

УДК 621.762

**В.С. Панов**, д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (Москва, Россия) (e-mail: zeinalova@rambler.ru)

**В.Ю. Лопатин**, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (Москва, Россия) (e-mail: lopatin63@mail.ru)

**О.В. Мякишева**, канд. техн. наук, доцент, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (Москва, Россия) (e-mail: lvm1939@mail.ru)

**Ж.В. Еремеева**, д-р техн. наук, профессор, Национальный исследовательский технологический университет МИСИС (Москва, Россия) (e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru)

**Е.В. Агеев**, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: ageev\_ev@mail.ru)

**Т.М. Алдажаров**, докторант, ВКГТУ (Республика Казахстан, Усть-Каменогорск) (e-mail: aldazharov-timur@yandex.ru)

**А.И. Лизунов**, аспирант, Московский политехнический университет (Москва, Россия) (e-mail: art-liz481@rambler.ru)

## ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА В РЕАКТОРЕ

*В настоящее время ведется большое количество работ по совершенствованию технологии тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) для обеспечения надежной работы в условиях повышенных выгораний. Важным параметром таблеток с этих позиций является микроструктура. Увеличение размера зерна уменьшает разветвленность границ и снижает скорость миграции газонаполненных пор к границам зерен, являющихся путями ускоренной диффузии.*

*На решение этой задачи направлено введение наноразмерных добавок к диоксиду урана исходя из влияния малых легирующих добавок (МЛД) на активацию роста зерна и эволюцию микроструктуры. Введение наноразмерных частиц различных порошков должно активизировать процесс спекания. Активация процесса спекания за счет нанодобавок является одним из направлений при разработке технологии новых видов материалов для атомных реакторов на быстрых нейтронах.*

*В рамках представленной работы механическое активирование с одновременным измельчением порошков оксидов гадолиния и гидрооксидов алюминия и гадолиния ( $Gd_2O_3$  №1,  $Gd_2O_3$  №2,  $Al(OH)_3$  и  $Gd(OH)_3$ ) проводили в планетарной центробежной мельнице "Pulverisette 5" компании Fritsch GmbH (Германия).*

*Технология получения ядерного горючего на основе  $UO_2$  разработана в нескольких вариантах, среди которых спекание с предварительным прессованием или мундштучным формованием, изостатическое и горячее прессование, ротационная ковка, вибрационное уплотнение, шликерное литье, экструзия и др. Учитывая простоту и доступность, особого внимания заслуживают холодное прессование и спекание, которые на сегодня являются основными для получения ТВЭЛ из  $UO_2$ .*

*Рассмотрены и установлены некоторые отличительные особенности структуры исходных добавок  $TiO_2$ ,  $Al(OH)_3$ ,  $Gd_2O_3$ ,  $Gd(OH)_3$  и определены их основные свойства. Разработаны оптимальные режимы получения высокодисперсных добавок и предложен оптимальный метод введения их в смеси с  $UO_2$ . Предложены возможные механизмы влияния высокодисперсных добавок на технологию изготовления таблеток.*

**Ключевые слова:** ядерное топливо, глубина выгорания, модифицирующие добавки.

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2017-21-2-48-59

**Ссылка для цитирования:** Оценка использования модифицирующих добавок для повышения производительности ядерного топлива в реакторе / В.С. Панов, В.Ю. Лопатин, О.В. Мякишева, Ж.В. Еремеева, Е.В. Агеев, Т.М. Алдажаров, А.И. Лизунов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 2(71). С. 48-59.

\*\*\*

### Введение

В настоящее время все большее число стран приходит к выводу, что для удо-

влетворения возрастающих энергетических потребностей в общей структуре энергетики необходим ядерный сектор. За последние 50 лет ядерная энергетика

достигла отличных технических и экономических показателей и в 30 странах составляет заметную долю в национальной энергетике, в ряде стран превышая 20%.

Многие государства мира развивают многочисленные исследования материалов, используемых в ядерной технике. Цель их – совершенствование существующих и создание новых материалов для ядерных энергетических установок и предприятий ядерного топливного цикла.

Надежная и экономичная работа таких установок невозможна без серьезного подхода к выбору материалов для каждой их составляющей. В этой области уже накопились значительные успехи. Правильное решение вопросов, возникающих при конструировании, проектировании и эксплуатации АЭС, требует четкого понимания процессов, происходящих в теплоносителях установки, которые определяют требования к материалу.

Большое значение при переработке расщепляющихся материалов и изготовлении деталей для реакторов имеет метод порошковой металлургии, который позволяет создавать материалы необходимой структуры, состава и свойств.

В тепловыделяющих элементах (ТВЭЛ) топливо из  $UO_2$  используется в основном в виде таблеток, изготавливаемых методами порошковой металлургии с предварительной обработкой исходных порошков, их прессованием и спеканием. При этом одной из важнейших задач обеспечения надежной и безопасной работы атомных станций является точное прогнозирование поведения топлива в процессе его эксплуатации в реакторах АЭС путем проведения внереакторных испытаний [1-12].

Снижение потребления урана при производстве энергии достигается в ос-

новном за счет увеличения глубины выгорания ядерного топлива, что может быть достигнуто за счет создания крупнокристаллических структур ядерных материалов с контролируемой пористостью, удерживающих продукты деления.

Существующий регламент топливных циклов реакторов типа ВВЭР характеризуется средним выгоранием 42–45 МВт·сут./кг урана, что не удовлетворяет производителей энергии. Для повышения экономических показателей необходимо повысить его до 70 МВт·сут./кг урана.

В настоящее время ведется большое количество работ по совершенствованию технологии ТВЭЛ для обеспечения надежной работы в условиях повышенных выгораний. Важным параметром таблеток с этих позиций является микроструктура. Увеличение размера зерна уменьшает разветвленность границ и снижает скорость миграции газонаполненных пор к границам зерен, являющихся путями ускоренной диффузии.

На решение этой задачи направлено введение наноразмерных добавок к диоксиду урана исходя из влияния малых легирующих добавок (МЛД) на активацию роста зерна и эволюцию микроструктуры. Введение наноразмерных частиц различных порошков должно активизировать процесс спекания.

Активация процесса спекания за счет нанодобавок является одним из направлений при разработке технологии новых видов материалов для атомных реакторов на быстрых нейтронах.

В связи с этим основное направление работы посвящено анализу методов компактирования топлива в таблетки на основе диоксида урана с нанодобавками, их оптимизация и поиск новых способов обеспечения стабильности качества продукции за счет улучшения технологии.

Задачей данного исследования является разработка технологии изготовления таблеток ядерного топлива, позволяющего регулировать объем пористости, раз-

мера пор и зерна в широких пределах, от которых в первую очередь зависят эксплуатационные характеристики реактора.

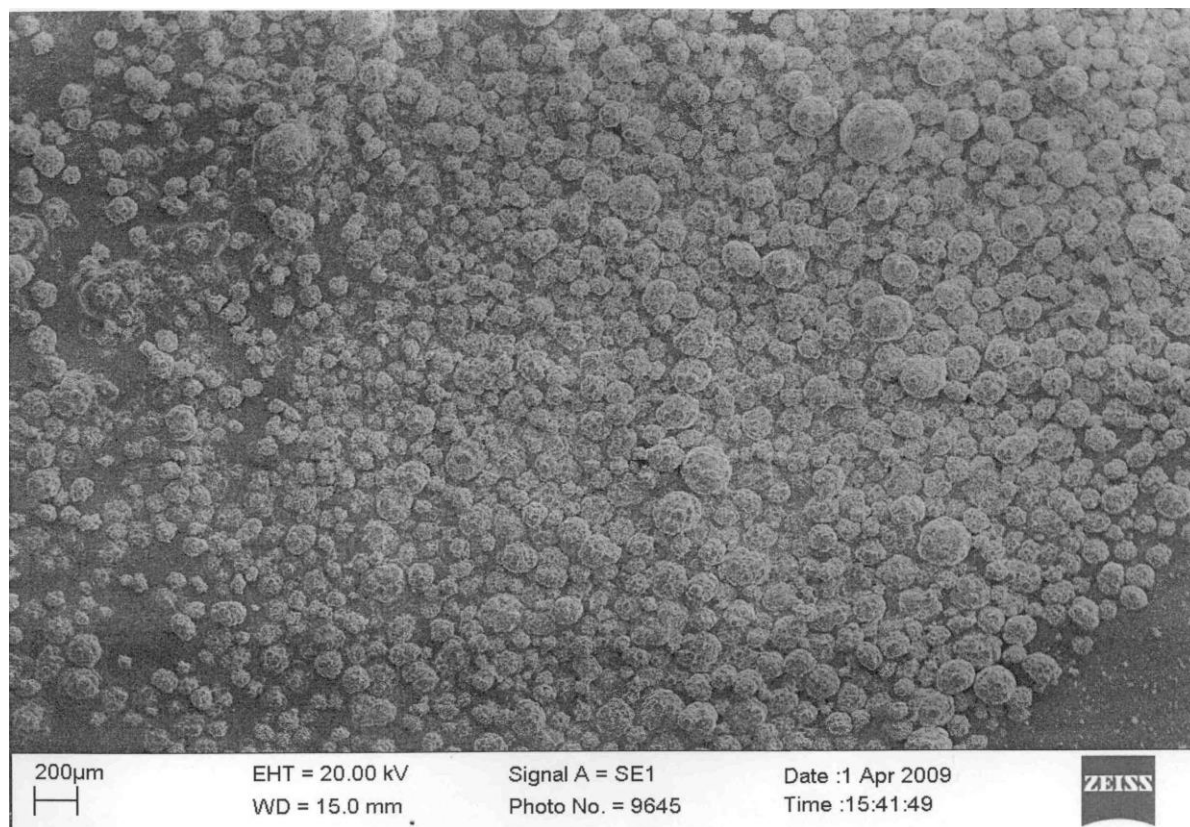


Рис. 1. Нанодисперсные частицы порошка  $Gd(OH)_3$

#### Методика механической активации в планетарной мельнице

Механическое активирование с одновременным измельчением порошков оксидов гадолиния и гидроксидов алюминия и гадолиния ( $Gd_2O_3$  №1,  $Gd_2O_3$  №2,  $Al(OH)_3$  и  $Gd(OH)_3$ ) проводили в планетарной центробежной мельнице "Pulverisette 5" компании Fritsch GmbH (Германия), представленной на рисунке 1. Технические характеристики мельницы представлены в таблице 1. Эта мельница предназначена для сверхтонкого измельчения до коллоидальной тонкости сухих лабораторных проб или твёрдых матери-

алов в суспензии, а также для перемешивания и совершенной гомогенизации эмульсий или паст.

Механическое активирование указанных выше материалов проводили в барабанах из нержавеющей стали объемом ( $V_6$ ) 250 и 500  $см^3$  шарами из нержавеющей стали диаметром ( $d_{ш}$ ) 6 и 10 мм. Соотношение "шары : материал" (Ш:М) варьировали в пределах от 5:1 до 10:1. Масса загружаемого материала ( $m_{нав}$ ) составляла 80 – 200 г. Скорость вращения планетарного диска ( $n$ ) изменяли в интервале 300 – 350 об/мин. Продолжительность механического активирования (измельчения) ( $\tau_{акт}$ ) составляла 20–30 мин.



Рис. 2. Планетарная мельница "Pulverisette 5"

Таблица 1

## Технические характеристики планетарной мельницы

Характер воздействия	Удар, истирание
Количество размольных барабанов	2
Объем размольных барабанов, см <sup>3</sup>	250, 500
Диаметр размольных тел (шаров)	0,5 – 40 мм
Материал размольных барабанов и шаров	нержавеющая сталь, агат
Максимальный начальный размер частиц	10 мм
Минимальный объем обрабатываемого материала	30 мл
Максимальный объем обрабатываемого материала	450 (2 × 225) мл
Размер частиц после обработки	< 1 мкм
Скорость вращения планетарного диска	50 – 400 об/мин
Центробежное ускорение	22 g, где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$

Обработку осуществляли по 2 режимам (в обоих случаях использовали реверс):

Режим 1: длительность обработки – 5 минут; время перерыва для охлаждения – 10 минут;

Режим 2: длительность обработки – 3 мин; время перерыва для охлаждения – 15 мин.

Условия проведения конкретных опытов по механической активации/измельчению приведены в таблице 2.

**Свойства порошков после механической активации**

Свойства порошков после механического активирования приводятся в таблице 3.

Результаты рентгенофазового анализа двух партий активированного оксида гадолиния приведены на рисунке 3 и 4.

Дифрактограммы для обеих партий активированного  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  практически идентичны.

Таблица 2

Условия проведения опытов по механической активации/измельчению

Условия механической активации	Материал			
	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> № 1	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> № 2	Al(OH) <sub>3</sub>	Gd(OH) <sub>3</sub>
V <sub>б</sub> = 250 см <sup>3</sup> ; m <sub>нав</sub> = 100 г; соотношение Ш:М = 5:1; n = 350 об/мин; d <sub>ш</sub> = 6 мм; τ <sub>акт</sub> = 20 мин; режим 2	+	+	+	–
V <sub>б</sub> = 250 см <sup>3</sup> ; m <sub>нав</sub> = 100 г; соотношение Ш:М = 5:1; n = 350 об/мин; d <sub>ш</sub> = 6 мм; τ <sub>акт</sub> = 30 мин; режим 1	+	–	+	–
V <sub>б</sub> = 500 см <sup>3</sup> ; m <sub>нав</sub> = 80 г; соотношение Ш:М = 10:1; n = 300 об/мин; d <sub>ш</sub> = 10 мм; τ <sub>акт</sub> = 30 мин; режим 1	+	+	+	–
V <sub>б</sub> = 500 см <sup>3</sup> ; m <sub>нав</sub> = 200 г; соотношение Ш:М = 5:1; n = 300 об/мин; d <sub>ш</sub> = 10 мм; τ <sub>акт</sub> = 30 мин; режим 2	–	–	–	+
				2 опыта

Таблица 3

Свойства активированных порошков

Материал	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>
Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,4	2,18
Gd(OH) <sub>3</sub>	12,2	0,65
Al(OH) <sub>3</sub> (активированный)	53,2	0,57
Al(OH) <sub>3</sub> (стандартный)*	25,3	1,03

\* приведен для сравнения

Результаты рентгенофазового анализа активированного гидроксида гадолиния приведены на рисунке 5.

Из представленной дифрактограммы явно видно появление пиков кристаллической фазы Gd(OH)<sub>3</sub>, появляющейся в ходе механической активации исходного рентгеноаморфного гидроксида гадолиния. По-видимому, такой переход вызван локальным разогревом частиц в барабанах при интенсивном ударном воздействии на них размольных тел.

Результаты рентгенофазового анализа активированного гидроксида алюминия приведены на рисунке 6.

Сравнение результатов количественного рентгенофазового анализа стандартного и активированного гидроксидов алюминия показывает увеличение содержания гиббсита (Al(OH)<sub>3</sub>) с 97 до 99 %, и соответственно уменьшение содержания бемита (AlOOH) с 3 до 1 %. Внешний вид частиц активированного оксида алюминия приведен на рисунке 7.

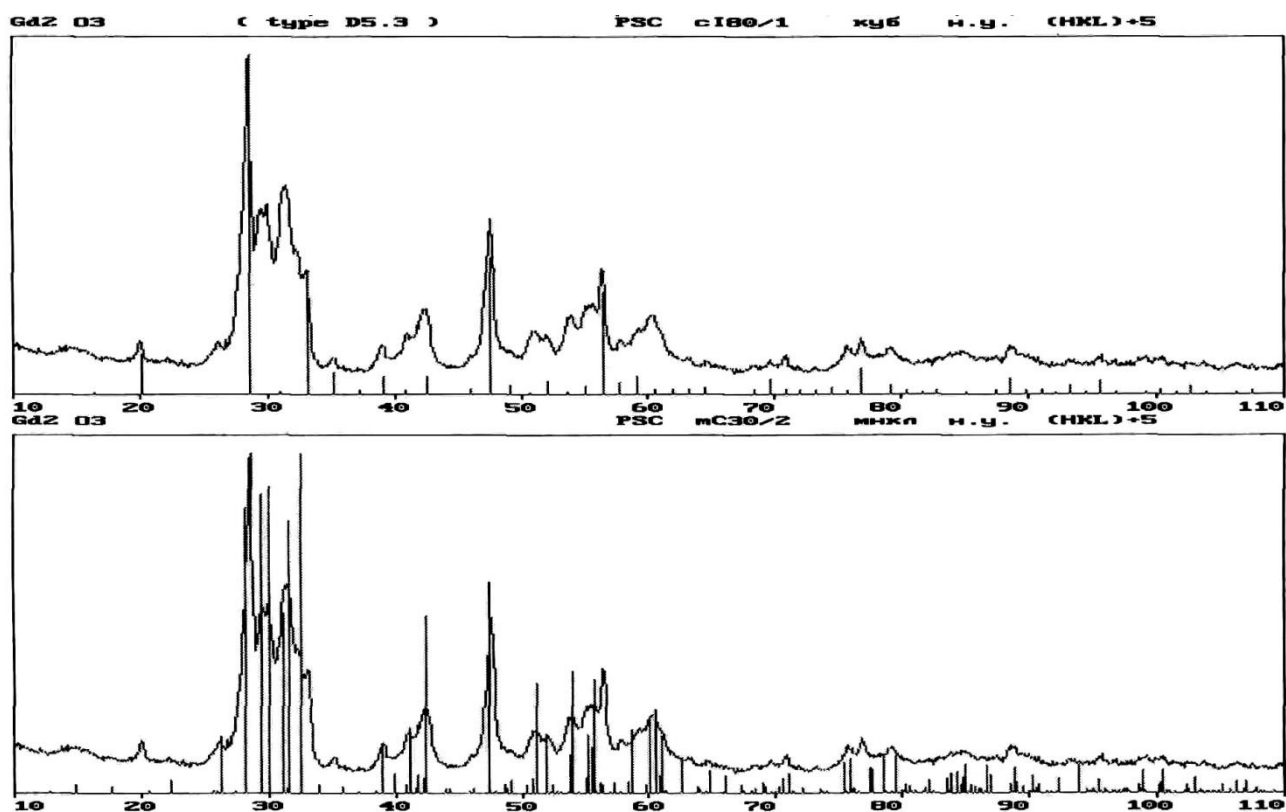


Рис. 3. Дифрактограмма активированного оксида гадолиния (партия 1)

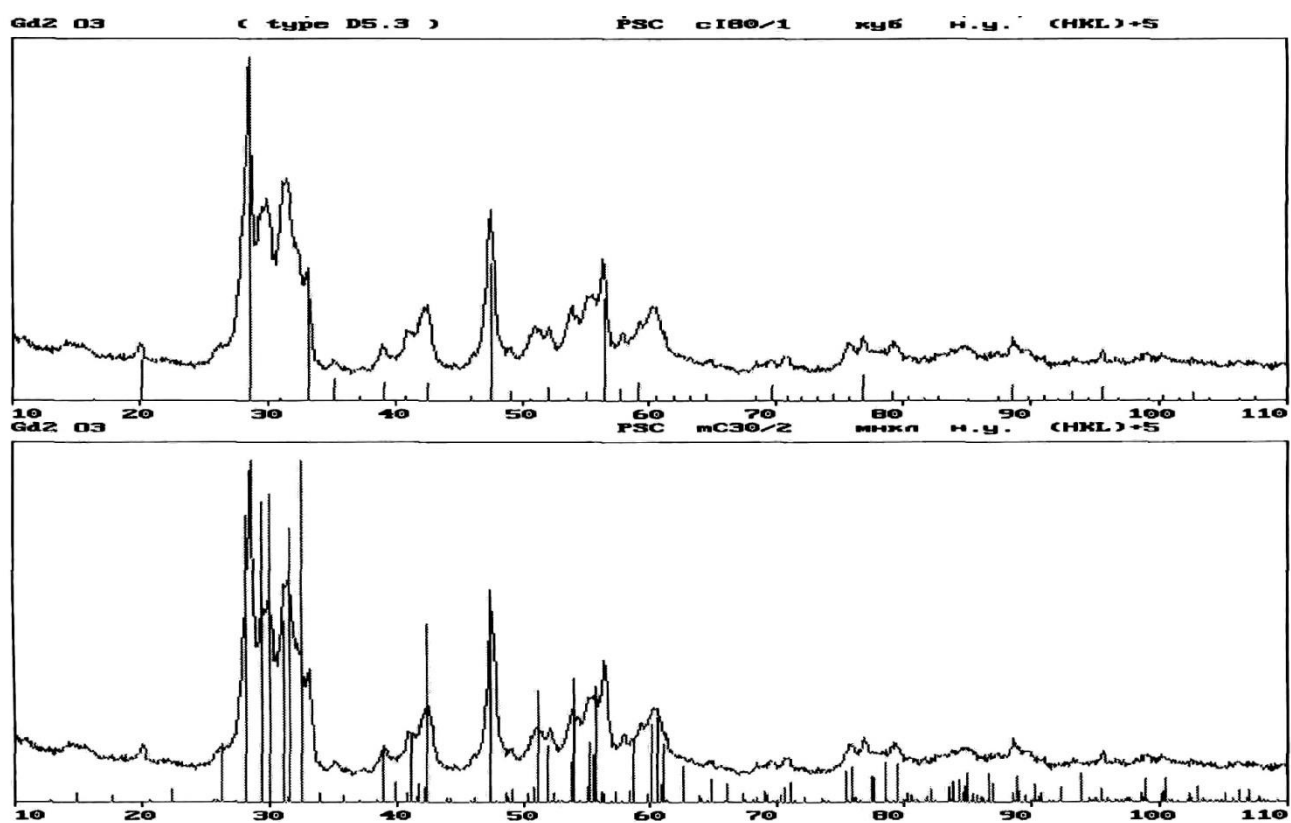


Рис. 4. Дифрактограмма активированного оксида гадолиния (партия 2)

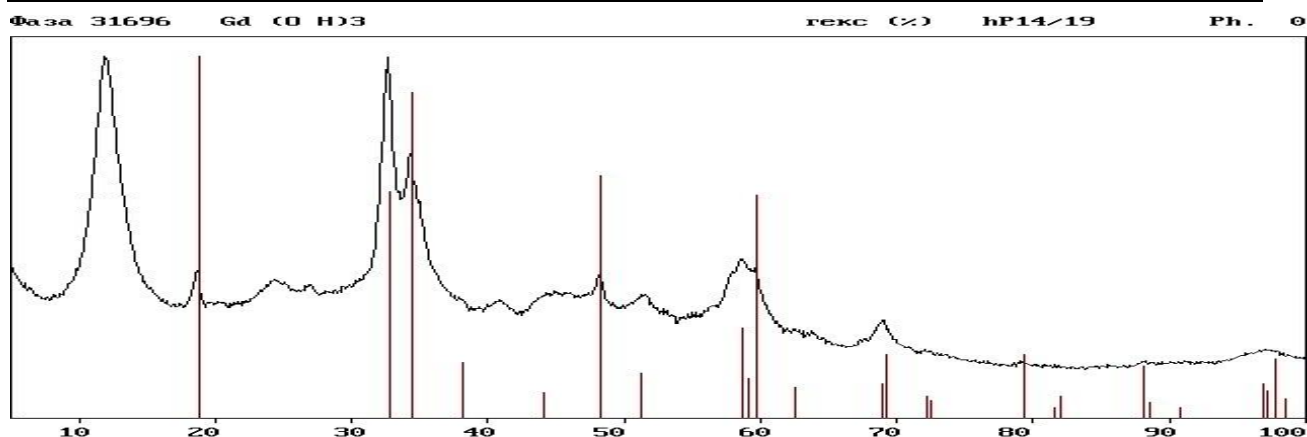


Рис. 5. Дифрактограмма активированного гидроксида гадолиния

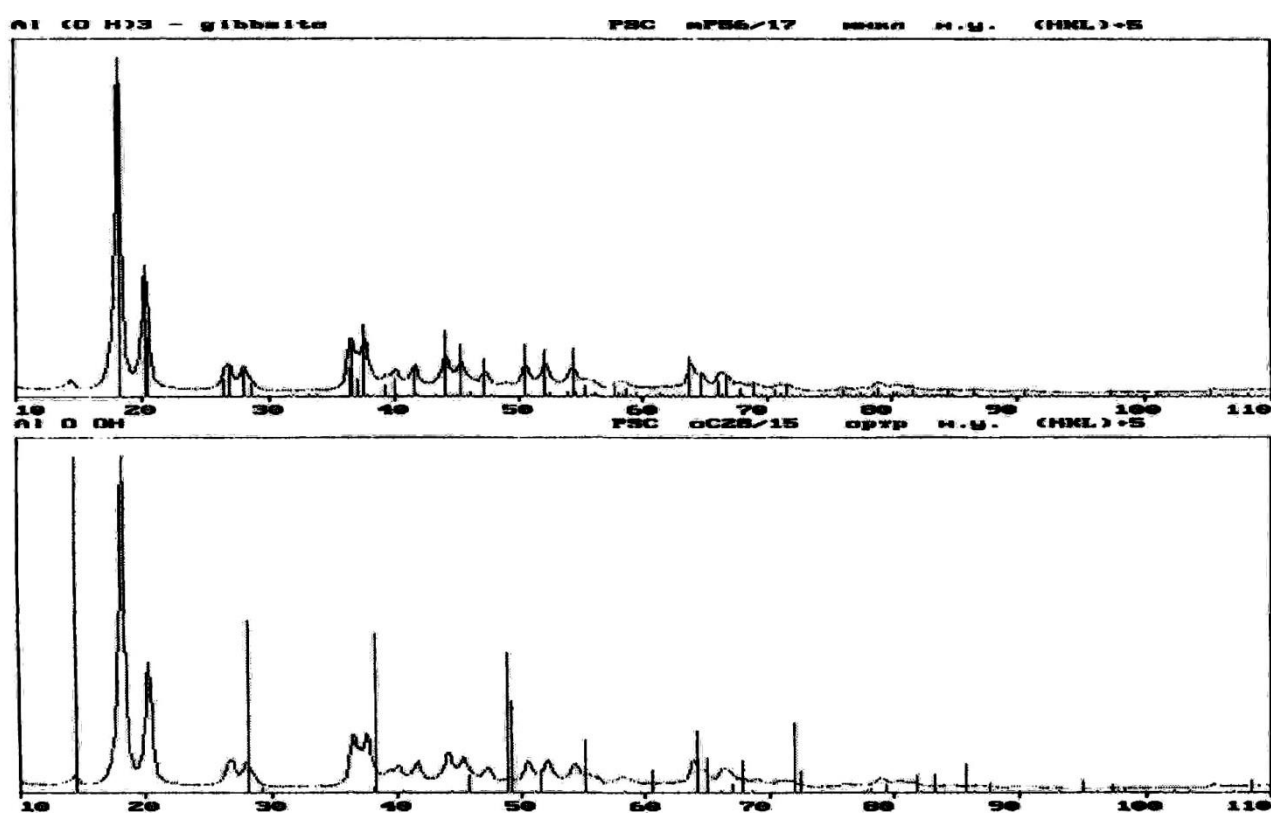


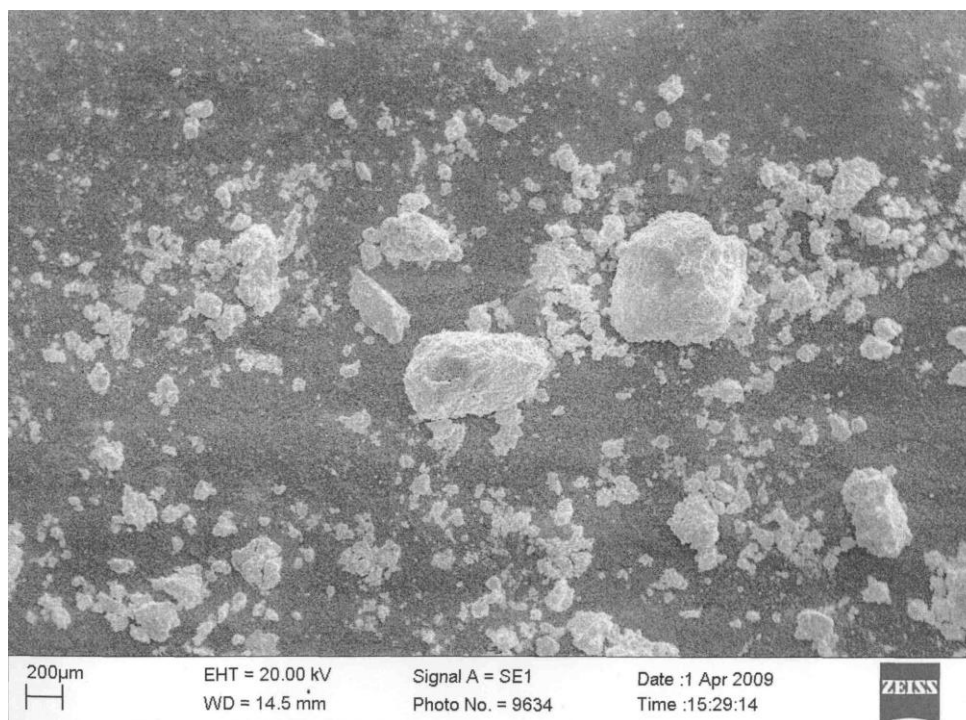
Рис. 6. Дифрактограмма активированного гидроксида алюминия

На приведенном рисунке видны крупные легко разрушаемые конгломераты высокодисперсных частиц.

#### Приготовление смеси $\text{UO}_2$ с добавками

Технология получения ядерного горючего на основе  $\text{UO}_2$  разработана в нескольких вариантах, среди которых спекание с предварительным прессованием

или мундштучным формованием, изостатическое и горячее прессование, ротационная ковка, вибрационное уплотнение, шликерное литье, экструзия и др. Учитывая простоту и доступность, особого внимания заслуживают холодное прессование и спекание, которые на сегодня являются основными для получения ТВЭЛ из  $\text{UO}_2$ .

Рис. 7. Микрофотография частиц активированного  $\text{Al}(\text{OH})_3$ 

Требования к топливным таблеткам по геометрическим параметрам, допускам на них, химическому составу, качеству поверхности и микроструктуре постоянно ужесточаются, что требует оптимизации технологии изготовления таблеток. Многолетний мировой опыт изготовления таблетированного топлива для атомных станций выработал основные технологические приемы получения порошка оксида урана, подготовки его к

прессованию, изготовлению самих таблеток. Каждый из этих этапов содержит несколько операций, направленных на формирование основных качеств порошка. Эти свойства закладываются на стадии химического передела, формирование их продолжается при физической обработке.

Обобщенная технологическая схема производства топливных таблеток приведена на рисунке 8.



Рис. 8. Обобщенная технологическая схема производства топливных таблеток



В настоящее время процесс производства порошков и таблеток не стал проще, чем во время его разработки. Жесткие требования конкуренции на рынке требуют удешевления топливной составляющей ядерного энергетического цикла.

Получение спеченных таблеток со стабильными свойствами в заданном диапазоне – очень сложная задача, решение которой зависит от всех технологических операций.

"Сухая" технологическая схема получения таблеток, которую применяли в работе, включает следующие операции:

Перед запуском порошков  $\text{UO}_2$  и добавок в производство их подвергают входному контролю качества с определением суммарного содержания изотопов урана (для  $\text{UO}_2$ ), воды, примесей, среднего условного размера частиц, насыпной плотности, удельной поверхности.

Затем готовят пресс-порошок, что предусматривает смешивание исходных порошков, измельчение и грануляцию, а также смешивание со стеаратом цинка. Смеси го-

товят в смесителях различного типа, преимущественно в двухконусных.

Последующее измельчение смеси проводят в планетарной мельнице в течение 30 мин., после чего промежуточный продукт просеивают через сито с размером ячеек 63 – 80 мкм. Вторичное смешивание оксидов со стеаратом цинка и порообразователем осуществляют в двухконусном смесителе в течение 30 – 60 мин.

Формование (прессование) топливных таблеток проводят на многопозиционных механических прессах (роторного типа).

В ходе исследования влияния добавок  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Al}(\text{OH})_3$  на структуру и свойства конечных изделий были изготовлены укрупненные партии таблеток, которые сравнивали со стандартными таблетками (без добавок). Суммарное количество добавок – 0,02 % масс.

Готовые изделия получали в рамках обычной "сухой" технологии. Результаты предварительных испытаний приведены в таблице 4.

Таблица 4

Свойства спеченных таблеток

Тип таблетки	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Исходный размер зерен, мкм	Максимальный размер зерен, мкм	Выход в «годное», %	Температура спекания, °С
Без добавок	10,49 – 10,52	7,5 – 12,2	284 – 508	85 – 95	1725 ± 5
$\text{Al}(\text{OH})_3$	10,49 – 10,52	8,5 – 12,7	265 – 449	85 – 96	1680 ± 10
$\text{TiO}_2$	10,45 – 10,50	12,1 – 12,2	405 – 456	95 – 98	1680 ± 10

Как видно из таблицы, введение добавок позволило уменьшить температуру спекания на 45°С и повысить качество таблеток. По предварительным данным их механическая прочность оказалась в 1,2 – 1,5 раз выше стандартных.

На следующем этапе работы планируется приготовление таблеток с добавками  $\text{Gd}(\text{OH})_3$  и  $\text{Al}(\text{OH})_3$  взамен  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ .

### Заключение

В результате проведенной работы установлены некоторые отличительные особенности структуры исходных порошков добавок  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Gd}(\text{OH})_3$  и определены их основные свойства. Разработаны оптимальные режимы получения высокодисперсных до-

бавок и предложен оптимальный метод введения их в смеси с  $\text{UO}_2$ .

Предложены возможные механизмы влияния высокодисперсных добавок на технологию изготовления таблеток.

### Список литературы

1. Панов В.С., Лопатин В.Ю. Составы, технология и свойства порошковых материалов для ядерной техники. М.: Издательский Дом МИСиС, 2008. 105 с.
2. Неорганическая химия. Химия элементов / Ю.Д.Третьяков, Л.И. Мартыненко [и др.]. М.: Изд-во "Химия", 2007. 432 с.
3. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов / С.П. Барханов, А.И. Корчагин [и др.] // Доклады Академии наук. 2006. Т. 409. № 3. С. 320-323.
4. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия. М.: Высшая школа, 2001. 743 с.
5. Тарасов А.В. Металлургия титана. М.: ИКЦ "Академкнига", 2003. 328 с.
6. Михайличенко А.И., Патрикеев Ю.Б. Редкоземельные металлы. М.: Металлургия, 1987. 231 с.
7. Лидин Р.А., Андреева Л.Л., Молочко В.А. Константы неорганических веществ: справочник. М.: ДРОФА, 2008. 685 с.
8. Особенности получения тонкодисперсных гидроксида алюминия и глино-

зема / И.Б. Воробьев, И.В. Николаев [и др.] // Сб. докладов. первой науч.-практ. конф. специалистов алюминиевого комплекса ОАО "СУАЛ ХОЛДИНГ" (декабрь 2001 г., г. Красноуральск). М., 2002. С. 38 – 40.

9. Определение условий кристаллизации основных фаз гидроксида алюминия при карбидизации алюминатных растворов / И.Б. Воробьев, И.В. Николаев [и др.] // Известия Вузов. Цветная металлургия. 2006. № 6. С. 43 – 47.

10. Применение математической модели для описания процессов консолидации порошков  $\text{UO}_2$ / Э.И. Андреев, К.В. Главин [и др.] // Известия Вузов. Цветная металлургия. 2008. № 3. С. 58 – 64.

11. Получение методом синтеза нанопорошка гидроксида гадолиния для легирования материалов топливных таблеток и исследование его физико-химических свойств / В.С. Панов, В.Ю. Лопатин, Ж.В. Еремеева, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 2 (65). С. 78-86.

12. Методы подготовки и получение исходных материалов для приготовления гранул оксида гадолиния для ТВЭЛ / Т.М. Алдажаров, Ю.Г.Русин, Ж.В. Еремеева, Т.А. Рыспаев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 4 (67). С. 8-18.

*Поступила в редакцию 20.02.17*

UDC 621.762

**V.S. Panov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Research Technological University MISIS (Moscow, Russia) (e-mail: zeinalova@rambler.ru)

**V.Y. Lopatin**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, National Research Technological University MISIS (Moscow, Russia) (e-mail: lopatin63@mail.ru)

**O.V. Myakisheva**, Candidate of Technical Sciences, National Research Technological University MISIS (Moscow, Russia). (e-mail: lvm1939@mail.ru)

**J.V. Eremeeva**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, National Research Technological University MISIS (Moscow, Russia) (e-mail: eremeeva-shanna@yandex.ru)

**E.V. Ageev**, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: ageev\_ev@mail.ru)

**T.M. Aldayarov**, Doctoral Candidate, VKGTU (Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan) (e-mail: aldazharov-timur@yandex.ru)

**A.I. Lizunov**, Postgraduate Student, Moscow Polytechnical University (Moscow, Russia) (e-mail: art-liz481@rambler.ru)

## A REVIEW OF MODIFYING AGENTS USE TO IMPROVE NUCLEAR FUEL PERFORMANCE IN THE REACTORE CORE

*Today there are numerous research works meant to improve nuclear fuel element performance in order to ensure reliable operation under increased burn-up conditions. In this context the pellet microstructure seems to be a very important parameter. An increase in the grain size diminishes the branching of boundaries and reduces the migration speed of gas-filled pores to the grain boundaries which are the routes of accelerated diffusion.*

*The problem can be solved by introducing nano additives to uranium dioxide considering the influence of small addition agents upon the grain growth activation and microstructure evolution. The addition of nano particles of different powders should stimulate agglomeration process. This is one of modern tendencies in the development of new material technologies for fast reactors.*

*In the research process the mechanical activation with simultaneous size reduction of gadolinium oxide and aluminum and gadolinium hydroxide powders ( $Gd_2O_3$  №1,  $Gd_2O_3$  №2,  $Al(OH)_3$  and  $Gd(OH)_3$ ) was done in planetary centrifugal mill "Pulverisette 5" made by Fritsch GmbH company (Germany).*

*The technology of  $UO_2$  nuclear fuel manufacture has been developed in several variants including the agglomeration with pre-pressing or extruding, isostatic and hot pressing, rotary swaging, vibratory compacting, slip casting, etc. Today the main  $UO_2$  fuel element manufacturing technologies are cold pressing and agglomeration considering their simplicity and affordability.*

*The conducted research permitted to ascertain some specific features of initial  $TiO_2$ ,  $Al(OH)_3$ ,  $Gd_2O_3$ , and  $Gd(OH)_3$  additives and determine their basic properties. The authors determined the most optimal modes of fine-grained additives production and proposed and optimal method of their introduction into  $UO_2$  mixtures. The paper also considers possible mechanisms of fine-grained additives influence on the fuel pellet production.*

**Key words:** nuclear fuel, burnup rate, modifying additives .

**DOI:** 10.21869/2223-1560-2017-21-2-48-59

**For citation:** Panov V.S., Lopatin V.Y., Myakisheva O.V., Eremeeva J.V., Ageev E.V., Aldayarov T.M., Lizunov A.I. evaluation of the use of the modifier dobavok to improve proizvoditelnosti toplive nuclear reactor, Proceeding of Southwest State University, 2017, vol. 21, no. 2(71), pp. 48-59 (in Russ.).

\*\*\*

## References

1. Panov V.S., Lopatin V.Ju. Sostavy, tehnologija i svojstva poroshkovyh materialov dlja jadernoj tehniki. M.: Izdatel'skij Dom MISiS, 2008. 105 s.
2. Neorganicheskaja himija. Himija jelementov / Ju.D.Tret'jakov, L.I. Martynenko [i dr.]. M.: Izd-vo "Himija", 2007. 432 s.
3. Poluchenie nanoporoshkov ispareniem ishodnyh veshhestv na uskoritele elektronov / S.P. Barhanov, A.I. Korchagin [i dr.] // Doklady Akademii nauk. 2006. T. 409. № 3. S. 320-323.
4. Ahmetov N.S. Obshhaja i neorganicheskaja himija. M.: Vysshaja shkola, 2001. 743 s.
5. Tarasov A.V. Metallurgija titana. M.: IKC "Akademkniga", 2003. 328 s.
6. Mihajlichenko A.I., Patrikeev Ju.B. Redkozemel'nye metally. M.: Metallurgija, 1987. 231 s.
7. Lidin R.A., Andreeva L.L., Molochko V.A. Konstanty neorganicheskikh veshhestv: spravochnik. M.: DROFA, 2008. 685 s.
8. Osobennosti poluchenija tonkodispersnyh gidroksida aljuminija i glinozema / I.B. Vorob'ev, I.V. Nikolaev [i dr.] // Sb. dokladov. pervoj nauch.-prakt. konf. specialistov aljuminievogo kompleksa OAO "SUAL HOLDING" (dekabr' 2001 g., g. Krasnoural'sk). M., 2002. S. 38 – 40.
9. Opredelenie uslovij kristallizacii osnovnyh faz gidroksida aljuminija pri karbidizacii aljuminatnyh rastvorov / I.B. Vorob'ev, I.V. Nikolaev [i dr.] // Izvestija Vuzov. Cvetnaja metallurgija. 2006. № 6. S. 43 – 47.
10. Primenenie matematicheskoy modeli dlja opisanija processov konsolidacii poroshkov UO<sub>2</sub>/ Je.I. Andreev, K.V. Glavin [i dr.] // Izvestija Vuzov. Cvetnaja metallurgija. 2008. № 3. S. 58 – 64.
11. Poluchenie metodom sinteza nanoporoshka gidroksida gadolinija dlja legirovanija materialov toplivnyh tabletok i issledovanie ego fiziko-himicheskikh svojstv / V.S. Panov, V.Ju. Lopatin, Zh.V. Ereemeeva, E.V. Ageev // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. № 2 (65). S. 78-86.
12. Metody podgotovki i poluchenie ishodnyh materialov dlja prigotovlenija granul oksida gadolinija dlja TVJeL / T.M. Aldazharov, Ju.G.Rusin, Zh.V. Ereemeeva, T.A. Ryspaev, E.V. Ageev // Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. 2016. № 4 (67). S. 8-18.