

ТОПЛИВНЫЕ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ВТГР С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ЗАЩИТЫ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЯДЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.В. Артисюк, А.В. Корзунин, Ю.А. Коровин

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



В данной статье показано улучшение свойств защищенности от несанкционированного распространения уранового топлива для ВТГР путем допинга минорных актинидов. Добавляемый изотопный состав соответствует извлекаемому из современных ВВЭР. Добавление 5% минорных актинидов в оксидное топливо из урана с обогащением до 20% по ^{235}U показывает потенциал денатурирования изотопного вектора плутония на самых ранних стадиях его выгорания, таким образом, увеличивая материальный барьер против несанкционированного распространения.

ВВЕДЕНИЕ

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) на протяжении многих лет привлекают внимание разработчиков перспективных топливных циклов. Важным свойством ВТГР для решения проблем ядерной энергетики, связанных с трансмутацией отходов и защитой от несанкционированного распространения, является их способность выдерживать глубокие выгорания. Последняя проблема представляется наиболее серьезной для продвижения ядерной энергетики в развивающиеся страны [1].

Создание внутренне присущих барьеров для несанкционированного распространения может поспособствовать улучшению отношения мирового сообщества к распространению ядерных технологий в мирных целях. Ключевым моментом здесь является выбор топливной композиции, которая могла бы значительно усложнить выделение делящихся нуклидов и их использование для создания ядерного взрывного устройства. Можно выделить два момента:

- топливная композиция на начало кампании соответствует критериям безопасности МАГАТЭ;
- облученное топливо должно характеризоваться существенно денатурированным изотопным составом плутония.

Выбор топливной матрицы обусловлен

- удобной транспортировкой «свежего» топлива до атомной электростанции;
- удобной транспортировкой и хранением отработанного топлива;

© В.В. Артисюк, А.В. Корзунин, Ю.А. Коровин, 2006

- сложной технологией выделения тяжелых металлов из топливной матрицы.

В начале статьи приводится спецификация топливной композиции и описание методов расчета. Далее идут результаты расчетов, связанных с критичностью и эффектами реактивности. Статья заканчивается анализом топливных композиций, улучшенных с точки зрения защиты от несанкционированного распространения.

ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ ЯЧЕЕК

Согласно документам МАГАТЭ, уран с 20-процентным содержанием ^{235}U должен рассматриваться как материал «непрямого использования» [2]. Что касается ограничений с точки зрения гарантий нераспространения, то только плутоний с не менее чем 80-процентным содержанием ^{238}Pu освобожден от них МАГАТЭ [2]. Реалии ядерной энергетики, конечно, далеки от последней цифры. Тем не менее, высокое содержание ^{238}Pu , как и других четных изотопов, признается характеристикой, к которой надо стремиться для защиты от несанкционированного распространения ядерных материалов [3]. Высокая скорость альфа-распада ^{238}Pu требует тщательного выбора топливной матрицы. Традиционные $(\text{U}\text{Pu})\text{O}_2$ формы топливной матрицы не подходят для содержания большого количества ^{238}Pu из-за проблемы свеллинга. Топливные микрочастицы в керамической оболочке, используемые в ВТГР, могут противостоять сильному альфа-свеллингу. Три вида топлива выбраны для дальнейшего исследования:

- UO_2 (обогащенный до 20% по ^{235}U);
- PuO_2 (начальный состав плутония соответствует получаемому из отработанного уранового топлива реакторов ВВЭР);

- смесь UO_2 (обогащенного до 20% по ^{235}U) с минорными актинидами (Np, Am, Cm).

Описание выбранной конструкции топливных элементов засыпной активной зоны ВТГР приведено в табл. 1.

Можно отметить, что геометрические и физические характеристики соответствуют тем, которые выбираются в большинстве нейтронно-физических исследований для ВТГР засыпного типа. Состав топливных композиций приводится в табл. 2.

Таблица 1

Описание топливного элемента

Сферический элемент	
Диаметр сферического элемента	6 см
Диаметр топливной матрицы	5 см
Плотность графита в матрице и оболочке	1.73 г/см ³
Микротвэл	
Радиус топливного ядра	0.025 см
Материалы оболочек ядра (от центра)	(PyC/PyC/SiC/PyC)
Толщина оболочек	0.009/0.004/0.0035/0.004 см
Плотность оболочек (от центра)	1.1/1.9/3.18/1.9 г/см ³

Состав минорных актинидов (МА) типичен для их содержания в отработанном топливе ВВЭР: Np/Am/Cm = 73%/22.5%/4.5%, их изотопный состав:

$^{237}\text{Np}=100\%$;

$^{241}\text{Am}/^{242}\text{Am}/^{243}\text{Am} = 39\% / 1\% / 60\%$;

$^{243}\text{Cm}/^{244}\text{Cm}/^{245}\text{Cm}/^{246}\text{Cm} = 1\% / 92\% / 6.5\% / 0.5\%$.

Исследуется два типа плутониевого топлива. Изотопные составы отличаются, отражая два различных значения выгорания в ВВЭР. Как будет показано в дальнейшем, их сравнение очень важно для определения рабочей области критичности.

Таблица 2

Исследуемые топливные композиции

Композиция	Плотность, г/см ³
UO ₂ обогащенный до 20% ²³⁵ U	10.4
UO ₂ (20% ²³⁵ U) + (MA)O ₂	10.4
PuO ₂ , ²³⁸ Pu/ ²³⁹ Pu/ ²⁴⁰ Pu/ ²⁴¹ Pu/ ²⁴² Pu : 1%/63%/18%/14%/4%	11.4
PuO ₂ , ²³⁸ Pu/ ²³⁹ Pu/ ²⁴⁰ Pu/ ²⁴¹ Pu/ ²⁴² Pu : 2%/55%/26%/10%/7%	11.4

МЕТОД РАСЧЕТА

Расчеты проводились с помощью программного комплекса UNK, разработанного в РНЦ «Курчатовский институт» [4]. Программный комплекс UNK широко используется в Российской Федерации, обеспечивая детальный анализ нейтронного спектра в резонансной области энергий, для ячеечных расчетов реакторов различных типов основанных на методе вероятностей первых столкновений. Комплекс был верифицирован для расчетов ВТГР [5]. В процессе его работы производится расчет поправки Данкова (вероятности нейтрону, покидающему топливный сердечник, испытать следующее взаимодействие в другом топливном сердечнике) для какой-либо заданной геометрии. В состав комплекса входит библиотека ядерных данных, подготовленная на основе ENDF/B-6, в которой энергетическая зависимость сечений разбита на 89 групп или более детально, на более чем 7000. Расчет спектра состоит из двух последовательных ячеечных расчетов. В начале групповые сечения используются в расчете микроячейки. На следующем этапе сечения пространственно «взвешиваются» и используются как входная библиотека для расчетов макроячейки. Затем сечения «взвешиваются» снова и используются для расчета выгорания.

Для количественной оценки безопасности реактора используется изотермический температурный коэффициент реактивности, рассчитываемый по следующей формуле:

$$TC(T) = \left(\frac{1}{k_{inf} \left(T - \frac{\Delta T}{2} \right)} - \frac{1}{k_{inf} \left(T + \frac{\Delta T}{2} \right)} \right) / \Delta T, \quad (1)$$

где T – температура всех материалов ячейки; k_{inf} – коэффициент размножения; ΔT – интервал изменения температуры (далее принимается 300 К).

Важным моментом нейтронно-физического расчета является определение максимального выгорания в конце цикла облучения топлива. В данном исследовании за конец цикла облучения принимается момент времени, когда k_{inf} усредненный по времени выгорания, примет значение 1.1. Это предусматривает то, что k_{inf} в начале облучения и в конце облучения не фиксированы, а зависят от типа топлива.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Потенциал топлива оценивался по глубине выгорания достигаемой в конце цикла облучения. Достижимые выгорания как функция загрузки топлива представлены на рис. 1. Топливо из урана, обогащенного до 20%, обладает резко выраженным максимумом (около 300 ГВт·сут/т) в области загрузок 5–7 г/шар. Напротив, плутониевое топливо (55% ²³⁹Pu) в этом же самом интервале загрузок имеет минимум выгорания в конце цикла облучения. Зависимость выгорания от загрузки очень чувстви-

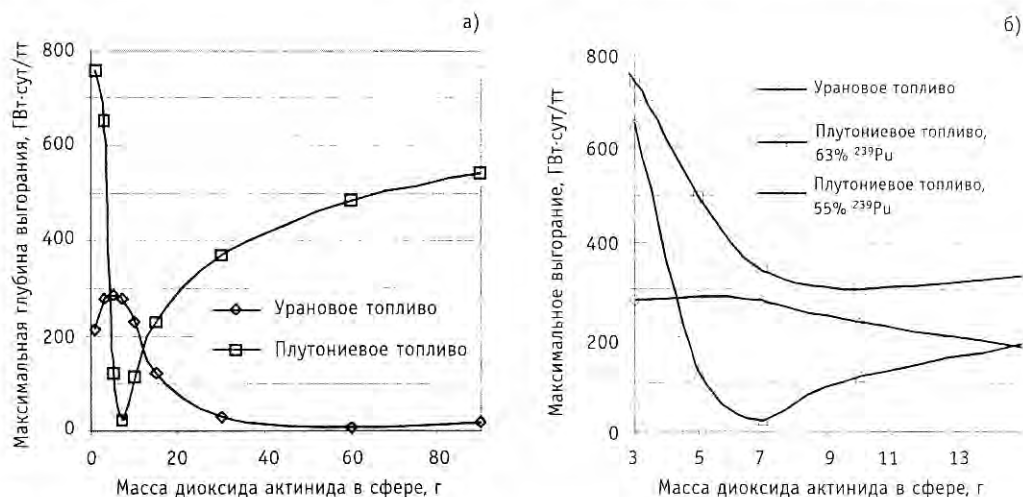


Рис. 1. Максимальное выгорание как функция загрузки топлива (20-процентный обогащенный UO_2 , PuO_2 – 63% ^{239}Pu и 55% ^{239}Pu)

тельна к изотопному вектору плутония (сравните 63% ^{239}Pu и 55% ^{239}Pu , рис. 1, б). Эти характерные случаи были выбраны, чтобы дать качественную иллюстрацию различий между урановым и плутониевым топливом, а также, чтобы очертить область ожидаемых выгораний топлива.

Поскольку улучшение защищенности от несанкционированного распространения напрямую связано с глубиной выгорания топлива, 20-процентное обогащение было выбрано за основу, как обладающее максимально достижимым выгоранием, что подтверждают расчеты, представленные на рис. 2.

Эффект добавления минорных актинидов в выбранное урановое топливо показан на рис. 3. Максимальное выгорание топлива существенно уменьшается с увеличением допинга МА. Выбор 5-процентного допинга для дальнейшего анализа эффектов реактивности определен тем, что начальная критичность для этого случая топлива такая же, как и у плутония (63% ^{239}Pu).

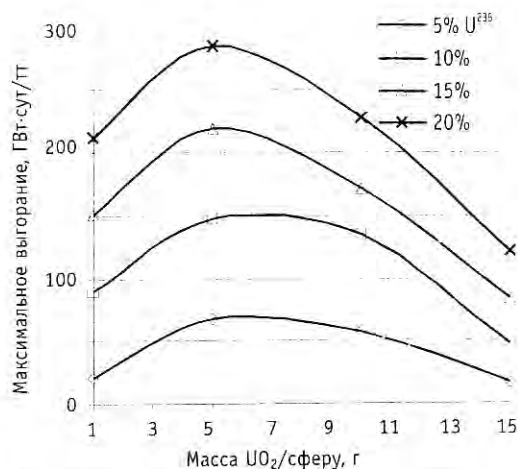


Рис. 2. Влияние обогащения урана на максимальное выгорание для различных топливных загрузок (уран без МА)

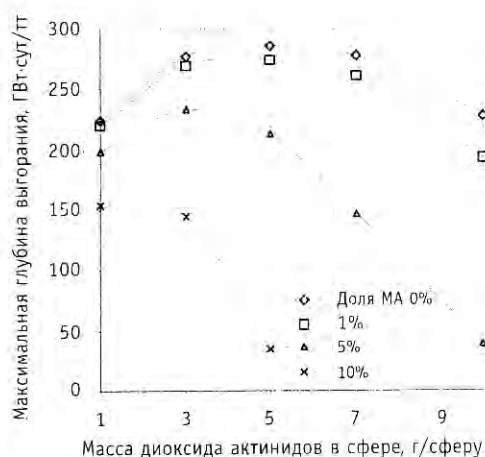


Рис. 3. Влияние допинга МА на максимальное выгорание

Температурный коэффициент реактивности для выбранного за основу уранового топлива и топлива с добавлением МА представлен на рис. 4. В целом допинг МА уменьшает температурный коэффициент для свежего топлива в широком интервале температур. Важно отметить, что с выгоранием температурный коэффициент может быть положительным для некоторого интервала температур. Плутониевое топливо обнаруживает отрицательный температурный коэффициент для широкой области загрузок топлива даже при высоких выгораниях.

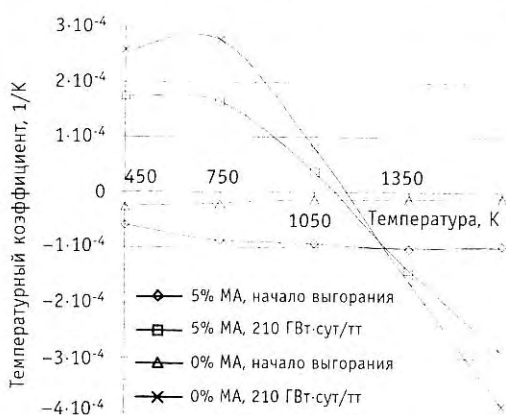


Рис. 4. Температурный коэффициент для выбранных урановых топлив

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНОЙ КОМПОЗИЦИИ

В этом разделе рассматривается влияние изотопного состава плутония на внутренне присущую защищенность от несанкционированного распространения. Наиболее важной при этом является доля нечетных изотопов плутония, которая имеет максимум при малых значениях выгорания (см. рис. 5). Например, при выгорании 10 ГВт-сут/т, их доля превышает 90% для уранового топлива. Этот плутоний считается оружейным. В конце цикла облучения уранового топлива денатурация плутония достигает 20% доли нечетных изотопов. В зависимости от нейтронного спектра (на который влияют загрузка топлива и доля МА) степень денатурации заметно изменяется. Для уранового топлива с 5% МА в топливной матрице 5 г/шар доля нечетных изотопов в самом начале выгорания меньше, чем в отработавшем топливе типичного ВВЭР.

Единственным существенным изменением в концентрациях МА, если сравнивать начало и конец выгорания, является уменьшение концентрации изотопов ^{241}Am и ^{242}Am (см. рис. 6).

Изменение концентраций изотопов плутония в процессе выгорания показано на рис. 7. В течение практически всего времени выгорания ^{238}Pu превалирует над ос-

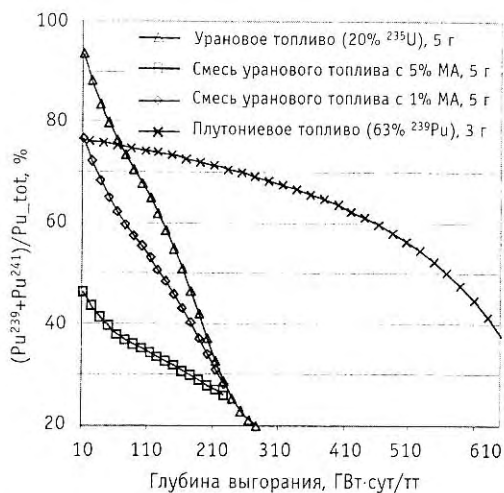


Рис. 5. Доля нечетных изотопов плутония как функция выгорания топлива

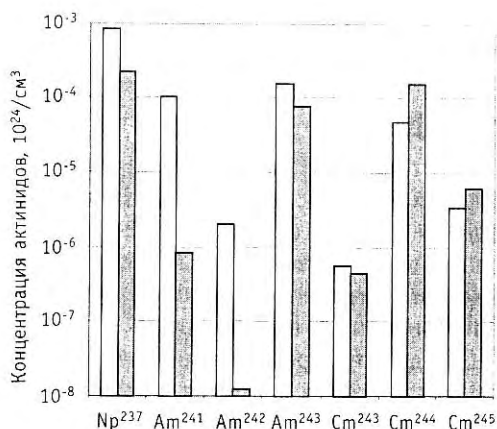


Рис. 6. Изменение концентрации МА в урановом (20% ^{235}U +5% МА) топливе: □ начало цикла выгорания; ■ конец цикла выгорания

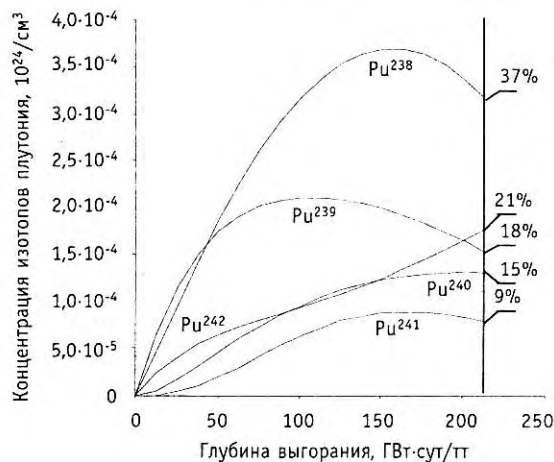


Рис. 7. Концентрация изотопов плутония в урановом (20% ^{235}U +5% МА) топливе в зависимости от выгорания

тальными изотопами плутония, тем самым осуществляя «защиту» топливной композиции.

Остаточное тепловыделение и выход нейтронов при спонтанных делениях от плутония и МА для трех типов топлива приведены в табл. 3. Допинг МА в выбранное урановое топливо, приближает эти материальные барьеры к тем, которые есть у глубоко выгоревшего плутония, это важный эффект допинга МА.

Таблица 3

Остаточное тепловыделение и спонтанное деление в выгоревшем топливе

Топливная композиция	Мощность остаточного тепловыделения (альфа частицы), Вт/кг		Выход нейтронов (спонтанное деление), 1/(кг·с)	
	Плутоний	МА	Плутоний	МА
Урановое топливо (20% ^{235}U , 210 ГВт·сут/т)	350	330	$9.4 \cdot 10^5$	$1.2 \cdot 10^9$
Урановое топливо с МА (5 г, 5% of МА, 210 ГВт·сут/т)	450	870	$1.3 \cdot 10^6$	$3.2 \cdot 10^9$
Плутониевое топливо (63% ^{239}Pu) (3 г, 700 ГВт·сут/т)	700	1100	$1.1 \cdot 10^6$	$4.2 \cdot 10^9$

ВЫВОДЫ

Эта статья посвящена изучению характеристик ВТГР, связанных с увеличением барьеров против несанкционированного распространения плутония. Выбор для исследования уранового топлива с 20-процентным обогащением обусловлен тем, что этот уран рассматривается МАГАТЭ как материал не «прямого использования». Тем не менее, выгорание этого топлива приводит к образованию оружейного плутония при малых значениях выгорания.

Для денатурирования плутония был применен допинг минорных актинидов. В результате состав плутония даже при малых выгораниях (10 ГВт·сут/т) обладает в некоторых случаях значительно меньшей долей нечетных изотопов (^{239}Pu , ^{241}Pu), чем для типичных ВВЭР в конце выгорания. Значения выхода нейтронов и остаточного тепловыделения на единицу массы плутония в отработанном топливе ВТГР приближается к значениям этих характеристик для топлива, отработанного в ВВЭР. На про-

тяжении почти всего времени выгорания содержание ^{238}Pu в изотопном составе плутония является высоким. Таким образом, отработанное урановое топливо с допингом МА обладает значительными барьерами для несанкционированного распространения. На интервале выгорания не произошло значительного накопления МА, напротив концентрации изотопов ^{241}Am и ^{242}Am уменьшились на два порядка. Исследование температурных эффектов реактивности показало, что добавление МА улучшает реактивностные характеристики безопасности.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность В.Ф. Цибульскому и В.Д. Давиденко за полезные консультации.

Литература

1. <http://www.iaea.org/>
2. IAEA, Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy System International Meeting, Como, Italy, October 2002.
3. Saito, et al. Development of Innovative Nuclear Technology to Produce Protected Plutonium with High Proliferation resistance: ANS Winter Meeting, 2004.
4. Белоусов Н.И., Давиденко В.Д., Цибульский В.Ф. Программа UNK для детального расчета спектра нейтронов в ячейке ядерного реактора/Препринт РНЦ «Курчатовский Институт». ИАЭ-6083/4. – М., 1998. – 24 с.
5. Цибульский В.Ф., Давиденко В.Д. Результаты верификационных расчетов нейтронно-физических характеристик высокотемпературных реакторов по программе UNK «Препринт верификация для ВТГР», препринт ИАЭ-6165/4. – М., 2000.

Поступила в редакцию 12.12.2005

УДК 621.039.516.4

Advanced HTGR Fuels To Improve Proliferation Resistance \V.V. Artisyuk, A.V. Korzunin, Yu.A. Korovin; Editorial board of journal «*Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika*» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 7 pages, 7 illustrations, 3 tables. – References, 4 titles.

The present paper advertises doping of minor actinides isotopes as an essential measure to improve proliferation resistance properties of uranium based HTGR fuel. The doping composition corresponds to one discharged from a current PWR. Doping of 5 at.% to 20% enriched uranium oxide fuel shows the potential of denaturing plutonium isotopic vector starting from the very beginning of fuel irradiation thus increasing material barrier against unsanctioned proliferation.

УДК 621.039.526

The Experimental Investigation of the Dose Rate Neaby to the Fast Reactor Spent Fuel \V.I. Boiko, M.E. Silaev, Y.S. Cherepnin, I.V. Shamanin; Editorial board of journal «*Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika*» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 8 pages, 11 illustrations. – References, 4 titles.

The work is done within the framework of the BN-350 fast reactor decommission plan. The main goal was the measurement of the exposure dose rate in the area closed to canisters with the spent fuel. The horizontal and axial dose rate distributions were determined for some characteristic spent fuel canisters. The analysis of measurement results was done.

УДК 621.039.564

The Investigation of the Acoustic Probe System for Analysis of a Level of Water Boiling Coolant \V.I. Melnikov, V.N. Chochlov, V.V. Ivanov, A.V. Dunzev; Editorial board of journal «*Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika*» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 6 pages, 9 illustrations. – References, 2 titles.

The developed acoustic probe system for a level and amount of liquid phase analysis on examination of a vapor space distribution in control boiling water volume has been investigated. The acoustic probe system allows to determinate the state of phase into 8 local volume by probes placed along the height of vessel, and to study dispersing properties of the vapor-liquid water mixture.

The construction of the acoustic device, computer program, laboratory and testing unit experiments are described.

УДК 621.039

Job Training System for the Staffing of an Organization Comprising Nuclear-and-Radiation Dangerous Productions and Facilities \Yu.N. Seleznev; Editorial board of journal «*Izvestia vissikh uchebnikh zavedeniy. Yademaya energetika*» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2006. – 9 pages, 3 illustrations. – References, 15 titles.

This article summarizes author's four-year work on the analysis of the state of the training system for the staffing of Rosatom and the development of some industrial standards regarding the personnel management. The study allowed to define the occupational training system of an organization; to determine its place in the national system of the professional education, in the personnel management system of an organization, in the quality management system of an organization, in the economic safety system of an organization; to determine the role of the job training for the maintenance of necessary skills and competence of the staffing; to suggest uniform organizational-and-methodical approaches to the occupational training implementation for industrial enterprises of Russia.