PuO}_{2-x}\text{-MgO}$ с необычными свойствами, были проведены исследования с использованием имитатора CeO_2 вместо PuO_2 .

Исследовалась композиция 30%мас. CeO_2 +70%мас. MgO , в которой объемное соотношение составляющих компонентов соответствует композиции 40%мас. PuO_{2-x} +60%мас. MgO .

Были изготовлены следующие образцы:

- порошок CeO_2 (осаждение и прокаливание в ФЭИ);
- таблетки MgO с плотностью 96% ТП из приобретенного порошка MgO фармацевтического (прокаливание, прессование и спекание в ФЭИ);

- таблетки MgO с плотностью 96% ТП (осаждение, прокаливание, прессование и спекание в ФЭИ);
- таблетки композиции 30%мас. CeO_2 +70%мас. MgO с плотностью 93% ТП способом механического смешения полученного в ФЭИ порошка CeO_2 и фармакопейного порошка MgO ;
- таблетки композиции 30%мас. CeO_2 +70%мас. MgO с плотностью 92% ТП способом соосаждения (соосаждение, прокаливание, прессование и спекание в ФЭИ).

Исследование S_{BET} -порошков. Методом Брюнера-Эммета-Теллера (Brunauer-Emmett-Teller) или BET определяли полную удельную поверхность порошков. В таблице 1 приведены значения S_{BET} порошков, полученных после прокаливания осадков при температурах 700 и 1000°C. Видно, как температура прокаливания осадков сильно влияет на значения S_{BET} , которые, в свою очередь, оказывают решающее влияние на плотность и качество спеченных таблеток [1, 2]. В процессе исследований композиции PuO_{2-x} - MgO была определена оптимальная температура прокаливания (1000°C) осадка гидроксидов плутония и магния [5, 6], но измерить полную удельную поверхность порошка не представлялось возможным из-за высокой токсичности материала. Исследование свойств композиции с использованием имитатора CeO_2 позволило установить оптимальное значение S_{BET} порошка, которое составляет 7–8 м²/г.

Таблица 1

Полная удельная поверхность порошков оксидов

Состав	Способ получения	T прокаливания, °C	S_{BET} м ² /г
CeO_2	Осаждение	700	39,9
CeO_2	Осаждение	1000	1,80
MgO	Фармакопейный порошок	1000	27,86
MgO	Осаждение	1000	18,11
30% CeO_2 +70% MgO	Соосаждение	700	18,93
30% CeO_2 +70% MgO	Соосаждение	1000	7,68

Дифференциальный термический анализ осадков (DTA). Чтобы установить разницу в процессах, происходящих при термическом разложении порошков, полученных соосаждением и механическим смешением осадков $\text{Ce}(\text{OH})_3$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$, были проведены исследования с применением метода DTA на дериватографе типа 3431-904 Q-1500 D (Венгрия). Кривые DTA в зависимости от температуры T представлены на рис. 3.

При нагреве свежееосажденного $\text{Mg}(\text{OH})_2$ имеется один эндопик при 400°C (рис. 3а). Нагрев свежееосажденного $\text{Ce}(\text{OH})_3$ приводит к появлению экзотермического пика на кривой DTA при 300°C (рис. 3б).

При термическом разложении механически смешанных осадков $\text{Ce}(\text{OH})_3$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$ на кривой DTA (рис. 3в) при 400°C наблюдается эндопик, соответствующий превращению индивидуального осадка $\text{Mg}(\text{OH})_2$, и при 320°C – еле заметный экзопик (на эндопике), соответствующий фазовому превращению индивидуального осадка $\text{Ce}(\text{OH})_3$. После ~200 °C масса смеси постоянно увеличивается, о чем свидетельствует кривая TG (кривая термогравиметрического анализа), констатирующая изменение массы образца. Скорости изменения массы соответствует кривая DTG (дифференциальный термогравиметрический анализ). При термическом

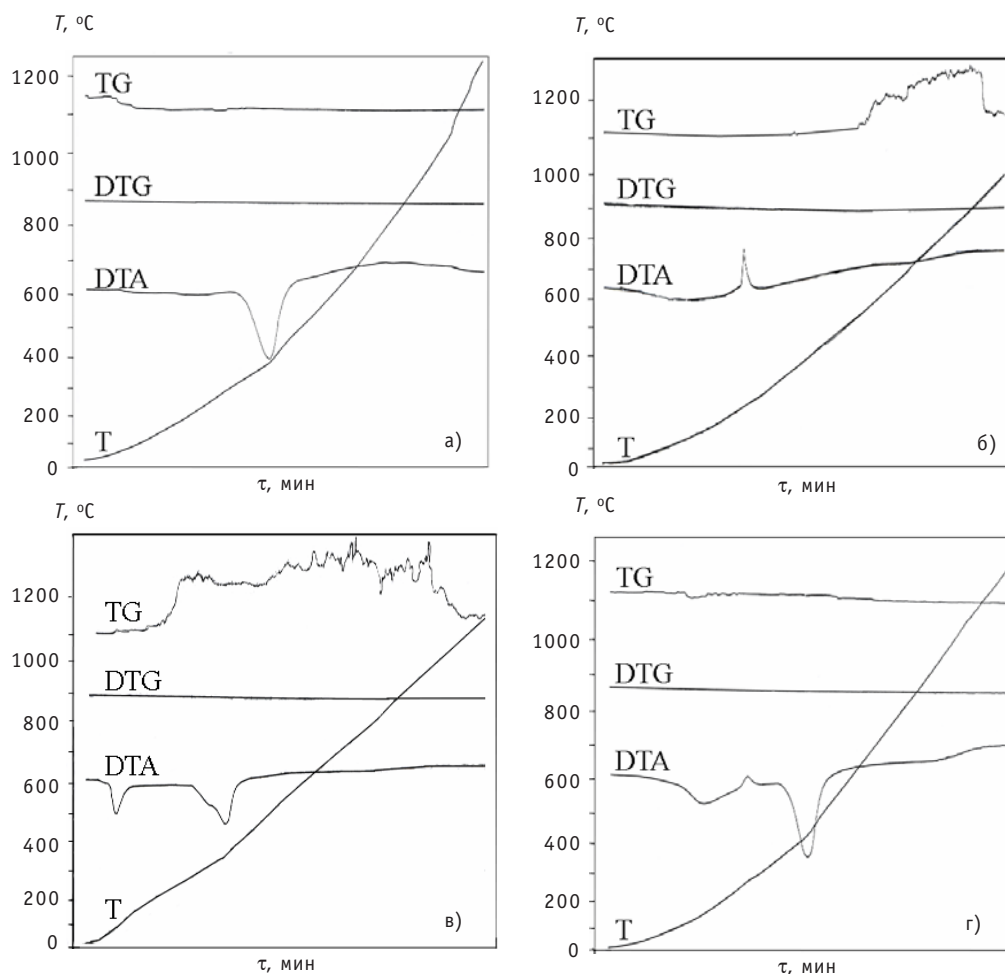


Рис. 3. Кривые DTA, TG и DTG осадков: а) $\text{Mg}(\text{OH})_2$ свежеосажденного; б) $\text{Ce}(\text{OH})_3$ свежеосажденного; в) $\text{Ce}(\text{OH})_3 + \text{Mg}(\text{OH})_2$ (механической смеси осадков «а» и «б»); г) $\text{Ce}(\text{OH})_3 + \text{Mg}(\text{OH})_2$ соосажденного

разложению осадка $\text{Ce}(\text{OH})_3 + \text{Mg}(\text{OH})_2$, полученного соосаждением при оптимальных режимах в ФЭИ, на кривой DTA (рис. 3г) при 280°C наблюдается четкий экзопик, соответствующий фазовому превращению индивидуального осадка $\text{Ce}(\text{OH})_3$, и при 430°C эндопик, соответствующий превращению индивидуального осадка $\text{Mg}(\text{OH})_2$. После $\sim 200^\circ\text{C}$ масса смеси практически не изменяется.

Таким образом, можно отметить, что активность осадка $\text{Ce}(\text{OH})_3 + \text{Mg}(\text{OH})_2$, полученного соосаждением, велика. При нагревании такого осадка происходят процессы, которые характерны и для $\text{Ce}(\text{OH})_3$ и $\text{Mg}(\text{OH})_2$ в отдельности. Нагрев механически смешанных осадков приводит к подавлению процессов, происходящих с $\text{Ce}(\text{OH})_3$ при нагревании. Кроме того, на производстве, как правило, смешивают не осадки, а уже прокаленные при определенных температурах оксиды, т.е. в последнем случае все важные процессы, приводящие к изменению структуры или фазовых состояний, уже закончены для каждого компонента. Тогда как при прокаливании соосажденного порошка эти процессы происходят в тесном соприкосновении частиц того и другого компонента, дополняя друг друга. В рассматриваемом конкретном случае, например, изменения в $\text{Ce}(\text{OH})_3$, сопровождающиеся экзотермическим эффектом, вызовут одновременно напряжения и какие-либо изменения

(структурные, появление дефектов и др.) в $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и, соответственно, наоборот. Известно, что реакционная способность твердых фаз, принимающих участие в химических реакциях, исключительно высока вблизи точек фазового перехода первого рода [13]. Возможно резкое увеличение самодиффузии вблизи фазового перехода при нагревании за счет возникновения внутренних поверхностей (дислокаций), которые образуются при разрыве кристалла как следствие напряжений, создаваемых новой фазой. Прокаливание при оптимальной температуре (в данном случае 1000°C) вызовет наибольшие напряжения в соосажденном порошке. Наличие наночастиц будет только усиливать эти процессы.

Область когерентного рассеяния (ОКР). Известно, что размер ОКР измеряется экспериментально на основании данных дифракции рентгеновских лучей и используется для оценки размеров кристаллитов в поликристаллах или порошковых наноматериалах. ОКР в этих случаях обычно отождествляют со средним размером кристаллитов. С использованием прибора ДРОН-7 в кобальтовом излучении был проведен рентгеноструктурный анализ порошков и таблеток. Размер кристаллитов определяли по известной формуле Шеррера [14]

$$\beta(2\theta) = \kappa\lambda/D\cos\theta,$$

где D – размер кристаллита, $\beta(2\theta)$ – ширина интерференционной линии, κ – постоянная Шеррера, λ – длина волны рентгеновского излучения, θ – угол Вульфа-Брэггов.

В соосажденном порошке $\text{Ce}(\text{OH})_3+\text{Mg}(\text{OH})_2$ значения ОКР CeO_2 ($85\text{--}93 \text{ \AA}$) в два раза меньше, чем значения ОКР CeO_2 (180 \AA) в индивидуальном осадке $\text{Ce}(\text{OH})_3$. Это может свидетельствовать о том, что размеры кристаллитов CeO_2 в осадке $\text{Ce}(\text{OH})_3+\text{Mg}(\text{OH})_2$ в два раза меньше, чем в индивидуальном осадке $\text{Ce}(\text{OH})_3$ (при одинаковых режимах осаждения). После прокали при 1000°C величина ОКР CeO_2 в соосажденном порошке $30\%\text{MgO}+70\%\text{CeO}_2$ составляет 860 \AA , тогда как значения ОКР CeO_2 в индивидуальном порошке CeO_2 в $\sim 2\text{--}2,5$ раза выше (от 1705 до $>2000 \text{ \AA}$).

Исследование микроструктуры таблеток. Проведенные СЭМ-исследования показали, что микроструктура спеченных таблеток $30\%\text{мас.}\text{CeO}_2+70\%\text{мас.}\text{MgO}$ (плотность = 92% ТП), изготовленных по водной нанотехнологии, схожа с микроструктурой топлива $40\%\text{мас.}\text{PuO}_{2-x}+60\%\text{мас.}\text{MgO}$. Зерна серой составляющей, обогащенной магнием, практически не имели пор. Поры располагались по границам зерен. В светлой составляющей, обогащенной церием, наблюдалась мелкая пористость от <10 нм до 200 нм, при этом поры были округлыми.

Исследование теплопроводности таблеток. Коэффициенты теплопроводности образцов (рис. 4) были измерены методом осевого теплового потока на установке в стационарном режиме в среде вакуума 10^{-3} мм рт. ст. в диапазоне температур от 100 до 900°C . Метод заключается в следующем [15]. Цилиндрический образец зажимается между основанием втулки основного нагревателя и теплоприемником, закрепленным на нижней опоре. Регулированием мощности основного нагревателя и нагревателя нижней стойки теплоприемника создается аксиальный тепловой поток заданной плотности в образце. К верхней и нижней торцевым поверхностям образца приклеены горячие спаи термопар, которые измеряют перепад температуры по высоте образца.

На рисунке 4 также приведены температурные зависимости теплопроводности для CeO_2 (кривая 1) и MgO (кривая 2) соответственно из работ [16] и [11]. Коэффициенты теплопроводности для образцов оксида магния (кривая 3), изготовленных из приобретенного порошка MgO фармакопейного (прокаленного при оптимальной температуре в ФЭИ), при низких температурах совпадают с литера-

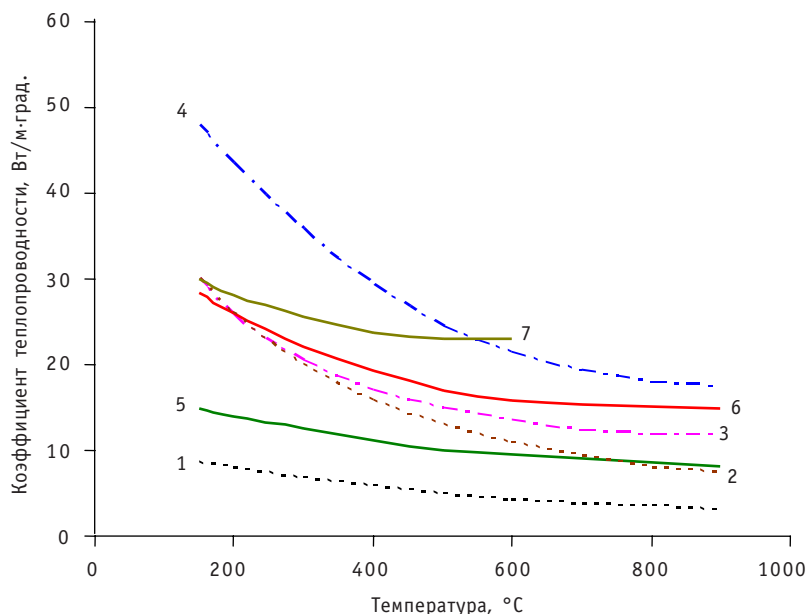


Рис. 4. Температурная зависимость теплопроводности для оксидов: 1 – CeO₂ [16]; 2 – MgO [11]; 3 – MgO с плотностью 96% ТП (таблетки изготовлены в ФЭИ из приобретенного фармакопейного порошка MgO); 4 – MgO с плотностью 96% ТП (порошок и таблетки изготовлены в ФЭИ); 5 – 30%мас.CeO₂+70%мас.MgO с плотностью 93% ТП (таблетки изготовлены в ФЭИ способом механического смешения полученного в ФЭИ порошка CeO₂ и фармакопейного порошка MgO); 6 – 30%мас.CeO₂+70%мас.MgO с плотностью 92% ТП (порошок и таблетки изготовлены в ФЭИ способом соосаждения); 7 – 40%мас.PuO₂+60%мас.MgO с плотностью 90% ТП (порошок и таблетки изготовлены в ФЭИ способом соосаждения)

турными данными, при повышенных температурах ($> 800^{\circ}\text{C}$) незначительно превышают известные данные, вероятно, вследствие оптимизации температуры прокаливания порошка. Образцы модифицированного оксида магния, изготовленные из порошка, полученного в ФЭИ по модернизированной технологии (оптимизированные режимы осаждения и прокаливания), имеют повышенную теплопроводность (кривая 4) в ~ 2 раза выше данных работы [11].

Теплопроводность образцов композиции 30%мас.CeO₂+70%мас.MgO с плотностью 93% ТП, изготовленных способом механического смешения полученного в ФЭИ порошка CeO₂ (прокаливание при оптимальной температуре) и фармакопейного порошка MgO (прокаливание при оптимальной температуре), изменяется от 15 до 8,3 Вт/м·град. при увеличении температуры от 150 до 900 $^{\circ}\text{C}$ (кривая 5). Теплопроводность модифицированных образцов 30%мас.CeO₂+70%мас.MgO с плотностью 92% ТП, изготовленных способом соосаждения, в ~ 2 раза выше и изменяется от 28,5 до 15 Вт/м·град. в той же области температур (кривая 6).

Таким образом, водная нанотехнология, включающая в себя оптимизацию осаждения и прокаливания порошков, позволяет получить модифицированные оксидные материалы с повышенной теплопроводностью. Следует отметить, что были изготовлены твэлы с модифицированным топливом 40%мас.PuO_{2-x}+60%мас.MgO [5–7], полученным по водной нанотехнологии, т.е. с участием «крупных» частиц и наночастиц. Твэлы в течение пяти лет облучались в реакторе БОР-60 (НИИАР) до выгорания 19% т.а. Послереакторные испытания твэлов и топлива [17] показали, что топливные таблетки не разрушились, не изменили своих геометрических размеров и микроструктуры, что является необычным для оксидной керамики. Этот факт может являться подтверждением того, что топливные таблетки действительно имели повышенную теплопроводность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы свойства топливной композиции $\text{PuO}_{2-x}\text{-MgO}$ с использованием PuO_2 и его имитатора CeO_2 . Модифицированные таблетки топливной композиции, полученные по водной нанотехнологии, обладают аномально повышенной теплопроводностью.

2. На имитаторе показано, что имеются значительные отличия свойств порошков, полученных по водной нанотехнологии и механическим смешением:

- с помощью ДТА установлено, что термическое разложение таких порошков происходит по разным механизмам;
- значения ОКР, полученные в результате анализа уширения дифракционных максимумов, отличаются ~ в два раза.

3. Исследования микроструктуры спеченных таблеток показали, что участки, обогащенные оксидом магния, в композиции $\text{PuO}_{2-x}\text{-MgO}$ не имеют пор, а в композиции $\text{CeO}_2\text{-MgO}$ имеют поры наноразмеров; крупные поры располагаются преимущественно по границам зерен. Минимизация пористости в зернах может быть причиной повышенной теплопроводности топлива из-за появления дополнительной фотонной составляющей теплопроводности.

Литература

1. Курина И.С. Влияние температуры прокаливания порошков на качество оксидного топлива // Атомная энергия. – 1999. – Т. 86. – Вып. 3. – С. 189-194.
2. Курина И.С. Способ получения изделий из керамики. Патент РФ на изобретение № 2135429 // Бюллетень «Изобретения». – 1999. – № 24. – С. 273.
3. Курина И.С., Попов В.В., Румянцев В.Н. Способ изготовления изделий из оксидной керамики с повышенной теплопроводностью / Патент РФ № 2323912, 2008.
4. Курина И.С., Гудков Л.С., Румянцев В.Н. Получение и исследование ThO_2 и $(\text{U,Th})\text{O}_2$ // Атомная энергия. – 2002. – Т. 92. – Вып. 6. – С. 432-438.
5. Курина И.С., Троянов В.М. Исследования вопросов использования топлив с инертными матрицами для уменьшения запасов плутония / В сб.: Новые материалы атомной техники. М.: МИФИ, 2003. – С. 18-25.
6. Курина И.С., Мосеев Л.И., Павлович В.Б., Дворяшин А.М., Алексеев Ю.В., Иванов С.Н. Изготовление твэлов с топливом $\text{PuO}_{2-x} + \text{MgO}$ / Избранные научные труды ГНЦ РФ-ФЭИ. – 1998. – С. 17-22.
7. Kurina I.S., Popov V.V., Moseyev L.I., Dvoryashin A.M. Characterization of Modified Inert Matrix Fuels. Working material of IAEA TM-LMFR-2005 (Obninsk). – IAEA, NPTDS/NE, Vienna, Austria, 2006 (06-17651). – P. 583-615.
8. Курина И.С., Ермолаев Н.П. Топливная композиция для реакторов на быстрых нейтронах и способ ее получения. Патент РФ на изобретение № 2098870 // Бюллетень «Изобретения». – 1997. – № 34. – С. 374.
9. Курина И.С., Попов В.В., Румянцев В.Н. Исследование свойств модифицированного диоксида урана // Атомная энергия. 2006. – Т. 101. – Вып. 5. – С. 347-352.
10. Котельников Р.Б., Башлыков С.Н., Каштанов А.И., Меньшикова Т.С. Высокотемпературное ядерное топливо. – М.: Атомиздат, 1969. – 366 с.
11. Хейг Дж.Р., Линч Дж.Ф., Рудник А., Хоулден Ф.С., Дакоурт У.Х. Огнеупоры для космоса: Справочник. – М.: Металлургия, 1967. – 266 с.
12. Ashish Jain, Ananthasivan K., Anthonysamy S. and Vasudeva Ra P.R. Synthesis and sintering of $(\text{U}_{0.72}\text{Ce}_{0.28})\text{O}_2$ solid solution // Journal of Nuclear Materials. 2005. – V. 345. – Iss. 2-3. – P. 245-253.
13. Крезер Ф. Химия несовершенных кристаллов. – М.: Мир, 1969. – с. 628.
14. Калиновски Е., Урбанчик Г.В. Химические волокна. – М., 1966. – 320 с.
15. Курина И.С., Попов В.В., Румянцев В.Н., Дворяшин А.М. Исследование свойств модифицированных оксидов с аномально повышенной теплопроводностью // Перспективные материалы. 2009. – № 3. – С. 38-45.

16. Андреевский Р.А., Спивак И.И. Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе: Справочник. – Челябинск: Металлургия, 1989.

17. Golovanov V.N., Kryukov F.N., Kuzmin S.V., *et al.* Results of Post-Irradiation Examinations of Nitride and Inert-Matrices Fuels Irradiated in BOR-60 Reactor. Working material of a IAEA Technical Meeting in Obninsk, Nov. 21-23, 2005. IAEA, NPTDS/NE, Vienna, 2006. – P. 740-778.

Поступила в редакцию 11.03.2009

condensation mode in the event of the beyond design basis accident has been carried out at the GE2M-PG large-scale facility. The tests were carried out under conditions of natural circulation, both in primary (condensing steam) and in the secondary (boiling water) circuits of the facility at primary circuit steam pressures P_{s1} : 0.21, 0.36, 0.77 MPa. The empirical correlations for prediction of the thermal capacity of heat-exchange apparatus working in the mode of steam condensation from pressure difference between circuits were obtained.

УДК 621.039.53

VVER-1000 Fuel Irradiation in the MIR Reactor under Conditions Simulating II and III Stage of the Design-Basis «Large-leak» Accident \A.V. Alekseev, A.V. Goryachev, V.V. Kalygin, I.V. Kiseleva, V.N. Shulimov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 5 pages, 5 illustrations. – References, 2 titles.

Presented are the testing procedure and results of a VVER-1000 fuel assembly fragment incorporating 19 fuel elements in the MIR reactor channel under conditions of the second and third stage of the «Large Leak» accident. In the experiment the final stage of the accident was simulated which takes place under non-compensatory escape of coolant from the primary cooling circuit as a result of rupture of the pipe having maximum diameter. The main purpose of the test is obtaining data on the cladding deformation of fuel elements with different fuel burnup under the above conditions.

УДК 621.039.7:546

Determination of Radiation Heterogeneity and Damaged Volume of Multiphase Actinide Compositions \A.A. Kozar; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 5 illustrations. – References, 12 titles.

The quantitative determination of radiation heterogeneity is proposed for multiphase actinide compositions. This parameter gives possibility to compare them radiation stability degree relative to a self-irradiation by heavy charged particles without the detailed description of these systems. The matrixes radiation heterogeneity is determined depending on diameter of included actinide microspheres and microcylinders. The calculation of matrixes damaged volume is made for different concentrations of included actinide microspheres and microcylinders depending on them diameter. It is shown, that increase of actinide phase size enables to increase its contents in a matrix without rise of dose load on a frame.

УДК 621.039.526:621.039.54

Investigation of Properties of Modified Oxides Structured by Nanotechnology \I.S. Kurina, O.V. Serebrennikova, V.N. Rumyantsev, A.M. Dvoryashin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 17 titles.

Research results on the $\text{PuO}_2 + \text{MgO}$ fuel composition with CeO_2 as a PuO_2 simulator are presented. The water nanotechnology for the production of oxide ceramic materials, developed in IPPE, is used for fabrication of powders and pellets. This technology includes obtaining precipitate, consisting of particles of different sizes as well as of nanoparticles, which is further calcinated, pressed and sintered. It results in modifying structure of the sintered pellets. Modified pellets have anomalously high thermal conductivity measured by the axial thermal current method.

УДК 621.039.534

Specificities of Reactor Coolant Pumps Units with Lead and Lead-Bismuth Coolant \A.V. Beznosov, M.A. Anotonenkov, P.A. Bokov, V.S. Baranov, M.C. Kustov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 3 illustrations.

The results of analysis of the impact of specific properties of lead and lead-bismuth coolant in the characteristics of their flow in the flow of the main circulating pumps and auxiliary power units with these coolants. The impossibility of cavitation (in its traditional sense) in a flow of impeller pumps, pumping lead and lead-bismuth coolants. The results of experimental studies discontinuities of the heavy liquid metal coolant and discussed conditions for the occurrence of cavitation in the flow of gas coolant. Is substantiated miscalculation of circulation pumps, pumping lead and lead-bismuth coolants, wetting the walls restricting the flow of traditional methods for water and sodium coolant.