

СПОСОБ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТАБИЛЬНОСТИ УРАН-ГАДОЛИНИЕВОГО ТОПЛИВА

**А.Е. Карпеева, В.Г. Колосовский, Д.С. Пахомов, А.Е. Скомороха,
И.С. Тимошин**

ПАО «Машиностроительный завод»

144001, Россия, Московская обл., г. Электросталь, ул. Карла Маркса, д. 12

Р

Термическая стабильность («доспекаемость») уран-гадолиниевого топлива главным образом зависит от пористости, распределения пор и зерен по размерам, соотношения между открытыми и закрытыми порами и т.д. Пористость и распределение пор по размерам зависят от характеристик исходного порошка диоксида урана и от технологии производства топливных таблеток. Существующая технология изготовления ядерного топлива гарантированно обеспечивает требуемые свойства, позволяющие надежно и безопасно эксплуатировать его до уровня выгорания ~ 60 МВт·сут/кг урана [1]. При этом тенденции последних лет направлены на увеличение глубины выгорания и продолжительности цикла облучения между перегрузками и достижение нулевого отказа [2 – 4], что требует проведения комплексных исследований на всех стадиях производства ядерного топлива, включая установление зависимостей «технология-структура-свойства». Согласно Руководству [5], в 2008 г. полученные результаты после теста на «доспекаемость» соответствуют радиационному уплотнению топлива, достигаемому при относительно низком выгорании 10 МВт·сут/кг. Это подтверждено в [6, 7] и в работе А.С. Щеглова и В.Н. Проселкова об особенностях поведения твэгов ВВЭР в начале топливной кампании [8], где расчетные результаты соответствовали измеренным значениям. В статье показано влияние количества вводимого при изготовлении топливных таблеток порообразователя, а также предложен способ получения необходимой пористости для стабилизации «доспекаемости» уран-гадолиниевого топлива.

Ключевые слова: термическая стабильность, доспекаемость, уран-гадолиниевое топливо, топливные таблетки, порообразователь, пористость, твэл, твэг.

ВВЕДЕНИЕ

Основным технико-экономическим показателем для атомных электростанций является степень выгорания ядерного топлива. Кампания для ВВЭР составляет 12, 18 – 24 месяца, с топливными таблетками обогащением до 4,5% [9]. Такое топливо в начале кампании обладает высокой реактивностью, которую необходимо подавлять. Для этого в активную зону водоохлаждаемого реактора вводят выгорающий поглотитель нейтронов. Поглотитель должен быть неделящимся материалом, иметь высокое поперечное сечение захвата нейтронов и не вызывать образования нежелательных продуктов деления. Всеми этими качествами обладает гадолиний, который используется в ядерном

© *А.Е. Карпеева, В.Г. Колосовский, Д.С. Пахомов, А.Е. Скомороха, И.С. Тимошин, 2021*

топливе в виде добавки оксида гадолиния Gd_2O_3 .

Использование гадолиния в топливе позволяет в широких пределах изменять нейтронно-физические характеристики ТВС и схему их размещения при перегрузках зоны. С помощью уран-гадолиниевого топлива можно эффективно регулировать пик мощности в течение цикла [10]. Преимущества использования уран-гадолиниевого топлива также состоят в снижении стоимости вырабатываемой электрической энергии, эксплуатационных расходов, в продлении сроков службы корпуса реактора за счет более глубокого выгорания топлива и снижении флюенса на корпус [10].

К такому топливу предъявляются высокие требования, в том числе и иностранных заказчиков по стандартам ASTM [11], которые рассматривают показатели «доспекаемости» и плотности как ключевые параметры в расчетных обоснованиях поведения твэгов (твэлы, содержащие уран-гадолиниевое топливо) в стационарном режиме, переходных и режимах маневрирования мощностью реактора, а также в проектных авариях.

«Доспекаемость» топлива представляет собой термическую стабильность геометрических размеров (диаметра) и плотности топливных таблеток вне реактора, т.е. то максимальное значение уплотнения, которое топливо могло бы показать в реакторе. Определяют термическую стабильность с помощью стандартизированной методики, признанной во всем мире [11]. После спекания топливные таблетки не достигают своего максимального уплотнения, поэтому в реакторе чаще происходит их «остаточное» доуплотнение (десятые или сотые доли процентов). При этом таблетки могут уплотняться с разной скоростью в зависимости от свойств топлива и условий облучения, что может привести к риску отказа, образованию осевых зазоров или взаимодействию топлива с оболочкой. Поэтому стабилизация «доспекаемости» позволяет уменьшить возможные риски и гарантировать работоспособность топлива в реакторе.

Эффективность теста на термическую стабильность («доспекаемость») была показана в 1980-х гг. в [6, 12 – 14]. Показано, что лучшая размерная стабильность на начальной стадии облучения достигается при содержании в топливе пор малого размера (до 10 мкм), которые определяют величину радиационного уплотнения. В условиях, вызывающих миграцию пор, присутствие технологической внутризеренной пористости и высокоплотной UO_2 может негативно влиять на размерную стабильность топливного сердечника, приводя к заметному дополнительному распуханию нерадиационного характера [12].

Пористость и характер распределения пор по размерам, которые оказывают существенное влияние на «доспекаемость», также являются одними из важных факторов, определяющих прочностные свойства и радиационную стойкость топлива под облучением [15, 16]. В условиях облучения конкурируют два процесса: уплотнение из-за уменьшения объема пор и их исчезновения (в основном, мелких) и распухание матрицы. В зависимости от начальной плотности топлива и характера пористости доминирует тот или другой процесс. Для уран-гадолиниевого топлива это важно ещё и потому, что при эксплуатации в реакторе твэги показывают отличия в удлинении по сравнению с твэлами [17].

Показано, что лучшая размерная стабильность на начальной стадии облучения достигается при содержании в топливе пор малого размера, которые определяют величину радиационного уплотнения [18]. В данной работе был опробован новый способ изготовления уран-гадолиниевого топлива [19], который позволил получить необходимую пористость для стабилизации «доспекаемости».

В качестве объекта исследования были изготовлены топливные таблетки с 8,00% мас. оксида гадолиния с различным содержанием порообразователя и его способом добавления. Все таблетки подвергались контролю качества по основным параметрам. Для этого применялись методики, используемые при серийном производстве уран-гадолиниевых топливных таблеток.

Измерения значений показателя термической стабильности геометрических размеров проводили по аттестованной методике, плотность определялась гидростатическим методом по аттестованной методике, определение пористости и доли пор с размером до 10 мкм проводили на оптическом микроскопе с аттестованным специализированным программным обеспечением. Для изучения свойств порообразователя применялся дифференциально-термический анализ.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПОРООБРАЗОВАТЕЛЯ

Для получения необходимой пористости авторами статьи было предложено использовать в качестве порообразователя азодикарбонамид (его ещё называют порофор или ADC). Это органическое соединение $H_2NC(O)N=NC(O)NH_2$, которое имеет высокий коэффициент газообразования (объем выделяемого газа от 220 до 240 мл/г), температуру разложения в интервале 204 – 206°C и температуру окончания эффективного разложения 340°C (рис. 1).

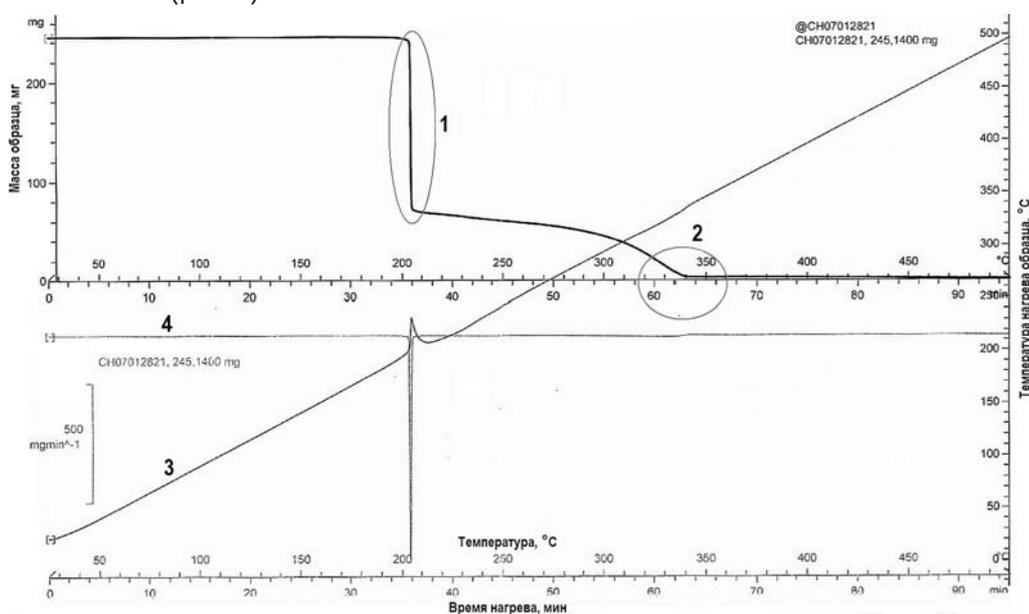


Рис. 1. Термогравиметрическая кривая порообразователя: 1 – температура разложения образца порообразователя (204 – 206°C); 2 – температура окончания эффективного разложения образца порообразователя (340°C); 3 – температура образца порообразователя; 4 – производная от потери массы

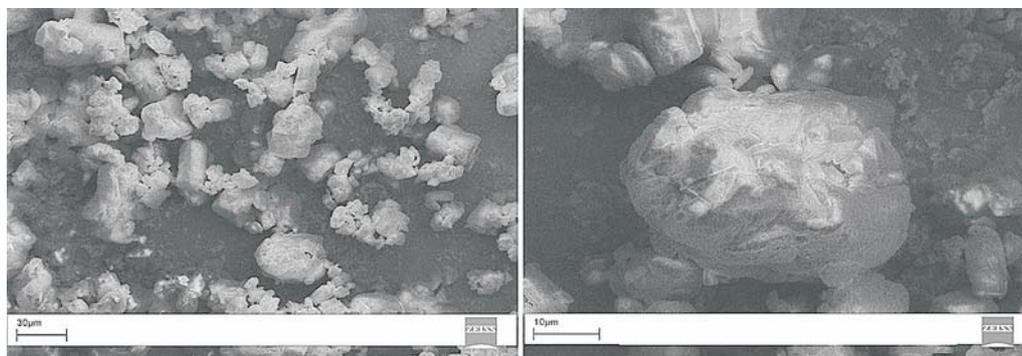


Рис. 2. Форма частиц порообразователя

Анализ проводился на установке TGA/SDTA851e фирмы «Mettler». Эксперимент заключался в нагревании образца до температуры 500°C со скоростью 5°C/мин в протоке воз-

духа с расходом 100 мл/мин, масса исследуемого образца составляла 0,245 г.

Размер пор в структуре таблетки при добавлении порообразователя, в основном, определяется крупностью его частиц, поэтому с помощью электронного микроскопа «EVO MA 10» производилась оценка крупности и склонности к агломерации частиц порошка порообразователя (рис. 2). Средний размер частиц порообразователя составлял 15,2 мкм.

Порообразователь представляет собой в основной массе достаточно крупные (15 – 30 мкм) кристаллиты, объединенные в непрочные агломераты. В результате технологического воздействия такие частицы разрушаются и достаточно хорошо смешиваются с порошком UO_2 , образуя равномерную смесь, что после спекания таблеток позволяет получить равномерно распределенную пористость.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА ПОРООБРАЗОВАТЕЛЯ НА СВОЙСТВА ТОПЛИВНЫХ ТАБЛЕТОК

При изготовлении уран-гадолиниевых таблеток чаще порообразователь добавляют в количестве $\leq 0,6\%$ мас. Для исследования влияния этой добавки на основные характеристики уран-гадолиниевых таблеток было увеличено количество азодикарбонамида в два раза. В таблице 1 представлены основные параметры уран-гадолиниевого топлива в зависимости от количества порообразователя (0,6 и 1,2% мас.). Увеличение количества порообразователя уменьшило плотность топлива, но при этом рассеивание значений случайной величины дроспекаемости относительно её математического ожидания (среднеквадратичное отклонение, СКО) стало меньше.

Таблица 1

Свойства топливных образцов в зависимости от количества порообразователя

Количество порообразователя, %мас.	0,6	1,2
Относительная плотность, %	96,6	95,3
Дроспекаемость $\Delta D/D$, %	0,01	0,03
СКО	0,0125	0,0090
Средний размер зерна, мкм	15,3	13,2
Количественная доля пор с размером 1 – 10 мкм, %	76,4	77,8
Количественная доля пор с размером < 2,5 мкм, %	35,6	21,1
Количественная доля пор с размером > 2,5 мкм, %	64,6	78,9

Проведенная оценка количественной доли пор показывает, что в уран-гадолиниевых таблетках с использованием как 0,6%, так и 1,2% порообразователя преобладают крупные поры. Было отмечено, что при этом в топливе с повышенным содержанием порообразователя доля пор с размером < 2,5 мкм меньше примерно на 15%.

На рисунках 3, 4 представлены фотографии шлифов спеченных уран-гадолиниевых таблеток (8,00% Gd_2O_3) с порообразователем в количестве 0,6% мас. (а) и 1,2% мас. (б). Металлографический анализ показал, что характерный размер зерна составляет 15,3 и 13,2 мкм для 0,6 и 1,2% мас. порообразователя соответственно. Также хорошо видны крупные поры (б), образовавшиеся благодаря добавлению увеличенной дозы порообразователя.

Для сохранения значений плотности и стабилизации значений дроспекаемости было предложено часть порообразователя измельчать, обрабатывая совместно с исходными порошками UO_2 и Gd_2O_3 . Благодаря механическому измельчению порообразователя (на стадии обработки в вибромельнице) появляется возможность получать микронные поры для регулирования пористости и как следствие плотности. Оставшаяся часть порообразователя добавлялась в полученный гранулят перед выполнением операции смешивания и окатки вме-

сте с твердой смазкой. На этой стадии порообразователь не измельчается и после спекания образует крупные поры, которые играют роль газосборников, необходимых в топливной матрице. Полученный пресспорошок прессуют в «сырые» таблетки и спекают.

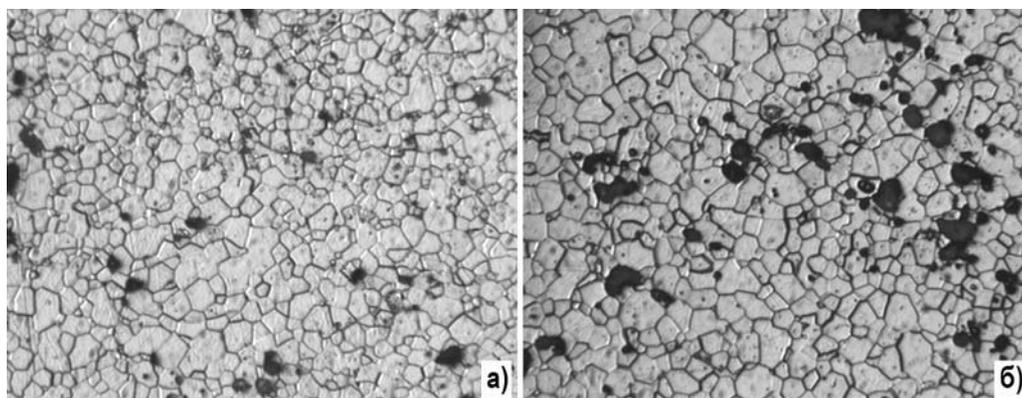


Рис. 3. Характерная структура зерен ($\times 400$, травленный шлиф) с добавкой порообразователя: а) – 0,6%; б) – 1,2%

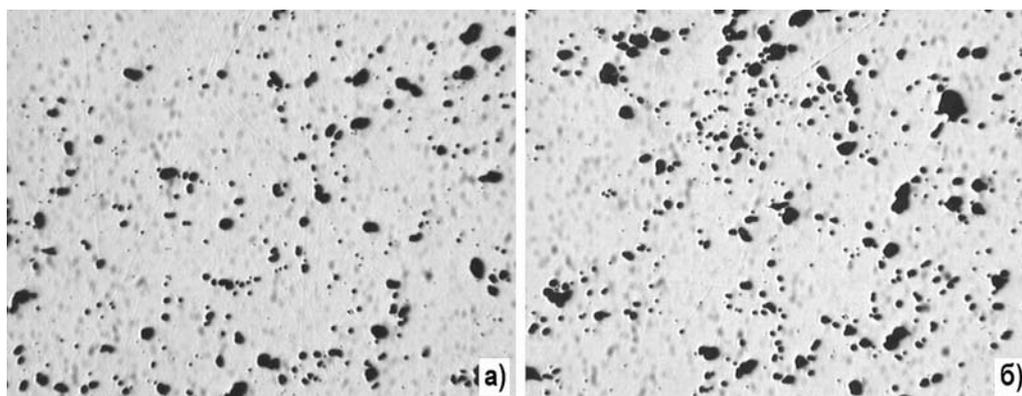


Рис. 4. Характерная пористость ($\times 100$, травленный шлиф) с добавкой порообразователя: а) – 0,6%; б) – 1,2%

ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОПРОБОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО СПОСОБА ВВЕДЕНИЯ ПОРООБРАЗОВАТЕЛЯ

На рисунке 5 изображена схема приготовления пресспорошка с добавлением порообразователя.

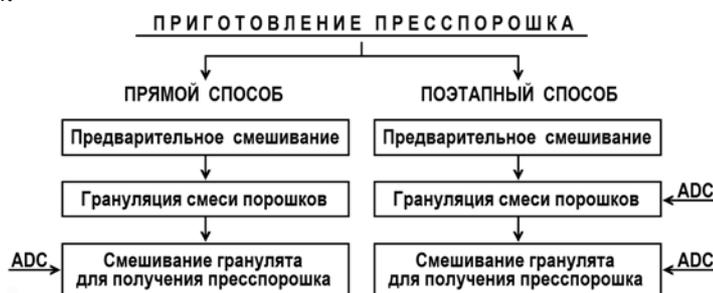


Рис. 5. Схема приготовления пресспорошка

При изготовлении экспериментальной партии топливных таблеток по поэтапному способу (см. рис. 5) добавляли 0,6% порообразователя (азодикарбонамид) при подготовке гранулята. К полученной смеси (гранулят) добавляли твердую смазку и ещё 0,6%

порообразователя. Пресспорошок прессовали и спекали при температуре 1730°C (для варианта 1), 1700°C (для варианта 2), 1680°C (для варианта 3).

Для сравнения в табл. 2 приведены свойства уран-гадолиниевых таблеток из предыдущего опыта (см. табл. 1), которые изготовлены с добавлением порообразователя в количестве 1,2% (вариант 4) и 0,6% (вариант 5) на стадии смешивания гранулята с твердой смазкой (прямой способ). Спекание таблеток осуществляли в высокотемпературной печи с температурой рабочей зоны 1730°C в восстановительной атмосфере.

Качественные характеристики уран-гадолиниевых таблеток для каждого варианта изготовления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Свойства топливных образцов в зависимости от способа добавления порообразователя

Вариант	1	2	3	4	5
Относительная плотность, %	96,4	96,8	96,5	95,3	96,6
Доспекаемость $\Delta D/D$, %					
Среднее значение	0,01	0,02	0,04	0,03	0,01
Среднеквадратическое отклонение (СКО)	0,0086	0,0088	0,0095	0,0090	0,0125
Средний размер зерна, мкм	15,4	13,1	11,0	13,2	15,3
Количественная доля пор с размером 1 – 10 мкм, %	81,0	84,8	93,9	77,8	76,4
Количественная доля пор с размером < 2,5 мкм, %	45,4	45,6	47,5	21,1	35,6
Количественная доля пор с размером > 2,5 мкм, %	54,5	54,4	52,5	78,9	64,6

Из таблицы 2 следует, что поэтапное добавление порообразователя позволяет сохранить значения доспекаемости топлива и стабилизировать их без уменьшения плотности за счет того, что в условиях заключительной стадии спекания действующими силами являются лапласовские, которые способствуют отделению от границ зерен и закрытию пор, что является своеобразным барьером в завершении уплотнения материала [20]. В результате этого, вероятно, такое топливо при работе в реакторе на начальной стадии облучения будет уплотняться из-за уменьшения объема пор и их исчезновения, и процесс распухания матриц наступит позже.

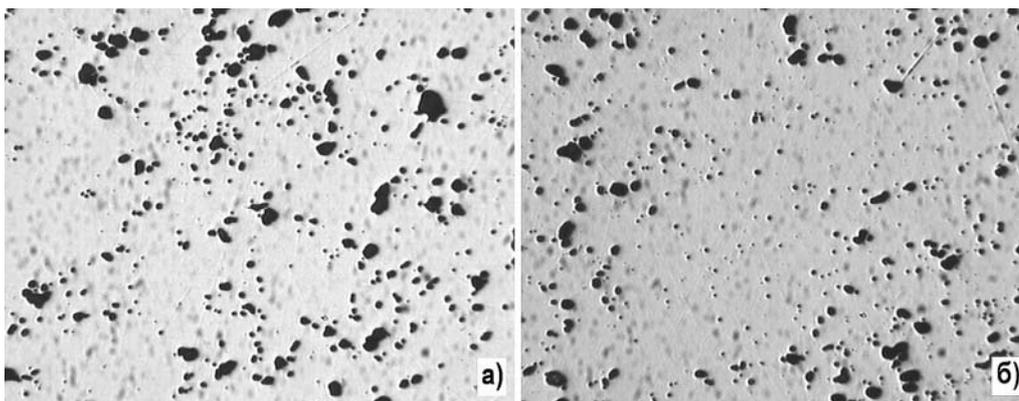


Рис. 6. Характерная пористость ($\times 100$) таблеток УГТ при добавке порообразователя: а) – прямым способом (1,2%мас); б) – поэтапным способом (1,2%мас)

Количественная оценка размеров пор (см. табл. 2) показывает, что для стабилизации доспекаемости (уменьшения СКО) целесообразно получать топливо с равным соотношением количества крупных и мелких пор. На рисунке 6 представлены фотографии

шлифов, спеченных уран-гадолиниевых таблеток (8,00% Gd_2O_3) с порообразователем в количестве 1,2% мас. (рис. 6а – вариант 4 из табл. 2; рис. 6б – вариант 1 из табл. 2).

Таким образом, предложенный способ изготовления уран-гадолиниевого топлива способствует получению более стабильных показателей пористости таблеток, которые непосредственно влияют на стабилизацию «доспекаемости» топливных таблеток.

ВЫВОДЫ

Проанализированы свойства азодикарбонида, который используется в качестве порообразователя в уран-гадолиниевом топливе (температура разложения 204 – 206 °С, температура окончания эффективного разложения 340 °С, размер частиц 15,2 мкм). Порообразователь представляет собой в основной массе достаточно крупные (15 – 30 мкм) кристаллиты, объединенные в непрочные агломераты. В результате технологического воздействия такие частицы разрушаются и достаточно хорошо смешиваются с порошком UO_2 , образуя равномерно распределенную пористость.

Увеличение количества порообразователя до 1,2% мас. уменьшило плотность топлива, но при этом стабилизировало значение доспекаемости – рассеивание значений случайной величины доспекаемости относительно её математического ожидания (среднеквадратичное отклонение, СКО) стало меньше.

Проведенная оценка количественной доли пор показывает, что в уран-гадолиниевых таблетках с использованием как 0,6%, так и 1,2% порообразователя преобладают крупные поры. Было отмечено, что в топливе с повышенным содержанием порообразователя доля пор с размером < 2,5 мкм меньше приблизительно на 15%. Поэтапное добавление порообразователя в увеличенном количестве (1,2%) позволяет сохранить значения доспекаемости топлива и стабилизировать их без уменьшения плотности.

Количественная оценка размеров пор показывает, что для стабилизации доспекаемости целесообразно получать топливо с равным соотношением количества крупных и мелких пор.

Литература

1. Молчанов В.Л. Ядерное топливо для реакторов ВВЭР. Современное состояние и перспективы. / Материалы V Международной конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». – Подольск: ФГУП «ОКБ «Гидропресс», 2007. Электронный ресурс: www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/presentations (дата доступа 01.03.2021).
2. Experiences and Trends of Manufacturing Technology of Advanced Nuclear Fuels. // IAEA-TECDOC series, ISSN 1011-4289. – 2012. – No. 1686. – PP. 34-35.
3. Петров И.В., Басов В.В. Поведение таблеток уран-эрбиевого оксидного топлива в процессе циклической термической обработки. // Атомная энергия. – 2009. – Т. 107. – Вып. 4. – С. 221-224. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9225-z>.
4. Соколова И.Д. Опыт разработок топлива для реакторов PWR и его эксплуатации на АЭС Франции. // Атомная техника за рубежом. – 2007. – № 10. – С. 3-11.
5. Draft Regulatory Guide DG-1189. An Acceptable Model and Related Statistical Methods for the Analytics of Fuel Densification. – NSNRC, Dec. 2008. – PP. 1-10.
6. Maier G., Assmann H., Durr W. Resinter Testing in Relation to In-Pile Densification. // Journal of Nuclear Materials. – 1988. – Vol. 153. – PP. 213-220. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(88\)90213-9](https://doi.org/10.1016/0022-3115(88)90213-9).
7. Mikheev E.N., Fedotov A.V., Malygin V.B., Izhutov A.L. et al. In-Pile Investigation Results of Re-Sintering for Uranium Dioxide Fuel with Large Grain Size at Temperature 650-700 °С. / Proc. of the Int. Conf. «Top Fuel 2016». Boise, ID. September 11-15, 2016. – PP. 463-468.
8. Щеглов А.С., Волков Б.Ю., Проселков В.Н. Особенности поведения твэгов ВВЭР в начале топливной кампании. / Proc. of the X-th Int. Conf. on WWER Fuel Performance,

- Modelling and Experimental Support. Bulgaria. Sept. 7-14, 2013. – PP. 359-368.
9. *Одейчук Н.П., Сиренко С.А., Большак А.И. и др.* Некоторые характеристики экспериментальных двухслойных уран-гадолиниевых таблеток. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2008. – Вып. 1. – С. 133-135.
10. *Горский В.В.* Применение интегрированных с топливными таблетками выгорающих поглотителей в LWR. // Атомная техника за рубежом. – 2000. – № 7. – С. 3-8.
11. Standard ASTM C776-06 Specification for Sintered Uranium Dioxide Pellets. – 2011. – PP. 160-163.
12. *Гонтарь А.С., Кучеров Р.Я., Нелидов М.В.* Влияние внутризеренных пор на распухание UO_2 . // Атомная энергия. – 1985. – Т. 58. – Вып. 1. – С. 54-55. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01123246>.
13. *Огита М.* Integrity degradation of UO_2 pellets subjected to thermal shock. // Journal of Nuclear Materials. – 1985. – Vol. 127. – No. 1. – PP 67-76. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(85\)90062-5](https://doi.org/10.1016/0022-3115(85)90062-5).
14. *Махова В.А., Соколова И.Д.* Оптимизация микроструктуры UO_2 -топлива. // Атомная техника за рубежом. – 1988. – № 19. – С. 3-8.
15. *Assmann H., Durr W., Peehs M.* Control of UO_2 Microstructure by Oxidative Sintering. // Journal of Nuclear Materials. – 1986. – Vol. 140. – No. 1. – PP. 1-6. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(86\)90189-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(86)90189-3).
16. *Бойко В.И., Колпаков Г.Н., Селиваникова О.В.* Топливные материалы в ядерной энергетике: учебное пособие. – Томск: Томский политехнический университет, 2008. – 186 с.
17. *Демьянов П.Г., Новиков В.В. и др.* Моделирование удлинения уран-гадолиниевых твэлов ВВЭР-1000. / Материалы XI конференции по реакторному материаловедению. АО «ГНЦ НИИАР», г. Димитровград. 2019. – С. 61-62.
18. *Божко Ю.В., Малыгин В.Б.* Изменение размеров таблеток из модифицированного диоксида урана в процессе облучения. // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования» (science-education.ru). – 2013. – Вып. 3.
19. *Карпеева А.Е., Пахомов Д.С. и др.* Способ изготовления уран-гадолиниевого ядерного топлива. – Российская Федерация. Заявка на патент RU № 2020132997 от 06.10.2020.
20. *Кипарисов С.С., Либенсон Г.А.* Порошковая металлургия. – М.: Металлургия, 1980. – 496 с.

Поступила в редакцию 04.03.2021 г.

Авторы

Карпеева Анастасия Евгеньевна, ведущий инженер

E-mail: karpeevaanastasiya@gmail.com

Колосовский Василий Григорьевич, заместитель начальника ЦНИЛ

E-mail: VGKolosovsky@rosatom.ru

Пахомов Дмитрий Сергеевич, начальник участка

E-mail: DSPakhomov@rosatom.ru

Скомороха Андрей Евгеньевич, начальник лаборатории ЛКТ

E-mail: AndreySe@mbp.ru

Тимошин Игнат Сергеевич, начальник лаборатории ЦЗЛ, канд. тех. наук

E-mail: msz-lgm@mail.ru

UDC 621.039.542.342

A METHOD TO OPTIMIZE THE THERMAL STABILITY OF URANIUM-GADOLINIUM FUEL

Karpeeva A.E., Kolosovskiy V.G., Pakhomov D.S., Skomorokha A.E., Timoshin I.S.

PJSC Machine-Building Plant

12 Karl Marks Str., 144001 Elektrostal, Moscow Reg., Russia

ABSTRACT

Thermal stability (resintering) of uranium-gadolinium fuel depends largely on porosity, the size-based distribution of pores and grains, the ratio between open and closed pores, etc. In turn, porosity and size-based distribution of pores depend on the characteristics of the initial uranium dioxide powder and the fuel pellet fabrication technology. The existing nuclear fuel fabrication technology securely provides for the required properties, which make it possible to operate nuclear fuel reliably and safely to a burn-up level of up to ~ 60 MW day/kg of uranium [1]. Meanwhile, recent trends have been towards increasing the burn-up depth and the duration of the irradiation cycle to refueling, and achieving a zero failure level [2 – 4], this requiring integrated studies to be conducted at all nuclear fuel manufacturing stages, including determination of the technology-structure-property dependences. In 2008, as shown in [5], the results obtained after the resintering test complied with the radiation-induced densification of fuel achievable at a relatively low burn-up of 10 MW·day/kg. This was also confirmed in [6, 7] and in a work by A.S. Shcheglov and V.N. Proselkov on the peculiarities of the VVER U-Gd fuel rod BOL behavior [8], where the calculated results met the measured values. The paper shows the effects of the pore agent quantity introduced in the fuel pellet fabrication process, and a method has been proposed to achieve the required porosity for stabilizing the uranium-gadolinium fuel resintering.

Key words: thermal stability, resintering, uranium-gadolinium fuel, fuel pellets, pore agent, porosity, fuel rod, U-Gd fuel rod.

REFERENCES

1. Molchanov V.L. Nuclear fuel for VVER reactors. Current State and Prospects: *Proc. of the V-th International Conference «Ensuring NPP Safety with VVER»*. Podolsk. FGUP OKB Hidropress Publ., 2007. Available at: www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/presentations (accessed Mar. 01, 2021) (in Russian).
2. Experiences and Trends of Manufacturing Technology of Advanced Nuclear Fuels. *IAEA-TECDOC series, ISSN 1011-4289*. 2012, no. 1686, pp. 34-35.
3. Petrov I.V., Basov V.V. Behavior of Uranium-Erbium Oxide Fuel Pellets in the Process of Cyclic Thermal Treatment. *Atomnaya Energiya*. 2009, v. 107, iss. 4, pp. 221-224. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9225-z> (in Russian).
4. Sokolova I.D. Experience in the development of fuel for PWR reactors and its operation at the French nuclear power plant. *Atomnaya Tekhnika za Rubezhom*. 2007, no. 10, pp. 3-11 (in Russian).
5. Draft Regulatory Guide DG-1189. An Acceptable Model and Related Statistical Methods for the Analytics of Fuel Densification. *NSNRC*. Dec. 2008, pp. 1-10.
6. Maier G., Assmann H., Dürr W. Resinter Testing in Relation to In-Pile Densification. *Journal of Nuclear Materials*. 1988, v. 153, pp. 213-220; DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(88\)90213-9](https://doi.org/10.1016/0022-3115(88)90213-9).
7. Mikheev E.N., Fedotov A.V., Malygin V.B., Izhutov A.L. et al. In-Pile Investigation Results of Re-Sintering for Uranium Dioxide Fuel with Large Grain Size at Temperature 650-700°C. *Proc. of the Int. Conf. «Top Fuel 2016»*. Boise. ID. Sept. 11-15, 2016, pp. 463-468.

8. Shcheglov A.S., Volkov B.Yu., Proselkov V.N. Peculiarities of Behavior of VVER Fuel Rods at the Beginning of the Fuel Company. *Proc. of the X-th Int. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support*. Bulgaria. Sept. 7-14, 2013, pp. 359-368.
9. Odeychuk N.P., Sirenko S.A., Bolshak A.I. et al. Some characteristics of experimental two-layer uranium-gadolinium pellets. *VANT. Ser: Yaderno-Reaktornye Konstanty*. 2008, iss. 1, pp. 133-135 (in Russian).
10. Gorsky V.V. Using of Burnout Absorbers Integrated with Fuel Pellets in LWR. *Atomnaya Tekhnika za Rubezhom*. 2000, no. 7, pp. 3-8 (in Russian).
11. Standard ASTM C776-06 Specification for Sintered Uranium Dioxide Pellets. 2011, pp. 160-163.
12. Gontar A.S., Kucherov R.Ya., Nelidov M.V. The Effect of Intra-Grain Pores on Swelling. *UO₂*. *Atomnaya Energiya*. 1985, v. 58, iss. 1, pp. 54-55; DOI: <https://doi.org/10.1007/BF01123246> (in Russian).
13. Oguma M. Integrity Degradation of UO₂ Pellets Subjected to Thermal Shock. *Journal of Nuclear Materials*. 1985, v. 127, no. 1, pp. 67-76; DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(85\)90062-5](https://doi.org/10.1016/0022-3115(85)90062-5).
14. Makhova V.A., Sokolova I.D. Optimization of Microstructure of UO₂-Fuel. *Atomnaya Tekhnika za Rubezhom*. 1988, no. 19, pp. 3-8 (in Russian).
15. Assmann H., Dürr W., Peehs M. Control of UO₂ Microstructure by Oxidative Sintering. *Journal of Nuclear Materials*. 1986, v. 140, no. 1, pp. 1-6; DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-3115\(86\)90189-3](https://doi.org/10.1016/0022-3115(86)90189-3).
16. Boyko V.I., Kolpakov G.N., Selivanikova O.V. *Fuel Materials in Nuclear Energy*. Textbook. Tomsk. Tomsky Polytehnicheskyy Universitet Publ., 2008, 186 p. (in Russian).
17. Demyanov P.G., Novikov V.V. et al. Modeling of lengthening of uranium-gadolinium fuel elements of VVER-1000. *Proc. of the XI-th Conf. on Reactor Materials Science. JSC GNTs NIIAR, Dimitrovgrad*. 2019, pp. 61-62 (in Russian).
18. Bozhko Yu.V., Malygin V.B. Changing the size of tablets made of modified uranium dioxide during irradiation. *Electronic Scientific Journal «Modern Problems of Science and Education»* (science-education.ru). 2013, iss. 3 (in Russian).
19. Karpeeva A.E., Pakhomov D.S. et al. *Method of Producing Uranium-Gadolinium Nuclear Fuel*. Russian Federation, Patent Application No. 2020132997 dated Oct. 06, 2020 (in Russian).
20. Kiparisov S.S., Libenson G.A. *Powder Metallurgy*. Moscow. Metallurgiya Publ., 1980, 496 p. (in Russian).

Authors

Karpeeva Anastasiya Evgenyevna, Leading Engineer

E-mail: karpeevaanastasiya@gmail.com

Kolosovskiy Vasily Grigoryevich, Deputy Head of the Central Research Laboratory

E-mail: VGKolosovsky@rosatom.ru

Pakhomov Dmitry Sergeyeovich, Head of the Pellet Fabrication Department

E-mail: DSPakhomov@rosatom.ru

Skomorokha Andrey Evgenyevich, Head of the Ceramic Fuel Laboratory

E-mail: AndreySe@mbp.ru

Timoshin Ignat Sergeyeovich, Head of the Central Plant Laboratory, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: msz-lgm@mail.ru