

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ УРАН- ПЛУТОНИЕВОГО И ТОРИЙ- УРАНОВОГО ЦИКЛОВ ПО КРИТЕРИЮ «НЕРАСПРОСТРАНЕНИЕ»

В.В. Коробейников, Б.Б. Тихомиров

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Рассматриваются подходы к оценке относительной привлекательности материалов на основе урана-233 с точки зрения риска распространения при вовлечении в топливный цикл тория. С помощью подходов, разработанных для плутониевого топлива, проведена оценка привлекательности и показана ее существенная зависимость от содержания урана-232 и времени выдержки выделенного урана-233. Проведено сопоставление полученных результатов с аналогичными характеристиками материалов уран-плутониевого топливного цикла.

Рассматриваются подходы к оценке относительной привлекательности материалов на основе урана-233 с точки зрения риска распространения при вовлечении в топливный цикл тория. С помощью подходов, разработанных для плутониевого топлива, проведена предварительная оценка привлекательности и показана ее существенная зависимость от содержания урана-232 и времени выдержки выделенного урана-233. Проведено сопоставление полученных результатов с аналогичными характеристиками материалов уран-плутониевого топливного цикла.

Ключевые слова: ядерная энергетика, ядерный топливный цикл, нераспространение, привлекательность материалов.

Key words: Nuclear energy, nuclear fuel cycle, nonproliferation, material attractiveness.

ВВЕДЕНИЕ

После довольно длительного периода стагнации в использовании атомной энергии, вызванного известными авариями на АЭС, в последние годы под давлением определенных обстоятельств во многих странах, как развитых, так и развивающихся, обсуждается вопрос о сбалансированном развитии энергопроизводства с использованием атомной энергетики. Экспертами отмечаются несколько причин, наиболее активно влияющих на «ядерный ренессанс»:

- растущие потребности в энергии;
- проблема выделения парниковых газов в атмосферу тепловой энергетикой;
- резко меняющиеся цены на углеводородные энергоносители (в основном, нефть и газ);

© В.В. Коробейников, Б.Б. Тихомиров, 2010

- нестабильность поставок энергоносителей;
- расширение списка стран, заявивших о намерении использовать атомную энергию как стабилизирующий фактор в энергообеспечении.

Все эти факторы необходимо учитывать при разработке энергетической стратегии, как в рамках национальных программ, так и в глобальном масштабе. С точки зрения мирового сообщества (в первую очередь, ядерных держав) наибольшую обеспокоенность вызывает расширение списка стран, планирующих развивать атомную энергетику.

Одной из наиболее острых проблем атомной энергетики является потенциальная опасность использования обращающихся в ее топливном цикле делящихся материалов для создания ядерного оружия. Вполне естественно, что разработка ядерного топливного цикла (ЯТЦ), максимально защищенного от переключения либо хищения ядерных материалов, является одним из важнейших направлений усилий специалистов.

Количественный анализ степени опасности распространения делящихся ядерных материалов – область науки, которая начала интенсивно развиваться сравнительно недавно. Наиболее существенной трудностью при проведении таких исследований является недостаток исходных данных. Это связано как с чувствительным характером отдельной информации, так и со сложностью количественного описания некоторых параметров, необходимых для анализа или математического описания моделей и процессов.

Анализу защищенности уран-плутониевого цикла от распространения посвящено достаточно большое количество исследований зарубежных и отечественных ученых [1–6], однако проблема численной оценки опасности распространения все еще далека от окончательного решения.

Интерес ученых к замкнутому торий-урановому циклу, вновь обострившийся в последние годы, кроме возможности расширения сырьевых ресурсов атомной энергетики вызван, как предполагают, и повышенной степенью защищенности цикла от распространения [7]. Однако оценка устойчивости ториевого топливного цикла к нераспространению является сложной проблемой, требующей обоснованных доказательств [8, 9]. В данной работе авторы дают оценку относительной привлекательности материалов на основе урана-233 к возможному хищению (переключению) с точки зрения опасности распространения и сопоставляют полученные результаты с аналогичными характеристиками для уран-плутониевого цикла.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ НЕРАСПРОСТРАНЕНИЯ. ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ

Одним из важнейших параметров, которые характеризуют опасность распространения, является привлекательность делящегося материала, обращающегося в ЯТЦ, для использования в оружейных целях. Относительная привлекательность является ключевым индикатором возможности применения делящихся материалов, находящихся в ядерном топливном цикле, для создания ядерного оружия. Данный индикатор используется при анализе защищенности от распространения ядерных технологий в международных проектах ИНПРО, GEN-IV и ряде других.

Относительная привлекательность делящихся материалов (ДМ) зависит, в первую очередь, от *ядерно-физических свойств*, внутренне присущих самому делящемуся материалу и определяющих возможность использования его в ядерном взрывном устройстве [10, 4]. Кроме того, на привлекательность влияет ряд внешних условий и факторов, являющихся, по сути, *технологическими характеристиками*

материалов и представляющих собой важные барьеры на пути движения материала из гражданского сектора атомной энергетики к созданию ядерного оружия [11, 12]. В конечном итоге эти барьеры определяют период времени от начала нецелевого использования материала до создания ЯВУ.

Ядерно-физические свойства и технологические характеристики могут быть выражены в числах, что позволяет сформулировать количественные критерии, необходимые для оценки привлекательности. Эти критерии, дополненные требованиями по учету, контролю и физической защите, дают возможность последовательно и полно характеризовать внешние барьеры, стоящие на пути распространения ядерных материалов.

В топливных композициях на основе урана-233 обычно присутствует и уран-232 в самых различных концентрациях [13], причем высокое содержание урана-232 сильно затрудняет технологическое обращение с топливом. В рамках оценки привлекательности материалов на основе урана-233 были проведены исследования для четырех вариантов концентраций урана-232: 0,10,100 и 1000 ppm. Заметим, что примесь урана-232 сама по себе не создает радиационной проблемы. Ее создают дочерние продукты распада (в особенности Bi-212 и Tl-208 с «жестким» гамма-излучением), которые относительно быстро накапливаются при распаде урана-232 или тория-228. В связи с этим оценка привлекательности проводилась для разных времен выдержки выделенного урана-233 с примесью урана-232.

Ядерно-физические свойства делящихся материалов в проблеме оценки опасности распространения

Наиболее важными для оценки привлекательности ДМ являются следующие параметры:

- критмасса;
- удельное энерговыделение;
- собственный нейтронный фон.

Факторы привлекательности определялись по каждому из перечисленных параметров. Итоговое значение привлекательности находилось как произведение факторов, относящихся к каждому параметру.

Критмасса характеризует степень возможности использования делящегося материала для создания взрывного устройства. Значение критмассы определяет массо-габаритные характеристики такого устройства. Для однозначности в оценках использовались значения критмассы для шара без отражателя. Ясно, что «опасность» делящегося материала в зависимости от значения критмассы очень сильно различается. В расчетах предполагалось, что количество ДМ, необходимое для создания ЯВУ, прямо пропорционально его критмассе.

В таблице 1 приведены рассчитанные методом Монте-Карло значения критических масс основных изотопов, входящих в состав оружейного (ОП) и энергетического (ЭП) плутония, а также урана-233 и урана-235.

Для количественной оценки степени опасности делящихся материалов [10] диапазон возможных критмасс ДМ был разбит на четыре класса: $M_{CR} < 50$ кг; от 50 до 100 кг; от 100 до 800 кг; более

Таблица 1

Критические массы изотопов

Изотоп	Критическая масса, кг
Pu-238	10
Pu-239	10
Pu-240	30
Pu-241	13
Pu-242	92
U-233	16
U-235	52

800 кг. При численном анализе наивысшая привлекательность, оцениваемая единицей, присваивалась материалам, находящимся по критической массе в первом классе опасности. Исходя из такой классификации по критической массе энергетический плутоний и уран-233 имеют уровень привлекательности, равный единице.

Энерговыделение ДМ определяет практическую возможность изготовления ЯВУ и обеспечение его надежного срабатывания. Физическим процессом, лимитирующим величину допустимого тепловыделения, является термическое разложение химических взрывчатых веществ (ВВ), которые применяются в ЯВУ. Как отмечается в различных работах, при определенной температуре ВВ теряет способность к детонации и взрыву. Разработка ЯВУ в таких условиях становится бессмысленной.

В таблице 2 приведены значения энерговыделения от различных изотопов плутония с целью определения их вкладов в облученном топливе.

Аналогичные данные для урана-233 с разным содержанием урана-232, пересчитанные на килограмм массы, представлены в табл. 3.

Энерговыделение различных изотопов плутония

Таблица 2

Изотоп	Энерговыделение, Вт/кг
Pu-238	560
Pu-239	1,9
Pu-240	6,9
Pu-241	4,2
Pu-242	0,11

Тепловыделение (Вт/кг) для урана-233 с разными количествами урана-232

Таблица 3

Содержание U-232, ppm	Время выдержки свежего топлива после изготовления				
	0	1 месяц	1 год	5 лет	10 лет
0	0,282	0,282	0,282	0,283	0,284
10	0,289	0,290	0,303	0,328	0,332
100	0,351	0,362	0,491	0,731	0,769
1000	0,969	1,081	2,369	4,744	5,156

В работе [10] показано, что наибольшую опасность имеют делящиеся материалы с тепловыделением в массе заряда до 30 Вт, а заряды с тепловыделением >300 Вт практически безопасны по критерию нераспространения. Для количественного анализа по характеристике «энерговыделение» была построена линейная функция привлекательности ДМ. За единицу принималось тепловыделение в массе заряда (предполагалась равной половине критмассы для голой сферы) из оружейного плутония.

В таблице 4 приводятся рассчитанные значения привлекательности энергетического плутония в зависимости от глубины выгорания топлива. Выдержка один год после облучения.

Значения привлекательности энергетического плутония в разделе «энерговыделение» в зависимости от глубины выгорания

Таблица 4

ГВт·сут/т	33	50	60	72	100
P_a (ЭП)	0.76	0.54	0.41	0.23	0.1

Таблица 5

**Значения привлекательности урана-233
в разделе «энерговыведение» в зависимости от времени
выдержки**

Содержание U-232, ppm	Время выдержки свежего топлива после изготовления				
	0	1 месяц	1 год	5 лет	10 лет
1000	1.0	1.0	0.98	0.91	0.90

В таблице 5 приведены значения фактора привлекательности урана-233 в зависимости от времени выдержки топлива при содержании урана-232, равном 1000 ppm. Отметим при этом, что при содержании урана-232 в диапазоне 0–100 ppm для любого времени выдержки топлива фактор привлекательности в разделе «энерговыведение» оказался равным единице.

Собственный нейтронный фон определяет уровень требований к технологии изготовления ЯВУ. При низком значении нейтронного фона, как в случае оружейного плутония, возможно создание современного или почти современного ЯО. Но для изготовления такого ЯВУ требуется высокий уровень технологии. При большом значении нейтронного фона высокие показатели ЯВУ, как в современном ядерном оружии, недостижимы, но требования к технологии изготовления могут быть существенно снижены.

В соответствии с работой [10] анализировался нейтронный фон ДМ в диапазоне от $N > 6.6 \cdot 10^6$ н/с-критмасса (высокая степень опасности) до $N < 2.2 \cdot 10^5$ н/с-критмасса (безопасность). В таблице 6 приведены значения собственного нейтронного фона для энергетического Pu при разных глубинах выгорания и разных временах выдержки.

Таблица 6

**Значения собственного нейтронного фона
для энергетического Pu при разных глубинах выгорания
и временах выдержки, нейтрон/с-критмасса [4]**

Время выдержки	Глубина выгорания, ГВт дн/т				
	33	50	60	72	100
1 год	5.35E+06	8.07E+06	9.98E+06	12.4E+06	18.1E+06
100 лет	4.36E+06	6.21E+06	7.36E+06	8.89E+06	12.6E+06
300 лет	3.11E+06	3.71E+06	4.09E+06	4.58E+06	5.73E+06

В таблице 7 приведены значения нейтронного фона для композиций на основе урана-233 с различным количеством урана-232 и разными временами выдержки топлива. Из результатов следует, что для изготовления ЯВУ из таких композиций вне зависимости от времени выдержки и содержания урана-232 также потребуются наличие внешнего источника нейтронов подобно оружейному плутонию.

Исследования показали, что величина фактора привлекательности в разделе «собственный нейтронный фон» зависит от того, кто будет «пролифератором» – государство или террористическая группа. Применительно к последней, например, энергетический плутоний при любой глубине выгорания по указанной выше классификации попадает в первый класс опасности, не требующий прецизионных технологий и особо привлекательный для возможного пролифератора. Для урана-233 фактор привлекательности следовало бы уменьшить из-за необходимости использования прецизионных технологий. Предполагается, что использование прецизионных технологий будет препятствием на пути террористических групп.

Таблица 7

Мощность источников нейтронного излучения для композиций на основе урана-233, нейтрон/с-критмасса

Содержание U-232, ppm	Время выдержки свежего топлива после изготовления				
	0	1 месяц	1 год	5 лет	10 лет
0	7,92E+04	7,92E+04	7,92E+04	7,94E+04	7,94E+04
10	8,12E+04	8,18E+04	8,4E+04	8,4E+04	8,4E+04
100	1,02E+05	1,02E+05	1,12E+05	1,24E+05	1,26E+05
1000	3,3E+05	3,38E+05	4,06E+05	5,3E+05	5,43E+05

Тем не менее, мы не стали преуменьшать «изошренность злого ума» и предположили, что хорошо организованные группы террористов смогут, имея соответствующие финансовые возможности, овладеть сложной технологией. Поэтому значение фактора привлекательности в этом разделе для урана-233 мы приняли равным единице.

ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ УРАНА-233 И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЛУТОНИЯ С УЧЕТОМ ТОЛЬКО ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

Приведены полученные из отдельных составляющих значения общей привлекательности ДМ с учетом только ядерно-физических свойств. Для энергетического плутония значение привлекательности $P_{яф} = 0,73$. В таблице 8 представлены аналогичные данные для урана-233.

Таблица 8

Значения общей привлекательности урана-233 с учетом только ядерно-физических свойств

Содержание U-232, ppm	Время выдержки свежего топлива после изготовления	
	До одного года	От одного года до десяти лет
0	0.99	0.99
10	0.99	0.99
100	0.99	0.99
1000	0.99	0.89

Технологические характеристики делящихся материалов

На основании работ [11, 12] из многообразия технологических характеристик ядерных материалов были выделены наиболее существенные:

- физическая форма материала;
- радиоактивность материала;
- длительность конверсии материала.

На примере энергетического плутония оценим относительную привлекательность по каждой из приведенных характеристик. Результирующее значение привлекательности найдем как произведение полученных величин.

Физическая форма материала

Этот критерий (фактор плотности) определяется соотношением между количеством материала в некоторой физической форме и массой делящегося металла, которую необходимо выделить из этого материала для изготовления взрывного

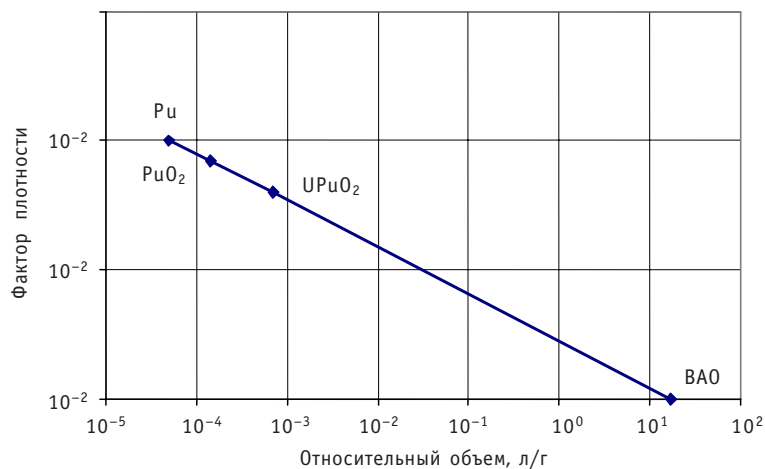


Рис. 1. Зависимость фактора плотности от относительного объема для плутоний-содержащих материалов

устройства. Для нахождения критерия привлекательности диоксида энергетического плутония мы использовали зависимость фактора плотности плутонийсодержащих материалов от их относительного объема [11] (рис. 1). В этой зависимости верхнее значение фактора плотности, равное единице, соответствует оружейному плутонию в α -фазе с удельным объемом $5,1 \cdot 10^{-5}$ л/г, а нижнее, близкое к нулю – высокоактивным отходам (удельный объем составляет ~ 20 л/г плутония).

Оценивая удельное содержание плутония в диоксиде PuO₂ в зависимости от плотности последнего, мы получили, что для наших условий наиболее вероятное значение фактора плотности составляет 0,76 с возможным разбросом в диапазоне 0,50–0,80. Для материалов на основе урана-233 было принято значение фактора плотности, равное также 0,76.

Радиационные характеристики материала

В технологическом плане радиационный фактор (РФ) представляет собой дополнительную преграду, затрудняющую процесс перевода переключенного или похищенного материала в компоненты ядерного боезаряда. Для количественного сравнения разных материалов по фактору радиационной опасности использовался принцип достижения порога трудоспособности. Он означает время τ , в течение которого при работе с радиоактивным материалом, имеющим мощность дозы Г, наступает потеря трудоспособности, т.е. появляются первые признаки лучевой болезни.

Мы предполагали, что радиационный фактор является некоторой функцией времени работы с радиоактивным материалом. При этом верхнее значение фактора, равное единице, было приписано металлическому оружейному плутонию. В качестве нижнего значения радиационного фактора использовалась величина РФ = 0,1, соответствующая достижению порога трудоспособности [14].

При построении функции привлекательности оружейных делящихся материалов по радиационному критерию было введено пороговое значение дозы, до которого фактор привлекательности равен единице, а затем он уменьшается в соответствии с описанным выше принципом наступления потери трудоспособности. В качестве порогового значения принята мощность дозы, при которой, согласно МКРЗ, работа с делящимися материалами не допускается ни при каких условиях.

На основании вышеизложенного привлекательность диоксида энергетического плутония по радиационному критерию достаточно высока и не отличается от

Таблица 9

Значения радиационного фактора для композиций на основе урана-233 с разным содержанием урана-232 и временем выдержки

Содержание U-232, ppm	Время выдержки свежего топлива после изготовления				
	0	1 месяц	1 год	5 лет	10 лет
0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
10	1.0	1.0	0.76	0.55	0.53
100	1.0	0.83	0.35	0.25	0.24
1000	1.0	0.38	0.16	0.12	0.11

таковой для металлического оружейного плутония. Для урана-233 результаты расчета радиационного фактора приведены в табл. 9.

Из результатов следует, что при концентрациях урана-232 от 0 до 10 ppm значение привлекательности по радиационному фактору достаточно велико. Что касается концентраций от 100 до 1000 ppm, то значение фактора привлекательности становится довольно низким из-за высоких дозовых нагрузок.

Длительность конверсии материала

На рисунке 2 представлена зависимость временного фактора, характеризующего готовность материала к переключению, от продолжительности времени, которое потребовалось бы для переработки данного материала в форму, пригодную для изготовления бомбы группой специально подготовленных квалифицированных специалистов, располагающих необходимым оборудованием.

Согласно данным МАГАТЭ [15], время конверсии необлученного плутония в металлической форме в ядерное взрывное устройство составляет 7–10 суток. Этому периоду на графике рис. 2 соответствует фактор времени, равный единице. Для диоксида плутония фактор времени по графику оценивается величиной ~ 0,9 в связи с увеличением длительности конверсии. Примем это же значение фактора времени и для материалов на основе урана-233.

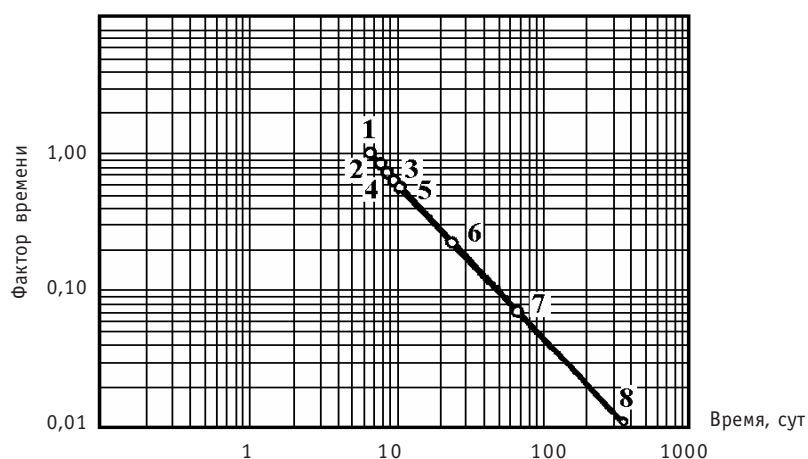


Рис. 2. Зависимость временного фактора от продолжительности периода времени, необходимого для переработки материала с целью изготовления ядерного взрывного устройства: 1 – металлический Pu; 2 – PuO_2 , PuF_4 ; 3 – раствор $Pu(NO_3)_4$; 4 – раствор $(U, Pu)(NO_3)_x$; 5 – $(U, Pu)O_x$; 6 – раствор после растворения топлива, ВАО; 7 – топливная сборка; 8 – отвержденные ВАО, низкообогащенный уран

ПОЛНАЯ ОЦЕНКА ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ УРАНА-233 И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПЛУТОНИЯ ПО ОТНОШЕНИЮ К ОРУЖЕЙНОМУ ПЛУТОНИЮ

В таблице 10 собраны значения относительной привлекательности энергетического плутония по четырем факторам, учитывающим ядерно-физические и технологические характеристики материала. Итоговое значение привлекательности энергетического плутония по отношению к оружейному плутонию составило 0,50.

Таблица 10

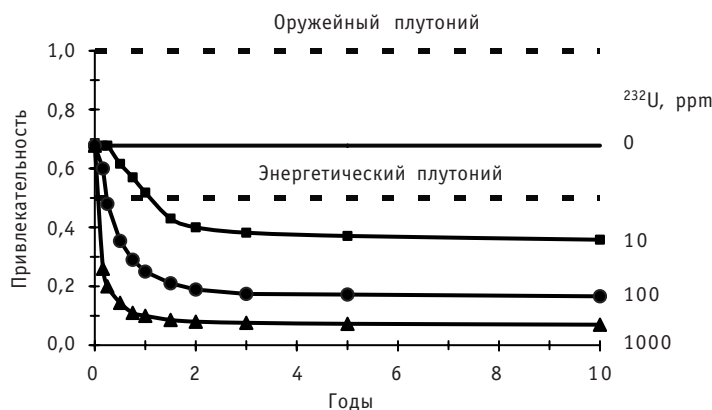
Совокупная оценка привлекательности энергетического плутония

Критерий	Оружейный плутоний	Энергетический плутоний (60% ^{239}Pu)
Качество плутония как оружейного материала	1	0,73
Фактор плотности материала, содержащего плутоний	1	0,76
Радиационный фактор материала, содержащего плутоний	1	1,00
Временной фактор перевода плутоний-содержащего материала в компоненты боезаряда	1	0,90
Итоговый результат	1	0,50

На рисунке 3 приведена зависимость относительной привлекательности материала на основе урана-233 с разным содержанием урана-232 и временем выдержки после выделения. Для сравнения на этом же графике приведены относительные привлекательности оружейного и энергетического плутония. Было принято, что на рассматриваемом промежутке времени их значения не изменяются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка относительной привлекательности с учетом только ядерно-физических свойств показала, что уран-233 по сравнению с энергетическим плутонием имеет существенно более высокую привлекательность для всех рассмотренных концентраций и времен выдержки и практически идентичен оружейному плутонию при концентрациях урана-232 от 0 до 100 ppm. Значение привлекательности по радиационному фактору при низких концентрациях урана-232 от 0 до 10 ppm. доволь-

Рис. 3. Изменение относительной привлекательности ^{233}U от времени при различном содержании ^{232}U

но велико. Что касается концентраций выше 100 ppm., то значение фактора привлекательности становится очень низким из-за высоких дозовых нагрузок. Таким образом, результат оценки полной (с учетом всех факторов) привлекательности делящихся материалов на основе урана-233 практически полностью определяется радиационным фактором.

Поскольку выход на топливный цикл с воспроизводством U-233 требует предварительного накопления урана-233, переход на уран-ториевый цикл займет значительное время, в течение которого в топливном цикле будет находиться и плутоний, поэтому проблема нераспространения материалов на основе плутония не снимется еще весьма значительное время.

Литература

1. *Krakowski R.A.* Review of Approaches for Quantitative Assessment of the Risks of and Resistance to Nuclear Proliferation from the Civilian Nuclear Fuel Cycle. – Los Alamos National Laboratory, LA-UR-01-169 (January 15, 2000).
2. *Krakowski R.A., Bathke C.G.* Reduction of Worldwide plutonium inventories Using Conventional Reactors and Advance Fuels: A Systems Study. LA-UR-97-2809, 1997.
3. *Dyer J., Edmunds T., Butler J., Jia J.* Evaluation of Alternatives for the Disposition of Surplus Weapons-usable Plutonium. Submitted by the Amarillo National Resource center for plutonium, April 4, 1997
4. *Beller D.E., Krakowski R.E.* Burnup Dependence of Proliferation Attributes of Plutonium from Spent LWR Fuel. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-99-751, 1999.
5. *Пушкин Г.М., Гераскин Н.И., Муругов В.М. и др.* Ядерное нераспространение. – М.: МИФИ, 2006. 304 с.
6. *Коробейников В.В., Тихомиров Б.Б., Чебесков А.Н.* Исследования риска распространения в циклах с расширенным воспроизводством плутония // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 4. – С. 62-71.
7. Оценка возможности повышения уровня внутренней защищенности U-содержащих материалов от угрозы несанкционированного дообогащения / *В.Б. Глебов, В.А. Ансэ, В.А. Юферова, А.Н. Шмелев* / Международное совещание по проблемам нераспространения ядерных материалов: Сб. тез. – Обнинск: НОУ «ЦИПК», 2008. – С. 35.
8. *Коробейников В.В., Тихомиров Б.Б.* Исследования риска распространения делящихся материалов в уран-ториевом цикле / Материалы XIII Семинара по проблемам физики реакторов Волга-2004. – С. 83.
9. *Коробейников В.В., Тихомиров Б.Б., Семенов В.П.* Сравнительный анализ уран-плутониевого и торий-уранового циклов по критерию нераспространения / Препринт ФЭИ-3185. – Обнинск, 2010.
10. *Ptitsyna N.V., Chitaikin V.I., Shibarshov L.I.* Plutonium and its Chemical Compounds: the Problem of Nuclear Weapon Non-proliferation. Nuclear Explosive Device Creation; Radiological Consequences of Nuclear Accident. – Proceeding of the NATO Advanced Research Workshop on Managing the Plutonium Surplus: Applications and Technical Options. London UK, January 24-25, 1994. Kluwer Academic Publishers, p.157-170.
11. Справочник по ядерной энерготехнологии: Пер. с англ. / *Ф. Ран, А. Адамантиадес, Дж. Кентон, Ч. Браун*; под ред. *В.А. Легасова*. – М.: Энергоатомиздат. 1989.
12. Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, Reactor – Related Options. National Academy of Sciences, Committee on International Security and Arms Control. Washington, D.C.: National Academy Press, 1995.
13. *Муругов В.М., Троянов М.Ф., Шмелев А.Н.* Использование тория в ядерных реакторах. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
14. Guide for Implementation of DOE 56633.3A «Control and Accountability of Nuclear Materials». U.S. DOE, Office of Security Affairs. Office of Safeguards & Security. February 1993.
15. IAEA Safeguards Glossary. IAEA/SG/INF/1 (Rev.1), International Atomic Energy Agency, Vienna, 1987.

Поступила в редакцию 27.08.2010

УДК 621.039.51

Enhancement TRU Proliferation Resistans through Gamma Buildup from Rare Earths \A.I. Dyachenko, V.V. Artisyuk, S.N. Filimonov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 3 tables, 5 illustrations. – References, 15 titles.

his paper deals with analysis of radiation barriers to reduce the attractiveness of transuranic materials from the view of nonproliferation. The barrier is formed by doping of rare earth gamma emitters. The selection of appropriate rare earth nuclides was the main focus of the present paper. The quantitative requirements for the presence of rare earth nuclide impurities to form barriers formulated, taking into account the existing criteria for evaluating security.

УДК 621.039.543.6

Comparative Analysis of Fission Materials for Uranium-Plutonium and Thorium-Uranium Cycles on Nonproliferation Criteria \V.V. Korobeynikov, B.B. Tikhomirov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 10 tables, 3 illustrations. – References, 15 titles.

The approaches to estimation of relative attractiveness of materials on the base of uranium-233 in thorium cycle with proliferation risk point of view are studied. Preliminary assessment of relative attractiveness for uranium-233 on the base approach developed for plutonium fuel was executed. It was shown that attractiveness depends from uranium-232 content and time of cooling very strong. Findings were compared with analogue characters of materials using in uranium-plutonium fuel cycle.

УДК 621.039.1

Prospectives of Nuclear Industry Development in Siberia. Ecology, Safety, Economics \V.I. Boyko, F.P. Koshelev, G.M. Pshakin, O.V. Selivanikova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 3 tables. – References, 24 titles.

Rosatom projects for Krasnoyarsk, Tomsk and Irkutsk regions are briefly analyzed. Special attention is paid to construction of Seversk NPP in Tomsk region. Necessity and principles for construction of NPP are argument. Estimations of severe accident consequences alternative (using coal, natural gas or other type of fuel) electricity production plant same capacity (2300 MWe) were done.

УДК 621.039.534.63

Modelling of Mass Transfer of Corrosion Products in the Circuit of NPP with Sodium Coolant \V.V. Alexeev, A.S. Kondratiev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 10 pages, 2 tables, 7 illustrations. – References, 9 titles.

The article describes the process model of mass transfer of impurities according to their chemical interactions in the system sodium – structural material – impurity. The data for the primary circuit of reactor BN-600, both for the nominal mode, and for the cases of a hypothetical accident with increasing facility parameters. The data obtained can be used to perform the safety analysis of facility.

УДК 621.039.58:536.423

Calculation and Experimental Study of Noncondensable Gases Influence on the Operation of VVER Steam Generator Model in Condensation Mode in the Event of the Beyond Design Basis Accident \A.A. Zaytsev, D.S. Kalyakin, A.A. Lukyanov, A.V. Morozov, T.V. Popova, O.V. Remizov, O.V. Supotnitskaya, A.A. Tsyganok; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 11 pages, 9 illustrations. – References, 5 titles.

The results of calculation and experimental study of the influence of noncondensable gases on the operation of VVER steam generator model in condensation mode are presented. The experiments have been performed at the GE2M-PG large-scale facility under conditions of natural circulation of the first and second circuits for the vapor pressure of the first circuit 0.36 – 0.38 MPa. Numerical simulation of the experiments was conducted using the computer code KUPOL-M. As a result of work the experimentally determined the effect of noncondensable gases on the condensation power of the steam generator model and found that the computer code KUPOL-M satisfactorily simulates the process under investigation.