

УДК 621.762

DOI dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-2-15-21

## Методы подготовки и получение исходных материалов для приготовления гранул оксида гадолиния, используемых при изготовлении композитного материала уран-гадолиниевого топлива

© 2016 г. Т.М. Алдажаров, Ю.Г. Русин, Ж.В. Еремеева, Т.А. Рыспаев

Восточно-Казахстанский государственный технический университет (ВКГТУ) им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», г. Москва

Технический университет Клаусталь, г. Клаусталь-Целлерфельд, Германия

Статья поступила в редакцию 15.10.15 г., доработана 02.03.16 г., подписана в печать 10.03.16 г.

В лабораторных условиях разработан способ получения эффективного композитного уран-гадолиниевого топлива, применение которого позволит улучшить технико-экономические показатели АЭС. На основе анализа полученных результатов проведено обоснование предложенного метода для его реализации в промышленных условиях. Описаны способы подготовки и получения исходных материалов для приготовления оксида гадолиния. В ходе экспериментов были установлены необходимые характеристики, которыми должны обладать таблетки перспективного композитного уран-гадолиниевого топлива, и с их учетом сформулированы окончательные требования, предъявляемые к данным таблеткам.

**Ключевые слова:** ядерное топливо, композитное уран-гадолиниевое топливо, выгорающий поглотитель, диоксид урана, оксид гадолиния, теплопроводность, твердый раствор.

**Алдажаров Т.М.** – докторант кафедры «Химия, металлургия и обогащение» ВКГТУ (070004, Республика Казахстан, г. Усть-Каменогорск, ул. Протозанова А.К., 69). E-mail: aldazharov-timur@yandex.ru.

**Русин Ю.Г.** – канд. физ.-мат. наук, ст. преподаватель той же кафедры. E-mail: rusin.yurij@mail.ru.

**Еремеева Ж.В.** – докт. техн. наук, доцент кафедры «Порошковая металлургия и функциональные покрытия» МИСиС (119049, г. Москва, Ленинский пр.-т, 4). E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

**Рыспаев Т.А.** – докт. техн. наук, приват-доцент Технического университета Клаусталь (38678, Adolph-Roemer-Straße 2A, Clausthal-Zellerfeld, Germany). E-mail: talant.ryspaev@gmail.com.

**Для цитирования:** Алдажаров Т.М., Русин Ю.Г., Еремеева Ж.В., Рыспаев Т.А. Методы подготовки и получение исходных материалов для приготовления гранул оксида гадолиния, используемых при изготовлении композитного материала уран-гадолиниевого топлива // Изв. вузов. Порошк. металлургия и функц. покрытия. 2016. No. 2. С. 15–21. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-2-15-21.

*Aldazharov T.M., Rusin Yu.G., Eremeeva Zh.V., Ryspaev T.A.*

### **Methods for preparation and production of raw materials to make gadolinium oxide pellets used in composite uranium-gadolinium fuel production**

A process for producing an effective composite uranium-gadolinium fuel was developed in the laboratory. This fuel will help to improve technical and economic performance of nuclear power plants. Based on the analysis of the results obtained, the implementation of the proposed method in a manufacturing environment was substantiated. Methods for preparation and production of the raw materials for the fabrication of gadolinium oxide were described. The essential characteristics of promising composite uranium-gadolinium fuel pills were defined experimentally. Based on these characteristics, the final specifications for the fuel pills were formulated.

**Keywords:** nuclear fuel, composite uranium-gadolinium fuel, burnable absorber, uranium dioxide, gadolinium oxide, thermal conductivity, solid solution.

**Aldazharov T.M.** – Doctoral Candidate of Department «Chemistry, metallurgy and enrichment», East Kazakhstan State Technical University (070004, Republic of Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk, A.K. Protozanov str., 69). E-mail: aldazharov-timur@yandex.ru.

**Rusin Yu.G.** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Lecturer of the same Department. E-mail: rusin.yurij@mail.ru.

**Eremeeva Zh.V.** – Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor of Department «Powder metallurgy and functional coatings» MISIS (119049, Russia, Moscow, Leninsky pr., 4). E-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru.

**Ryspaev T.A.** – Dr. Sci. (Tech.), Senior Lecturer of Technical University Clausthal (38678, Adolph-Roemer-Straße 2A, Clausthal-Zellerfeld, Germany). E-mail: talant.ryspaev@gmail.com.

**Citation:** Aldazharov T.M., Rusin Yu.G., Eremeeva Zh.V., Ryspaev T.A. Metody podgotovki i poluchenie iskhodnykh materialov dlya prigotovleniya granul oksida gadoliniya, ispol'zuemykh pri izgotovlenii kompozitnogo materiala uran-gadolinievogo topliva. Izv. vuzov. Poroshk. metallurgiya i funkts. pokrytiya. 2016. No. 2. С. 15–21. DOI: dx.doi.org/10.17073/1997-308X-2016-2-15-21.

## Введение

Одной из главных задач ядерной энергетики является достижение более высоких технико-экономических показателей атомных электростанций (АЭС) за счет повышения глубины выгорания топлива и увеличения кампании топливной загрузки ядерного реактора до 24 мес. Для достижения этой цели требуется использование топлива с обогащением 4,5–5,0 % по U-235. Как показывают расчеты, для подавления высокой начальной реактивности, а также достижения более высоких глубин выгорания топлива понадобятся таблетки уран-гадолиниевого топлива (УГТ) с содержанием гадолиния на уровне 10–12 мас.% [1].

Известно, что увеличение количества  $Gd_2O_3$  снижает теплопроводность топлива из-за образования в таблетках твердого раствора  $(U_{1-x}, Gd_{1-x})O_2$ . Поэтому для выравнивания энергонапряженности в активной зоне реактора, содержащей топливовоздушную смесь с обогащением по U-235 4,4 %, принципиально нельзя применять УГТ с содержанием  $Gd_2O_3$  выше 2,0 мас.% из-за большой вероятности локального перегрева топлива [2]. В связи с этим тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ) с УГТ имеют более низкое обогащение по урану (чем больше гадолиния в таблетках, тем меньше их обогащение по U-235).

Как показывают измерения теплопроводности таблеток УГТ, содержащих 10 мас.%  $Gd_2O_3$ , ее значения при  $t = 1000^\circ C$  лежат в диапазоне  $\lambda = 1,8 \pm 0,18$  Вт/(м·К), что практически в 1,7 раза меньше, чем у таблеток из  $UO_2$  ( $3,0 \pm 0,18$  Вт/(м·К)) [3].

Таким образом, традиционная технология изготовления УГТ при содержании в нем  $Gd_2O_3$  на уровне 8–12 мас.% не позволяет получать таблетки с приемлемой теплопроводностью, близкой к теплопроводности «чистого»  $UO_2$ . Кроме того, таблетки УГТ имеют также и более низкие термомеханические свойства по сравнению с  $UO_2$ -топливом. Это также зависит от количества в составе таблеток  $Gd_2O_3$ : чем его больше, тем выше вероятность появления микротрещин и дальнейшего снижения теплопроводности топлива.

В связи с этим топливо PWR, содержащее УГТ, эксплуатируется на мощности на 10–15 % ниже, чем без него [4]. Экспериментальные и теоретические работы в данном направлении показывают, что топливо, в котором  $Gd_2O_3$  более 10 мас.%, может иметь повышенную теплопроводность (на

уровне  $UO_2$ ) и высокие термомеханические характеристики) [5, 6].

Цель настоящей работы — разработка в лабораторных условиях и обоснование способа получения эффективного композитного уран-гадолиниевого топлива, применение которого позволит улучшить технико-экономические показатели АЭС.

## Методика проведения испытаний

Объектом исследования являлось высокоэффективное композитное уран-гадолиниево-топливо, обладающее повышенной теплопроводностью по сравнению со стандартным УГТ, предназначенным для использования в атомной энергетике.

Плотность спеченных таблеток композитного УГТ оценивалась гидростатическим методом по ГОСТ 95.882-81 с точностью  $\pm 0,01$  г/см<sup>3</sup>. При этом использовался метод гидростатического взвешивания без проникновения воды в поры. Он основан на определении объема таблетки путем нахождения ее «сухой» массы и последующего взвешивания таблетки в воде.

Насыпная плотность порошка как при свободной засыпке, так и при утряске определяется, в первую очередь, его морфологическими особенностями. Знание этой величины позволяет точно оценить количество навески порошка для его прессования.

Анализ параметров микроструктуры топливных таблеток проводился на установке ПЭВМ 8 IBM с установленным в ней адаптером micro VIDEO DC 20 для ввода изображения с видеокамеры типа Sharp CCD HS-135, которая монтируется на оптическом микроскопе МЕТАМ ЛВ-31.

## Результаты и их обсуждение

Анализ различных разработок, направленных на модернизацию уран-гадолиниевого топлива, показывает, что единственным путем улучшения его теплофизических и термомеханических характеристик является создание композитного УГТ на основе  $UO_2$  без образования в топливных таблетках твердого раствора  $(U_{1-x}, Gd_{1-x})O_2$ . То есть в матрицу  $UO_2$  внедряются частицы (гранулы), состоящие либо из твердого раствора  $(U_{1-x}, Gd_{1-x})O_2$ , либо непосредственно из  $Gd_2O_3$ . В такой модели в зависимости от объема дисперсной фазы компози-

та теплопроводность системы будет определяться теплопроводностью матрицы ( $\text{UO}_2$ ) [7, 8].

Действительно, повышение концентрации вводимого в решетку второго компонента значительно увеличивает количество дополнительных центров рассеяния фононов (точечных дефектов) [9]. Влияние последних на теплопроводность связано с сечением рассеяния фононов точечными дефектами. Этот параметр может быть описан следующим выражением:

$$\Gamma_i = y_i \left[ \frac{(M_i - M)^2}{M^2} + \eta \frac{(r_i - r)^2}{r^2} \right], \quad (1)$$

где  $y_i$  — атомная доля точечных дефектов;  $M_i$  — атомная масса точечных дефектов  $i$ -го типа;  $M$  — средняя атомная масса замещенных атомов в решетке;  $r_i$  — атомный радиус точечных дефектов  $i$ -го типа в узлах решетки;  $r$  — средний атомный радиус замещенного иона в узле решетки;  $\eta$  — феноменологический параметр, выражающий величину возникающих в решетке напряжений.

При растворении  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  в решетке  $\text{UO}_2$  из-за различия ионных радиусов урана и гадолиния возникают напряжения, а также за счет разницы атомных масс усиливается роль ангармонизма в рассеянии фононов. Эти факторы приводят к повышению теплового сопротивления решетки. Кроме того, при введении в  $\text{UO}_2$  полупрозрачных оксидов типа  $\text{Me}_2\text{O}_3$  в кристаллической решетке образуются ионы  $\text{U}^{5+}$ , что еще больше увеличивает концентрацию центров рассеяния фононов [10].

Таким образом, становится понятным, что единственным путем обеспечения теплопроводности УГТ хотя бы на уровне «чистого»  $\text{UO}_2$  является создание композитного топлива, содержащего в матрице из  $\text{UO}_2$  более или менее гомогенно распределенные гранулы из твердого раствора  $(\text{U}_{1-x}, \text{Gd}_{1-x})\text{O}_2$  или  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ . При этом среднюю теплопроводность композита можно определить из соотношения Максвелла—Эйкена [11]:

$$\lambda_{\text{ср}} = \lambda_{\text{н}} \left[ \frac{1 + 2V_{\text{д}} \frac{1 - \lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{д}}}{2\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{д}} + 1}}{1 - V_{\text{д}} \frac{1 - \lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{д}}}{\lambda_{\text{н}}/\lambda_{\text{д}} + 1}} \right], \quad (2)$$

где  $\lambda_{\text{н}}$  и  $\lambda_{\text{д}}$  — величины теплопроводности непрерывной среды и дисперсной фазы соответственно;  $V_{\text{д}}$  — объемная доля дисперсной фазы.

Анализ полученных значений теплопроводности фаз УГТ с использованием формулы (2) пока-

зывает, что для сохранения приемлемых величин  $\lambda$  композита оптимальная объемная доля дисперсной фазы в УГТ может находиться в пределах 10—15 % в зависимости от концентрации второго компонента в твердом растворе  $(\text{U}_{1-x}, \text{Gd}_{1-x})\text{O}_2$ . При этом надо учитывать нежелательную потерю делящегося изотопа  $\text{U-235}$  в УГТ при увеличении концентрации  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  до 10 мас.% и выше, а также размеры диспергированных в матрицу гранул  $(\text{U}_{1-x}, \text{Gd}_{1-x})\text{O}_2$  или  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ , так как значительное их отклонение от среднего размера зерна матрицы может существенно повлиять на пластические характеристики композита [12]. Кроме того, известно, что достаточно малые частицы  $(\text{U}_{1-x}, \text{Gd}_{1-x})\text{O}_2$  или  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  (менее 100 мкм) в условиях спекания таблеток УГТ, а следовательно, в активной зоне реактора при рабочих температурах топлива от 700 до 1200 °С, могут полностью раствориться в матрице  $\text{UO}_2$  с образованием твердого раствора [13].

В то же время, как показывают результаты методов компьютерного моделирования, а также ряд экспериментальных исследований, строение и свойства, размер и форма частиц наполнителя, а также характер их взаимодействия с матрицей для многих керамических материалов являются факторами, определяющими эффект повышения или снижения механических характеристик (прочности, пластичности, трещиностойкости) синтезируемого композиционного материала [14].

Таким образом, введение гадолиния или его оксида в  $\text{UO}_2$  без образования в системе твердого раствора  $(\text{U}_{1-x}, \text{Gd}_{1-x})\text{O}_2$  является единственным решением получения УГТ, отвечающего современным требованиям. Очевидно, что компоненты твердого раствора  $(\text{U}_{1-x}, \text{Gd}_{1-x})\text{O}_2$  можно соединять на различных стадиях технологического процесса. Однако механическое смешивание оксидов урана и гадолиния является наиболее экономичным и технологически легко организуемым процессом. Но при этом на его проведение накладываются специфические ограничения, обусловленные малым размером гранул, и соответственно, составляющих их частиц, размер которых не должен превышать единиц микрометров.

Если оксиды РЗЭ под микроскопом выглядят как слабо агрегированные кристаллы размером ~1 мкм, то частицы  $\text{UO}_2$  представляют собой плотно упакованные в прочные частицы агломераты размером 50—2000 мкм (рис. 1). Сухое измельчение такого порошка до крупности частиц хотя бы 3—5 мкм, причем без дополнительного загрязнения и

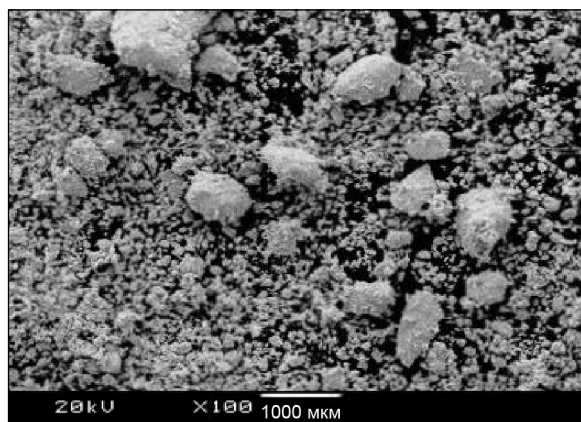


Рис. 1. Агломераты частиц в порошке  $\text{UO}_2$

окисления, представляет собой серьезную технологическую задачу.

Таким образом, одинаковый состав гранул композитного топлива может быть обеспечен только при механическом смешении пластичных, дезагрегированных порошков исходных компонентов. Единственным неагломерированным, пластичным урансодержащим порошком, представляющим собой отдельные кристаллы размером  $\sim 1$  мкм, является полиуранат аммония — полупродукт в технологии производства порошка  $\text{UO}_2$ .

Из анализа схемы получения смеси для изготовления гранул  $(\text{U}_{1-x}, \text{Gd}_{1-x})\text{O}_2$  (рис. 2) следует, что наиболее важной стадией является операция смешения компонентов с целью получения однородной смеси отдельных кристаллов. При этом важным моментом при спекании гранул является обязательное отсутствие в них микротрещин, вероятность образования которых напрямую зависит от размера используемых кристаллов  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  и наличия в них влаги, режимов и атмосферы спекания, а также от разницы в скорости усадки порошков  $\text{UO}_2$  и  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ , обусловленной различием значений их полной удельной поверхности.

Перед использованием реагентов для изготовления компонентов композитного УГТ были исследованы их технологические свойства и сделаны выводы о необходимости их соответствующей подготовки.

Согласно ТУ 48-4-524-90 на порошок  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ , применяемый в технологии производства таблеток уран-гадолиниевого топлива для реакторов ВВЭР-1000, потеря его массы при прокалке (ППП) при  $t = 850\div 900$  °С не должна превышать  $1\pm 0,14$  % [15]. Однако контрольная прокалка  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  показала, что этот параметр имеет более высокие зна-

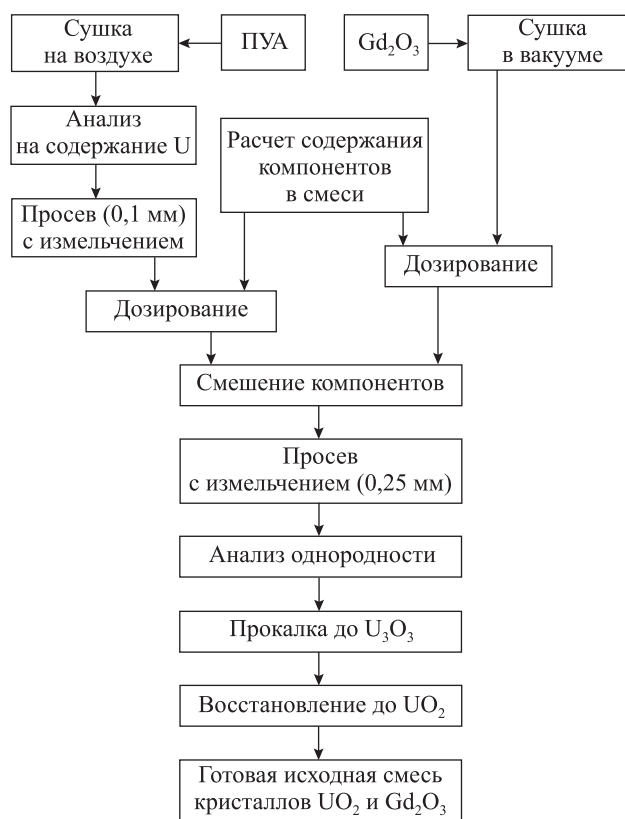


Рис. 2. Схема получения смеси для изготовления гранул  $(\text{U}_{1-x}, \text{Gd}_{1-x})\text{O}_2$

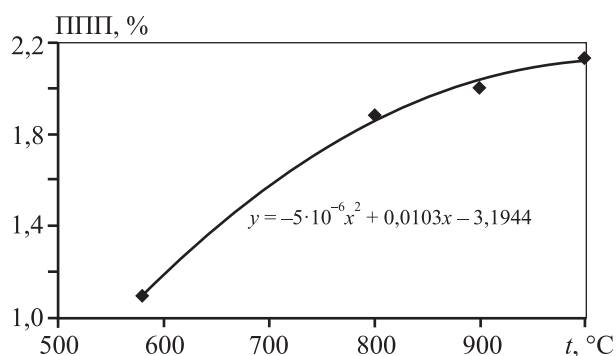


Рис. 3. Потеря массы  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  при прокалке на воздухе

чения, а следовательно, встал вопрос о качестве  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ , применяемого для изготовления композитного топлива. Важно было установить, как его прокалка влияет на качество  $\text{U}-\text{Gd}$ -керамики. Исходный  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  прокачивали при различных температурах и по уменьшению массы проб рассчитывали потери при прокалке (рис. 3). Далее методом БЭТ были определены значения удельной поверхности ( $S_{\text{уд}}$ ) прокаленных проб (рис. 4).

Из приведенных данных следует, что в зависимости от температуры разница между ППП моно-

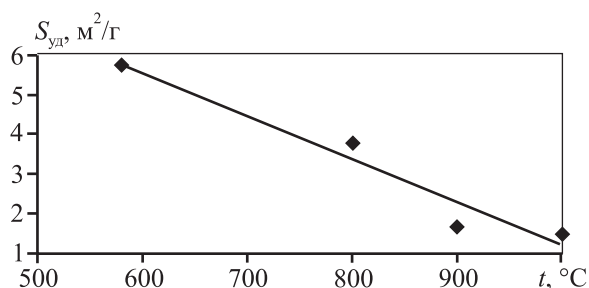


Рис. 4. Зависимость удельной поверхности  $Gd_2O_3$  от температуры прокаливания

#### Насыпная плотность (г/см³) порошка $Gd_2O_3$ для различных температур прокаливания

Порошок	Температура, °C			
	0	800	850	900
Без утряски	0,75	0,83	0,79	0,75
С утряской	1,23	1,34	1,33	1,29

тонно убывает. Это значит, что полное удаление влаги происходит при  $t > 1000$  °C. Удельная поверхность исходного  $Gd_2O_3$  составила ~6 м²/г. Также были проведены измерения насыпной плотности порошков  $Gd_2O_3$ , прокаленных при различных температурах. Полученные данные приведены в таблице, из которой следует, что для температур прокаливания в диапазоне 800—900 °C имеется тенденция к уменьшению показателей плотности с ростом величины  $t$ .

Как известно, специфичность таблеток, содержащих  $Gd_2O_3$ , состоит в возможности образования микротрещин в их структуре. Это происходит из-за изменения кристаллической решетки в процессе формирования твердого раствора. Вероятность микрорастрескивания структуры зависит как от среды спекания таблеток, так и от текущего размера зерна в керамике. Твердый раствор, имеющий мелкое зерно с малым количеством трещин, как правило, получается при относительно быстром времени нагрева (~5 ч) материала до температуры спекания.

Увеличение длительности выдержки и уменьшение скорости нагрева изделий приводят к росту зерна и в результате — к усилению растрескивания. Отсюда следует, что важным фактором является наличие возможности уменьшить время спекания таблеток до минимума. Известно, что при изготовлении партии из  $UO_2$  желательно использовать порошки, различающиеся по величине удельной поверхности не более чем на 1 м²/г. Эта величина регламентируется, так как при

смешении порошков с сильно различающимися значениями  $S_{уд}$  наблюдается снижение плотности спеченных изделий вследствие различной скорости усадки (спекания) частиц  $UO_2$ . Это явление (эффект Френкеля—Киркендала) применительно к твердому раствору  $(U_{1-x}, Gd_{1-x})O_2$  обусловлено, главным образом, неравенством коэффициентов гетеродиффузии разнородных атомов. Отсюда вытекает необходимость сбалансированности активности к спеканию у компонентов смеси, что может быть достигнуто корректировкой их удельной поверхности.

Исходя из этого было получено несколько вариантов таблеток, содержащих 10 мас.%  $Gd_2O_3$ , обработанных при различных температурах. В экспериментах использовались стандартные порошки  $UO_2$  и  $Gd_2O_3$ , полные удельные поверхности которых составляли 3,0 и 6,0 м²/г соответственно. Таблетки изготавливались без применения пластификатора по лабораторной схеме: дозирование компонентов → смешение → измельчение → грануляция → введение пластификатора → формование → спекание. При этом измеряли плотность ( $\rho$ ) как сырых, так и спеченных образцов. Полученные результаты приведены на рис. 5.

Из представленных данных следует, что прессуемость пресс-порошка заметно улучшается для термообработанного  $Gd_2O_3$ , что говорит о существенном изменении его технологических свойств. Плотность спеченных таблеток имеет максимум в диапазоне температур между 580 и 800 °C. Повышение плотности выше 800 °C замедляется, так как постепенно начинается рост зерна и все больший вклад в формирование ее величины вносит процесс трещинообразования. Структура материала, образующаяся вследствие прокаливания  $Gd_2O_3$  при  $t = 800$  °C, приведена на рис. 6.

Принципиальная возможность избежать образования трещин в материале заключается в прове-

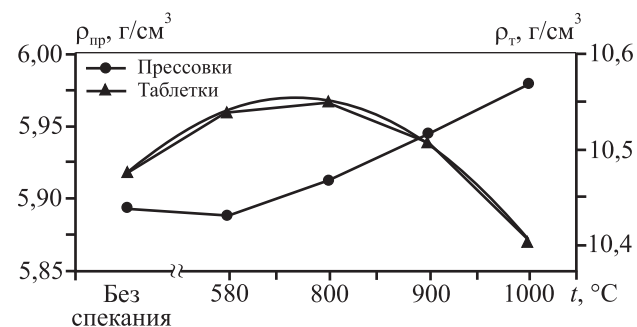
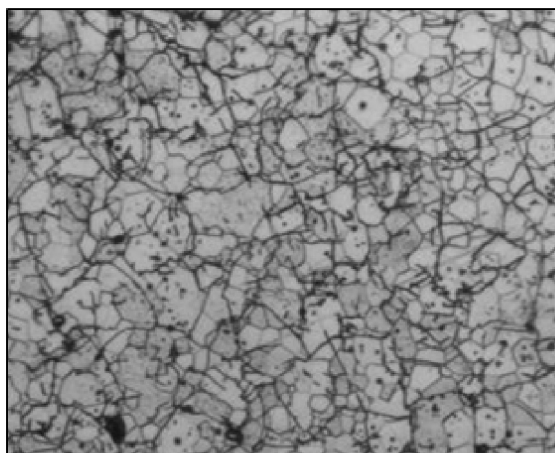


Рис. 5. Зависимость плотности прессовки ( $\rho_{пр}$ ) и таблеток ( $\rho_t$ ) от температуры прокаливания  $Gd_2O_3$



**Рис. 6.** Рост зерна в композиции твердого раствора  $(U_{1-x}, Gd_{1-x})O_2$  с предварительной прокалкой  $Gd_2O_3$  при 800 °C (увеличение 250 $\times$ )

дении процесса спекания в печах с контролируемым кислородным потенциалом атмосферы. Если при этом использовать операции, гарантирующие тщательное и качественное смешение исходных оксидов, образование твердого раствора будет завершаться быстро — до начала процесса роста зерна.

Полученные в работе результаты говорят о том, что при создании технологии изготовления композитного УГТ целесообразно использовать низкопрокаленный  $Gd_2O_3$ , а оптимальной температурой его термообработки считать 580 °C.

## Заключение

Исходя из результатов проведенных экспериментов были сформулированы следующие окончательные требования, предъявляемые к таблеткам УГТ:

- теплопроводность должна быть на уровне или выше теплопроводности таблеток  $UO_2$ ;
- плотность должна лежать в диапазоне 10,35—10,70 г/см<sup>3</sup>;
- размер частиц (гранул)  $(U_{1-x}, Gd_{1-x})O_2$  или  $Gd_2O_3$  должен составлять 100—200 мкм;
- гранулы  $(U_{1-x}, Gd_{1-x})O_2$  или  $Gd_2O_3$  должны иметь геометрическую и химическую стабильность, гарантирующую невозможность их растворения в матрице и образование вне гранул твердого раствора  $(U_{1-x}, Gd_{1-x})O_2$ , для чего необходимо создание антидиффузионного барьера вокруг гадолинийсодержащих гранул;
- содержание  $Gd_2O_3$  в таблетках не должно быть меньше 10 мас. %.

## Литература

1. Кучковский А.А., Маныч А.А., Русин Ю.Г., Карманов Б.А. Производство топливных таблеток с выгорающими поглотителями // Сб. докл. II Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы урановой промышленности» (Алматы, 10—13 июля 2002 г.) Алматы: Бастау, 2003. С. 133—135.
2. Jeffrey R. Secker, Baard J. Johansen, David L. Stucker, Odeli Ozer, Kostadin Ivanov, Serkan Yilmaz, E.H. Young. Optimum Discharge Burn-up, Cycle Length for BWRs // Nucl. Technol. 2005. Vol. 151. No. 2. P. 109—119.
3. Горский В.В. Уран-гадолиниевое оксидное топливо. Ч. 2. Теплофизические свойства  $UO_2-Cd_2O_3$  и методы их измерения // Атомная техника за рубежом. 1989. No. 3. С. 5—15.
4. Hirai M., Ishimoto S. Thermal diffusivities and Thermal conductivities of  $UO_2-Cd_2O_3$  // J. Nucl. Sci. Technol. 1991. Vol. 28. No. 11. P. 995—1000.
5. Bibilashvili, Yu.K., Kuleshov, A.V., Milovanov, O.V., Mikheev, E.N., Novikov, V.V., Popov, S.G., Proselkov, V.N., Pimenov, Yu.V., Godin, Yu.G. Investigation of Thermal-Physical and Mechanical Properties of Uranium-Gadolinium Oxide Fuel, Advanced fuel pellet materials and designs for water cooled reactors // Proceedings of a technical committee Brussels, 20—24 oct. 2003). IAEA-TECDOC-1416. 2003. P. 85—99.
6. Gregg R., Worrall A. Effect of Highly Enriched/Highly Burnt  $UO_2$  Fuels on Fuel Cycle Costs, Radiotoxicity and Nuclear Design Parameters // Nucl. Technol. 2005. Vol. 151. P. 126—132.
7. Альдавахра С., Савандер В.И., Белоусов Н.И. Методика расчета и анализ применения гранулированных поглотителей в ВВЭР // Атомная энергия. 2006. No. 1. С. 8—13.
8. Поляков А.А., Стогов Ю.В., Савандер В.И., Белоусов Н.И., Проселков В.Н. Изучение физики легководных решеток с уран-гадолиниевым топливом, содержащим  $Gd_2O_3$ -гранулы // Научная сессия МИФИ-2000. Ч. 8 Молекулярно-селективные и нелинейные явления и процессы. Физико-технические проблемы ядерной энергетики. Ультрадисперсные (нано) материалы. С. 90—91.
9. Klemens P.G. Effect of crystal lattice defects on thermal conductivity // Phys. Rev. 1960. Vol. 119. P. 507.
10. Ohmichi T., Fukushima S., Maeda A. Watanabe H. Effect of  $Gd_2O_3$  dope on  $UO_2$  thermal conductivity // J. Nucl. Mater. 1981. Vol. 102. P. 40—46.
11. Кингери У.Д. Введение в керамику. М.: Стройиздат, 1967.
12. Горский В.В. Уран-гадолиниевое оксидное топливо. Ч. 1. Основные свойства  $Gd_2O_3$  и  $UO_2-Cd_2O_3$  // Атомная техника за рубежом. 1989. No. 2. С. 3—10.
13. Yuda R., Une K. Effect of sintering atmosphere on the densification of  $UO_2-Cd_2O_3$  compacts // J. Nucl. Mater. 1991. Vol. 178. P. 195—203.



14. Boccaccini A.R. Glass and glass-ceramic matrix composite materials // J. Ceram. Soc. Japan. 2001. Vol. 109. No. 7. P. 99—109.
15. Дементьев Б.А. Ядерные энергетические реакторы. 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1990.

## References

1. Kuchkovskij A.A., Manych A.A., Rusin Y.G., Karmanov B.A. Proizvodstvo toplivnyh tabletok s vygorajushhimi poglotiteljami [Production of fuel pellets with burnable absorbers]. In: *Aktual'nye problemy uranovoi promyshlennosti [Reports of II Int. sci.-pract. conf. «Actual problems of uranium industry»]* (Almaty, 10—13 July 2002. Almaty: Bastau, 2003). P. 133—135.
2. Jeffrey R. Secker, Baard J. Johansen, David L. Stucker, Odeli Ozer, Kostadin Ivanov, Serkan Yilmaz, E.H. Young. Optimum Discharge Burn-up, Cycle Length for BWRs. *Nucl. Technol.* 2005. Vol. 151. No. 2. P. 109—119.
3. Gorskij V.V. Uran-gadoliniovое оксидное топливо. Ч. 2. Теплофизические свойства  $\text{UO}_2\text{—Cd}_2\text{O}_3$  и методы их измерения [Uranium-gadolinium oxide fuel. Pt. 2. Thermophysical properties of  $\text{UO}_2\text{—Cd}_2\text{O}_3$  and methods of their measurement]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom.* 1989. No. 3. P. 5—15.
4. Hirai M., Ishimoto S. Thermal diffusivities and Thermal conductivities of  $\text{UO}_2\text{—Cd}_2\text{O}_3$ . *J. Nucl. Sci. Technol.* 1991. Vol. 28. No. 11. P. 995—1000.
5. Bibilashvili, Yu.K., Kuleshov, A.V., Milovanov, O.V., Mikheev, E.N., Novikov, V.V., Popov, S.G., Proselkov, V.N., Pimenov, Yu.V., Godin, Yu.G. Investigation of Thermal-Physical and Mechanical Properties of Uranium-Gadolinium Oxide Fuel, Advanced fuel pellet materials and designs for water cooled reactors. *Proceedings of a technical committee* (Brussels, 20—24 Oct. 2003). IAEA-TECDOC-1416. 2003. P. 85—99.
6. Gregg R., Worral A. Effect of Highly Enriched/Highly Burnt  $\text{UO}_2$  Fuels on Fuel Cycle Costs, Radiotoxicity and Nuclear Design Parametrs. *Nucl. Technol.* 2005. Vol. 151. P. 126—132.
7. Al'davahra S., Savander V.I., Belousov N.I. Metodika rascheta i analiz primeneniya granulirovannyh poglotitelej v VVER [The method of calculation and analysis of the application of granular absorbers in WWER]. *Atomnaya energiya.* 2006. No. 1. P. 8—13.
8. Poljakov A.A., Stogov Ju.V., Savander V.I., Belousov N.I., Proselkov V.N. Izuchenie fiziki legkovodnyh reshetok s uran-gadolinievym toplivom, soderzhashhim  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  granuly [Study of the physics of light-water lattices with uranium-gadolinium fuel containing  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  granules]. In: *Scientific session of MIPhI-2000. Pt. 8. Molecular-selective and non-linear phenomena and processes. Physico-technical problems of nuclear power. Ultrafine (nano) materials.* P. 90—91.
9. Klemens P.G. Effect of crystal lattice defects on thermal conductivity. *Phys. Rev.* 1960. Vol. 119. P. 507.
10. Ohmichi T., Fukushima S., Maeda A. Watanabe H. Effect of  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  dope on  $\text{UO}_2$  thermal conductivity. *J. Nucl. Mater.* 1981. Vol. 102. P. 40—46.
11. Kingeri U.D. Vvedenie v keramiku [Introduction to ceramics]. Moscow: Strojizdat, 1967. P. 326.
12. Gorskij V.V. Uran-gadoliniovое оксидное топливо. Ч.1. Osnovnye svoystva  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  i  $\text{UO}_2\text{—Cd}_2\text{O}_3$  [Uranium-gadolinium oxide fuel. Pt. 1. Basic properties of  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  and  $\text{UO}_2\text{—Cd}_2\text{O}_3$ ]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom.* 1989. No. 2. P. 3—10.
13. Yuda R., Une K. Effect of sintering atmosphere on the densification of  $\text{UO}_2\text{—Cd}_2\text{O}_3$  compacts. *J. Nucl. Vat.* 1991. Vol. 178. P. 195—203.
14. Boccaccini A.R. Glass and glass-ceramic matrix composite materials. *J. Ceram. Soc. Japan.* 2001. Vol. 109. No 7. P. 99—109.
15. Dement'ev B.A. Jadernye jenergeticheskie reaktory [Nuclear power reactors]. Moscow: Energoatomizdat, 1990.