

ОГРАНИЧЕННЫЕ ВЫГОДЫ ПО ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ РАСПРОСТРАНЕНИЮ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТАННЫХ НЕОТДЕЛЕННЫХ АКТИНИДОВ И ЛАНТАНИДОВ ОТ ПЕРЕРАБОТАННОГО ТОПЛИВА ЛЕГКОВОДНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Юнгамин Канг и Фрэнк фон Хиппель

Хранение плутония от легководного реактора (ЛВР) в смеси с другими трансураними и лантанидами - продуктами деления (за исключением европия-154) не делает его более радиационно защищенным и не затрудняет его использование при создании ядерного оружия. Рассчитаны дозы от гамма-лучей и нейтронов на расстоянии один метр, выделение тепла и интенсивность спонтанного излучения нейтронов от металлических шариков весом в 1 кг из плутония оружейного качества, плутония реакторного качества и полной смеси трансуранов, содержащихся в отработанном топливе ЛВР с большим уровнем выгорания, с учетом продуктов деления в виде лантанидов или без их учета. Полная интенсивность дозы от одних трансуранов (без учета лантанидов) на три с лишним порядка величины меньше порога МАГАТЭ для радиационной самозащиты – один Зв/час (100 рентген/час) на расстоянии 1 м. Учет любого из двух лантанидов из числа продуктов деления – церия-144 или европия-154, может увеличить дозу выше упомянутого порога радиационной самозащиты. Но период полураспада церия-144 составляет всего 0.8 года, и он уже распался в любом отработанном топливе ЛВР за исключением самого свежего. Европий-154 обладает периодом полураспада девять лет, но он не уходит вместе с трансураними в цикле пиропереработки топлива, который разработан для интегрированного реактора на быстрых нейтронах.

Статья получена 3 января 2005 г. и принята к публикации 10 апреля 2005 г.

Ю. Канг работает в Сеуле, Республика Корея. Ф. Хиппель участвует в Программе по науке и всеобщей безопасности в Принстонском университете, Принстон, Нью Джерси, США.

Авторы благодарны Стиву Феттеру за очень полезный просмотр двух предварительных вариантов статьи, а также Эдвину Лайману, которые первым указал, что европий-154 не следует за трансураними при пиропереработке.

Почтовый адрес Ф. Хиппеля: 221 Nassau St, 2nd Floor. Princeton University. Princeton, NJ 08542-4601. E-mail: fvhippel@princeton.edu.

Почтовый адрес Ю. Канга: 212-203 Shinbanpo 4 Cha Apt., Jamwondong, Seocho-gu, Seoul, Republic of Korea. E-mail: jmkang55@hotmail.com

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

После индийского ядерного испытания в 1974 г., где был использован плутоний, выделенный по рассекреченной технологии с помощью обучения и оборудования, предоставленных Соединенными Штатами¹, администрации Форда и Картера решили противодействовать дальнейшему экспорту технологии переработки ядерного топлива в страны, опасные с точки зрения ядерного распространения. Было также решено, что в ближайшем будущем выделение плутония не потребует программы гражданских ядерных электростанций, и США могут поэтому хранить отработанное топливо от энергетических реакторов.

В 1993 г. администрация Клинтона переформулировала политику противодействия переработке следующим образом: «США не поощряют гражданское использование плутония и в соответствии с этим не будут сами заниматься переработкой плутония.»²

¹ "U.S. training, and an Indian A-blast cited" by Don Oberdorfer, *Washington Post*, July 19, 1976, A1; and *Export Reorganization Act of 1976*, Hearings before the U.S. Senate Committee on Government Operations, Jan-March, 1976.

² «Нераспространение и политика экспертного контроля», документ Белого Дома, 27 сентября 1993 г. В другой выдержке заявляется, что «США будут стремиться к устранению там, где это возможно, накопления запасов высокообогащенного урана или плутония и обеспечат

Администрация Буша слегка смягчила политику такого отношения к переработке. В президентской директиве 2002 г. по национальной безопасности (в части, касающейся стратегии борьбы с оружием массового уничтожения) говорится:

«США будут продолжать противиться накоплению выделенного плутония по всему миру и стремиться к минимизации использования высокообогащенного урана. В соответствии с национальной энергетической политикой США будут действовать в сотрудничестве с международными партнерами по разработке технологий переработки и обращения с топливом, которые чище, более эффективны, имеют меньше отходов и больше защищены от распространения.»³.

В соответствии с этим заявлением Управление ядерной энергии Министерства энергетики (УЯЭ-МЭ) выдвинуло в 2003 г. инициативу продвинутого топливного цикла (ИПТЦ), которую тогдашний министр энергетики Спенсер Эбрахэмс охарактеризовал как «исследование, способное оптимизировать использование первого хранилища (Юкка Маунтин) и, возможно, снизить потребность в будущих хранилищах.»⁴.

Озабоченность вместимостью американских хранилищ, как проработано в докладе УЯЭ-МЭ конгрессу по поводу ИПТЦ (2003 г.), состоит в том, что:

«установленный по закону предел запланированного подземного хранилища (Юкка Маунтин) – 63000 тонн гражданского отработанного ядерного топлива, будет достигнут в 2015 г. ... В результате, объем отработанного топлива, произведенного ядерными энергетическими предприятиями, может стать длительной проблемой для возможности строить новые ядерные электростанции, которые предусмотрены национальной энергетической политикой»⁵.

По этой причине УЯЭ-МЭ разрабатывает стратегию переработки американского отработанного топлива, когда поначалу из растворенного отработанного топлива будет извлечен уран, а затем будут обрабатываться « смеси плутония и отобранных актинидов для подготовки топлива, противодействующего распространению.... В случае успешного осуществления такая технология обращения с топливом сможет значительно уменьшить затраты на первое хранилище и потенциально снять техническое требование на второе»⁶.

Тепло от радиоактивных распадов накапливается в грунте между туннелями, куда помещаются отходы, и после прекращения принудительной вентиляции ограничивает вместимость хранилища, расположенного выше уровня подземных вод. Если удалить долгоживущие трансураны, полный выход тепловой энергии от радиоактивных расходов за первые несколько тысяч лет значительно уменьшится. Для хранилища Юкка Маунтин было оценено, что удаление трансуранов позволит захоронить оставшиеся радиоактивные отходы от такого количества отработанного топлива, которое примерно в пять раз больше того, что можно

наивысшие стандарты надежности, безопасности и международной отчетности в тех местах, где такие материалы уже существуют».

³ *National Strategy to Combat Weapons of Mass Destruction*, National Security Presidential Directive 17, Dec. 2002, declassified portions available at <http://www.fas.org/irp/offdocs/nspd/nspd-17.html>.

⁴ Он добавил: «Эти технологии предлагают выгоды в виде повышения национальной безопасности путем сокращения запасов плутония, созданных для коммерческих целей, и повышения энергетической независимости за счет возвращения энергии, содержащейся в отработанном ядерном топливе.» Заявление министра энергетики Спенсера Эбрахэмса по вопросам финансирования на 2004 ф.г. в подкомитете по распределению энергии и водных ресурсов комитета палаты представителей по финансированию, 5 марта 2003 г.

⁵ *Advanced Fuel Cycle Initiative[AFCI]: The Future Path for Advanced Spent Fuel Treatment and Transmutation Research* (Department of Energy, Office of Nuclear Energy, Science and Technology, Report to Congress, 2003), p. 1-3. *The National Energy Policy* is the report of Vice President Cheney's 2001 Energy Task force.

⁶ Там же, стр. II-4.

было бы захоронить прямо без дополнительной переработки⁷.

МЭ оказалось чувствительным (по крайней мере, риторически) к проблеме, которая избила США от первоочередной переработки, и настаивает, что «UREX (реакции по извлечению урана)... может уменьшить риск распространения путем избежания выделения плутония из любых радиоактивных веществ, тем самым делая его использование для военных приложений невозможным»⁸.

Впрочем, текущая версия UREX (“UREX+”), которая еще разрабатывается, оставит плутоний смешанным только со сравнительно небольшим количеством нептуния-237, который присутствует в отработанном топливе⁹. Нептуний-237 не сделает смесь более защитимой на основе собственной радиоактивности, поскольку он обладает более слабой радиоактивностью по сравнению с плутонием и обладает примерно такой же критической массой, как и уран оружейного качества¹⁰.

Другая «препятствующая распространению» технология переработки, привлекавшая благосклонное внимание администрации Буша называется «пиротехнической переработкой» - это электрохимический процесс, который был разработан в связи с предложением Аргоннской национальной лаборатории по созданию интегрального реактора на быстрых нейтронах (ИРБН). Каждая группа таких реакторов будет иметь свои небольшие интегрированные установки по переработке и повторному изготовлению топлива. Рабочая группа по энергетике при вице-президенте Чейни подтвердила в 2001 г. такую технологию переработки в своем докладе по национальной энергетической политике:

«Соединенные Штаты должны пересмотреть свою политику, чтобы разрешить проведение НИОКР и развертывание методов улучшения топлива (например, пиротехническую переработку), которые уменьшают потоки отходов и повышают противодействие распространению»¹¹.

В этой статье мы проведем оценку противодействия распространению, которое бы добавилось, если плутоний не отделять от других трансурановых изотопов из отработанного топлива ЛВР, а затем если (как и при пиротехнической переработке) не отделять трансура-

⁷ “Spent nuclear fuel separation and transmutation criteria for benefit to a geological repository”, R. A. Wigeland, T. H. Bauer, T. H. Fanning, and E. E. Morris, Argonne National Laboratory, *Proceedings of Waste Management'04 Conference*, Tucson, AZ, Feb. 29 - March 4, 2004. Предполагаются два предельных случая по теплу. Первый, вызывающий стремление избавиться от трансуранов, связан с требованием поддерживать температуру ниже 96 °С на половине расстояния между туннелями (как считается, они отделены один от другого на 81 м). Это нужно чтобы «любая вода, стекающая по горе вниз, имела возможность проходить через хранилище в любое время, препятствуя удержанию выше уровня хранилища большого объема воды, который мог бы затопить хранилище, когда оно остынет.» После удаления трансуранов ограничения вызовет второй предел - необходимость сохранять породу в непосредственной близости от туннелей при температуре ниже 200 °С, чтобы «помешать изменению кристаллической структуры». МЭ-УАЭ поэтому использует преимущества отделения и хранения на поверхности цезия-137 и стронция-90 с периодом полураспада 30 лет, которые в противном случае определяли бы тепловыделение от радиоактивных отходов сразу же после закрытия хранилища. Это позволит хранить остаточные радиоактивные отходы в количестве, примерно в 40 раз превышающем то, что можно было бы разместить в хранилище Юкка Маунтин без дополнительной переработки.

⁸ См. [5], стр. II-3.

⁹ “Designing and demonstration of the UREX+ process using spent nuclear fuel”, by G. F. Vandergriff et al., Argonne National Laboratory, presentation at the International conference on advances for future nuclear fuel cycles, Nimes, France, June 21-24.

¹⁰ Защитники процесса UREX+ указывают, впрочем, что добавка нептуния-237 окажет положительное воздействие на *следующий* цикл переработки и повторного использования, так как при захвате нейтронов нептунием-237 образуется дополнительное количество тепловыделяющего плутония-238 в выгружаемом отработанном топливе.

¹¹ *National Energy Policy* (The White House, May 2001); www.whitehouse.gov

ны от лантанидов (за исключением европия)¹².

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРАНСУРАНОВ

В Табл.1 приводится состав трансурановой смеси в слабо обогащенном урановом топливе ЛВР через 20 лет после выгрузки топлива с «выгоранием» (количеством выделившейся энергии деления) 53 МВт-день на один кг тяжелого металла (МВт·д/кгТМ).

Приводятся также значения выделение тепла от радиоактивного распада, интенсивности излучения нейтронов спонтанного деления и дозы гамма- и нейтронного излучений на расстоянии одного метра от металлического шарика весом 1 кг, изготовленного из каждого трансуранового изотопа, плутония оружейного качества и смеси плутония с трансураними в отработанном топливе¹³.

Состав топлива был подсчитан с помощью программы ORIGEN 2.1¹⁴ в предположении, что начальное обогащение топлива ЛВР составляло 4.4% по урану-235. Дозы от гамма-излучения были рассчитаны с использованием переходных коэффициентов от флюенса к дозе, принятых Американским ядерным обществом¹⁵. Самопоглощение в металлическом шарике подсчитывалось для плотности 19.86 г/см³ с помощью разработанной в Лос-Аламосе программы переноса частиц MCNP4C2, работающей по методу Монте Карло¹⁶. Некоторые значительные вклады в дозу от гамма-лучей проверялись вручную¹⁷.

¹² "Application of the pyrochemical process to recycle of actinides from LWR spent fuel" by C. C. McPheeters, R. D. Pierce, and T. P. Mulcahey, *Progress in Nuclear Energy*, 31, 1/2 (1997), 175.

¹³ Поскольку большинство гамма-лучей, излучаемых трансурановыми элементами, имеют средние длины пробега, которые малы по сравнению с радиусом металлической сферы весом 1 кг, интенсивность дозы от больших масс сферической формы будет возрастать, грубо говоря, пропорционально площади поверхности, то есть массе в степени 2/3.

¹⁴ ORIGEN2.1: *Isotope Generation and Depletion Code Matrix Exponential Method*, CCC-371 ORIGEN 2.1 (Oak Ridge National Laboratory, Radiation Safety Information Computational Center, August 1996). Файлы поперечных сечений PERU50.LIB были использованы для вычисления темпов образования актинидов и продуктов деления в топливе водяного реактора под давлением. Принятая удельная мощность была постоянной и равной 37.5 МВт/кгТМ (3.9 года в активной зоне). Доли плутониевых изотопов и америция-241 хорошо согласуются с результатами, полученными для того же обогащения урана и такого же выгорания в документе *Plutonium Fuel: An Assessment* (OECD, 1989), Table 9.

¹⁵ Коэффициенты перевода флюенса в дозу для нейтронов и гамма-лучей (Американское ядерное общество, документ ANSI/ANS-6.1.-1-1991).

¹⁶ MCNP – *A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C*, J. F. Briesmeister, ed, Los Alamos National Laboratory: Los Alamos, NM, LA-13709-M, 2000. Мы использовали файл ядерных данных ENDF/B-VI Брукхейвенской национальной лаборатории (вариант от 12 июля 2001 г.). Плотности америция и кюрия равны примерно 13.5 г/см³. Впрочем, самопоглощение относительно нечувствительно к плотности (смотрите ниже).

¹⁷ Рассмотрим два примера – америций-241 и кюрий-243, которые в результате альфа-распадов переходят в нептуний-237 и плутоний-239. Число распадов в час на кг составляет 4.7·10¹⁷. Самая сильная гамма-линия имеет энергию 60 кэВ (вероятность испускания на распад составляет 36% согласно обновленному справочнику БНЛ, выпущенному 10 декабря 2004 г., <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/indx.dec.jsp>). Без учета самопоглощения поток на расстоянии 1 м от центра сферы из америция-241 составит 1.35·10¹²/см²·час. При 60 кэВ коэффициент перевода флюенса в дозу (см. [15]) равен 10⁻¹² Зв·см². Подсчитанная таким образом доза, не учитывающая самопоглощения в плутониевом шарике, составит 0.54 Зв/час. Массовый коэффициент ослабления в америции изменяется от 12.5 до 2 см²/г в диапазоне энергий между 50 и 100 кэВ согласно Справочнику по химии и физике. 76-е издание, стр.10-287 (CRC Press, 1995). Интерполяция по степенному закону дает значение 8 см²/г при 60 кэВ. При плотности америция 13.7 г/см³ (там же, стр.4-3) средняя длина свободного пробега гамма-квантов λ составит 0.009 см, а радиус килограммовой сферы R равен 2.6 см. Доля вышедшего на поверхность гамма-излучения, примерно равная 3λ/4R, составит 2.5·10⁻³, что уменьшит интенсивность дозы до 0.0014 Зв/час – это хорошо согласуется со значением в Табл.1. Теперь перейдем к кюрию-243 и воспользуемся теми же источниками информации.

В Табл.1 приводится состав трансурановой смеси в слабо обогащенном урановом топливе ЛВР через 20 лет после выгрузки топлива с «выгоранием» (количеством выделившейся энергии деления) 53 МВт-день на один кг тяжелого металла (МВт·д/кгТМ).

Полная интенсивность дозы для гамма-лучей и нейтронов от трансурановой сферы массой 1 кг составляет около 0.5 мЗв/час – это на три порядка величины меньше уровня 1 Зв/час, который, по мнению МАГАТЭ, определяет приведенный уровень физической защиты¹⁸. Хотя такие уровни излучения значительно увеличат риск заболевания раком у рабочих, облучаемых в течение года, надо предполагать, что в национальной программе или в программе террористов плутоний может быть выделен химическим путем из трансурановой смеси без радиационной защиты.

Поэтому добавление в смесь трансуранов без плутония не увеличивает противодействие распространению значительно сильнее по сравнению с разведением химически аналогичным нерадиоактивным материалом.

Следует также отметить, что америций-241 и америций-243, которые вместе с нептунием-237 составляют основу дополнительного материала в трансурановой смеси, обладают критическими массами, сравнимыми с некоторыми из изотопов, которые присутствуют в аналогичных концентрациях в плутонии реакторного качества (см. Табл.1).

Закрытые исследования привели к заключению, что если группа нарушителей изготавливает ядерное оружие с плутонием оружейного качества, она сможет также создать оружие из гражданского плутония реакторного качества, подобного смеси плутониевых изотопов, приведенной в Табл.1:

«Неправительственная группа, используя конструкции и технологии, не превышающие по сложности то, что применялось в ядерном оружии первого поколения, сможет создать ядерное оружие из плутония реакторного качества с гарантированной надежной мощностью в одну или несколько килотонн (и с возможной мощностью гораздо выше этого значения)»¹⁹.

Поскольку значительная часть ядерного сообщества все еще не признает этого заключения, повторим кратко некоторые отдельные элементы анализа, стоящие за ним.

Преждевременное начало реакции. Как показано в Табл.1, интенсивность нейтронного излучения от плутония реакторного качества на порядок величины больше, чем от плутония оружейного качества, а интенсивность нейтронного излучения от смеси трансуранов на два порядка выше, чем от одного плутония реакторного качества (за счет высокой скорости спонтанного распада кюрия-244). Эти высокие интенсивности нейтронного излучения привели ряд наблюдателей к выводу, что плутоний реакторного качества и трансурановая смесь не могут использоваться для ядерного оружия.

Наиболее важные гамма-линии обладают энергиями 278 кэВ (14%) и 228 кэВ (11%), так что в среднем это эквивалентно вылету одного кванта с усредненной энергией 256 кэВ в 25% случаях распадов. Без учета самопоглощения поток на расстоянии метра составит $14 \cdot 10^{12}$ /см².час. При 256 кэВ коэффициент перевода флюенса в дозу равен $1.33 \cdot 10^{-12}$ Зв.см², так что соответствующая интенсивность дозы равна 18.62 Зв/час. Массовый коэффициент ослабления гамма-лучей в кюрии при такой энергии составит около 0.87 см²/г. При плотности кюрия 13.5 г/см³ радиус шарика массой в 1 кг равен 2.6 см, а средняя длина свободного пробега гамма-кванта составит 0.085 см. Коэффициент самопоглощения равен 0.025, что уменьшает интенсивность дозы до величины 0.46 Зв/час. Опять это находится в хорошем согласии со значением, представленным в Табл.1.

¹⁸ *Физическая защита ядерного материала и ядерных установок.* Документ МАГАТЭ INFCIRC/225/Rev.4.

¹⁹ *Оценка (с точки зрения нераспространения и контроля над вооружениями) хранения делящихся материалов, годных для применения в ядерном оружии, и альтернатив размещения избыточного плутония.* U.S. Department of Energy, DOE/NN-0007, 1997, pp. 38-39.

Табл. 1. Тепло, интенсивность нейтронов и дозы от одного кг разных чистых трансурановых изотопов, от их смеси в отработанном топливе ЛВР с выгоранием 53 МВт.д/кг и от плутония оружейного качества (через 20 лет после разгрузки из реактора).

Изотоп	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж
Нептуний-237	$2,14 \cdot 10^7$	57	0,066	0,022	0	0,08	-
Нептуний-239 (из америция-243)	2,4 дня	-	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$5,6 \cdot 10^5$	0	$3,9 \cdot 10^8$	
Весь плутоний	-	14,4	0,824	19,9	4,6	0,52	0,33
Америций-241	432	60	0,089	114	0,012	126	$9 \cdot 10^{-4}$
Америций-243m	141	9,1	$9,3 \cdot 10^{-5}$	3,84	1,49	33	0,11
Америций-243	7400	208,8	0,018	6,4	0,03	38	0,002
Кюрий-243	28,5	8,6	$5,1 \cdot 10^{-5}$	1900	-	60000	0
Кюрий-244	18,1	27,0	$3,7 \cdot 10^{-3}$	2830	$1,11 \cdot 10^5$	208	7950
Кюрий-245	8500	9,2	$3,9 \cdot 10^{-4}$	5,7	-	81	0
Трансураны	-	17,9	1,00	37,3	414	22	30
Плутоний оружейного качества*	-	10,7		2,3	0,5	0,08	0,04
Плутоний-236	2,9	6 – 8	$2,3 \cdot 10^{-9}$	18500	349	609	25
Плутоний-238	87,7	9,6 – 9,8	0,029	568	26,6	13,8	1,9
Плутоний-239	$2,4 \cdot 10^4$	10,1	0,555	1,92	$2,3 \cdot 10^{-4}$	0,08	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Плутоний-240	6500	36,9	0,266	7,1	9,1	0,19	0,65
Плутоний-241	14,4	13,0	0,064	3,2	-	0,18	0
Плутоний-242	$3,8 \cdot 10^5$	83,4	0,085	0,113	16,9	0,03	1,2

Примечания:

А - период полураспада (годы).

Б - Критическая масса чистого изотопа (кг). Данные по отдельным изотопам взяты из работы "Critical masses of bare metal spheres using SCALE/XSDRN" by R. Q. Wright, W. C. Jordan, and R. M. Westfall, Oak Ridge National Laboratory, *Proceedings of the Annual Meeting of the American Nuclear Society*, San Diego, June 4-8, 2000, p.167. Авторы проверили эти цифры при помощи программы MCNP и библиотеки поперечных сечений ENDF/B-VI.5 и пришли к совпадающим результатам за исключением америция-243, где найденное нами значение критической массы оказалось равным 144 кг. При расчете всего плутония, оружейного плутония и трансуранов авторы предполагали, что плотность плутония равна $19,86 \text{ г/см}^3$, а плотность трансуранов – 19 г/см^3 .

Данные по нептуню и по его критичности взяты из выступления Марка Чедвика на 53-й встрече рабочей группы по оценкам поперечных сечений и по американской программе ядерных данных (совместное заседание по ядерным данным для национальной безопасности), Брукгейвенская национальная лаборатория, 4-7 ноября 2003 г.

www.nndc.bnl.gov/nndc/proceedings/2003csewqusndp/homeland/04Chadwick.pdf.

В - массовая доля в трансуранах (в верхней секции таблицы) и массовая доля изотопов плутония в чистом плутонии (в нижней секции таблицы).

Г – Выделяемое тепло (Вт/кг).

Д – Интенсивность нейтронов от спонтанного деления [$10^5/(\text{кг.с})$].

Е – Интенсивность дозы (10^{-5} Зв/час.кг) на расстоянии 1 м для гамма-лучей.

Ж – То же для нейтронов. Использован коэффициент связи между флюенсом и дозой, равный $0,21 \cdot 10^{-9}$ Зв.см² Смотрите примечание¹⁵.

(*) Плутоний оружейного качества состоит из 0.012% плутония-238, 93.8% плутония-239, 5.8% плутония-240, 0.3% плутония-241 и 0.022% плутония-242. Карсон Марк, «Взрывные свойства плутония реакторного качества», *Наука и всеобщая безопасность*, т.4. вып.1, 1994 г.

Вероятная мощность взрыва имплозивной бомбы с твердой сердцевиной типа Нагасаки зависит от скорости испускания нейтронов спонтанного деления. Сжатие от момента возникновения подкритичности до момента наибольшей сверхкритичности длится примерно 10 мкс. Если цепная реакция начинается до максимального сжатия (преждевременное начало), ожидаемая мощность взрыва упадет от примерно 20 кт до меньшей величины (около одной кт). Это является причиной, почему содержание плутония-240 в плутонии для бомбы типа Нагасаки было сведено к минимуму. Однако, никакой уровень содержания плутония-240 не уменьшит мощность ниже одной кт²⁰. Взрыв мощностью в одну кт все еще останется разрушительным оружием.

Закрытые исследования пришли также к выводу, что конструкции современных ядерных вооружений нечувствительны к преждевременному началу цепной реакции:

«Страны с продвинутым ядерным оружием (например, США и Россия), используя современные конструкции, могут создать оружие из плутония реакторного качества, обладающее надежной мощностью взрыва, весом и другими характеристиками, которые, как правило, сопоставимы с характеристиками оружия, изготовленного из плутония оружейного качества»²¹.

Поэтому с точки зрения нейтронов трансурановая смесь не будет значительно хуже плутония реакторного качества в качестве материала для ядерного оружия.

Обращение с теплом. В табл.1 показано также, что скорость тепловыделения в плутонии реакторного качества почти на порядок величины выше, чем в плутонии оружейного качества. Для восьми кг плутония реакторного качества (согласно экспертам МАГАТЭ, при таком количестве «нельзя исключить возможности создания ядерного взрывного устройства»²²) скорость тепловыделения составит, примерно, 160 Вт. Если из такого количества плутония изготовить твердую сферу со средней плотностью 16 г/см³, ее радиус составит только 6 см, а сама сфера сильно нагреется в воздухе из-за малой площади для переноса тепла. По нашим оценкам, поверхностная температура голый сферы составит 190 °С, что гораздо выше, чем 60 °С для такой же сферы из плутония оружейного качества²³. Помещенный внутри изолирующего слоя обычной взрывчатки, плутоний нагреется до более высокой температуры. Поскольку большинство типов взрывчатки теряют устойчивость при температурах выше, примерно, 200 °С²⁴, это означает, что для ядерной боеголовки, содержащей небольшую сплошную «ячейку» плутония реакторного качества, придется иметь систему охлаждения или же работать с заранее охлажденной «ячейкой», вставляемой за несколько часов до взрыва, причем эта длительность будет зависеть от теплоемкости экрана и других конструк-

²⁰ Карсон Марк, «Взрывные свойства плутония реакторного качества», *Наука и всеобщая безопасность*, т.4, вып.1, 1994 г.

²¹ См. [19], стр.39. Министерство энергетики США также раскрыло (достаточно загадочно) «определение оружия, устойчивого к преждевременному началу цепной реакции (это оружие, мощность которого не окажется чувствительной к запуску ядерной реакции ранее намечаемого времени)», *“Drawing back the curtain of secrecy”: Restricted data declassification decisions, 1946 to the present*, RDD-3, U.S. Department of Energy, Office of Declassification, Jan.1, 1996, V.C.2.n, p.96.

²² *IAEA Safeguards Glossary, 2001 edition, p.23.*

²³ Коэффициент ламинарного конвективного теплопереноса для сферы в воздухе равен $1.32[\Delta T/R]0.25 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, где R – радиус сферы, а ΔT – разница температуры между сферой и окружающим воздухом (*2001 ASHRAE Handbook Fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerators and Air-Conditioning, 2001, p.3.12, Table 5). Радиационные потери с поверхности полусферы, обладающей излучающей способностью ϵ , равны $\epsilon\sigma T^4$, где мы считаем $\epsilon = 0.95$ для поверхности сферы (считается, что она окрашена в черный цвет) и 0.9 для поддерживающих поверхностей, которые излучают на сферу (считается, что они находятся при температуре 20 °С), $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/см}^2\cdot\text{К}^4$ – это постоянная Стефана-Больцмана (смотрите указанный в этой сноске справочник, стр.3.8). К – абсолютная температура в градусах Кельвина.

²⁴ *Explosive Science* by R. N. Rogers and J. L. Rogers, Los Alamos, NM, <http://home.att.net/~rnrogers/> без даты.

тивных деталей²⁵. Бомба типа Нагасаки и другие виды ядерного оружия первого поколения имели конструкцию, где «ячейку» можно было вставлять, по причинам надежности и безопасности²⁶.

Тепловыделение от трансурановой смеси всего лишь почти вдвое выше, чем от плутония реакторного качества. По этой причине технические подходы, позволяющие применение плутония реакторного качества (например, охлаждение и вставляемые ячейки), должны сработать почти столь же хорошо и с трансурановой смесью. Итак, с точки зрения обращения с теплом смесь трансуранов должна рассматриваться как потенциальный материал для прямого использования в ядерном оружии.

Критическая масса. Из табл.1 можно увидеть, что критическая масса плутония реакторного качества в 1.35 раз выше, чем у плутония оружейного качества, а у смеси трансуранов выше в 1.7 раз. Эти различия меньше, чем разница между критическими массами плутония оружейного качества и урана оружейного качества (94% урана-235), для которого критическая масса составляет примерно 50 кг²⁷.

ДОЗА ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ

Радиоактивные редкоземельные продукты деления, вносящие значительный вклад в активность отработанного топлива ЛВР через несколько месяцев (или более) охлаждения, приведены в табл. 2²⁸. Кроме того, в таблице представлены:

- число граммов каждого изотопа в килограмме трансуранов на момент выгрузки отработанного топлива из реактора;
- наиболее интенсивные гамма-линии, сопровождающие распад каждого редкоземельного элемента (лантанида);
- вклад каждого лантанида в дозу излучения от сферы из трансуранового металла весом 1 кг, если сфера изготовлена немедленно после выгрузки отработанного топлива.

Мы проверили вручную интенсивность излучения от церия-144 и празеодима-144²⁹.

²⁵ В конструкции бомбы типа Нагасаки плутониевая сфера и окружающие ее концентрические сферы из урана и алюминия имеют радиусы 4.6, 11.4 и 23.5 см, соответственно. Смотрите *Atom Bombs* by John Coster-Mullen, самоиздат, 2005 г. Теплоемкости металлических урана и алюминия при 25 °C равны 2.2 и 2.4 Дж/см³.°C, соответственно. При тепловыделении 160 Вт в центре уран и алюминий будут нагреваться примерно на 4.5 °C в час.

²⁶ *The Making of the Atomic Bomb* by Richard Rhodes, (Simon and Schuster-Touchstone 1988), pp. 659-661.

²⁷ Критическая масса урана оружейного качества (93.71% урана-235) составляет 49 кг. *Critical dimensions of systems containing U-235, Pu-239, and U-233* by H. C. Paxton and N. L. Provost, Los Alamos National Laboratory, LA-10860-MS, 1987.

²⁸ *Nuclear Chemical Engineering, 2nd edition*, M. Benedict, T. H. Pigford, and H.W. Levi (McGraw Hill, 1981), Table 8.1.

²⁹ Выход церия-144 составляет 0.055 на одно деление ядра урана-235 и 0.037 на одно деление ядра плутония-239 – в среднем 0.046 [T. R. England and B. F. Rider, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-94-3106, ENDF-349 (1993), <http://ie.lbl.gov/fission.html>]. Если пренебречь превращением ядер и предположить, что топливо находилось в реакторе четыре года, 27% ядер останется в топливе (то есть 0.012 на деление). На одно деление приходится 0.24 трансурана. Поэтому на кг трансуранов при выгрузке топлива должно приходиться 30 г церия-144 – эта величина хорошо согласуется с тем, что помещено в табл.2. Основная гамма-линия церия-144 (11% распадов) имеет энергию 134 кэВ. Далее проводим последовательность расчетов, детально изложенную в примечании [17], и получаем интенсивность дозы от церия-144, содержащегося в шаре из трансуранов весом 1 кг, на расстоянии 1 м – это значение равно 0.07 Зв/час, что соответствует величине, приведенной в табл.2. Празеодим-144 испускает гамма-линии с энергиями 2.2 МэВ (0.7% на распад), 1.5 МэВ (0.28%) и 0.7 МэВ (1.3%). Проводя такую же последовательность расчетов, как изложено в примечании [17], получаем интенсивности дозы от 1.37.10⁻⁵ г празеодима-144 для каждой линии: 2.1, 0.47 и 0.62 Зв/час, соответственно. Суммарная интенсивность дозы составляет 3.2 Зв/час, а в

Только дозы от празеодима-144 – короткоживущего продукта распада церия-144 и от европия-154 оказываются существенными в тех масштабах, которые установило МАГАТЭ (порог самозащиты – один Зв/час на расстоянии 1 м).

Табл. 2. Важные продукты из группы лантанидов в составе отработанного топлива ЛВР на момент выгрузки (выгорание 53 МВт.д/кгТМ).

Изотоп	А	Б	В	Г	Д
<i>в составе продукта пиропереработки</i>					
Церий-144	0,78 года	2,12	32,2	0,13 (0,12)	0,10
Празеодим-144 (из церия-144)	17,3 мин	$5,6 \cdot 10^5$	$1,37 \cdot 10^{-3}$	0,023 (1,2)	8,1
Прометий-147	2,6 года	0,33	10,9	$3 \cdot 10^{-5}$ (0,12)	10^{-4}
Самарий-151	90 лет	0,03	1,54	$3 \cdot 10^{-4}$ (0,022)	$2 \cdot 10^{-8}$
<i>не попадают в состав продукта пиропереработки</i>					
Европий-154	8,8 года	2,42	6,16	1,5 (0,74)	2,31
Европий-155	4,7 года	0,34	2,28	0,53 (0,094)	0,003
Примечания:					
А) Период полураспада;					
Б) Тепловыделение (Вт/г);					
В) Количество (в граммах) на килограмм трансуранов;					
Г) Количество гамма-квантов на распад, в скобках – энергия кванта (МэВ);					
Д) Интенсивность дозы от гамма-излучения (Зв/час.кгТМ на расстоянии 1 м).					

Защитники пиропереработки указали на преимущества противодействия распространению, если не отделять лантаниды от трансуранов. Но пиропереработка *отделяет европий*³⁰, так что вся нагрузка для поддержания высокого радиационного поля ложится на празеодим-144 и его родительский элемент – церий-144.

К сожалению, церий-144 обладает сравнительно коротким периодом полураспада. Как показано на рис.1, если даже весь церий-144 будет следовать за трансуранами³¹, уровень излучения от церия-144, находящегося в одном килограмме трансуранового металла, опустится ниже порога самозащиты за два с лишком года после выгрузки отработанного топлива. Через пять лет этот уровень окажется ниже 0.1 Зв/час.

Поэтому короткоживущий радиационный барьер от церия-144 будет иметь смысл только для топливного цикла, куда входят очень быстрое выделение трансуранов из отработанного топлива после его выгрузки из реактора и скорое последующее использование трансуранов. Защитники программы ИРБН полагают, что такое может оказаться возможным, если расположить ИРБН и завод по пиропереработке рядом. В статье Аргоннской национальной лаборатории относительно противодействия распространению топливного цикла ИРБН предполагается, что топливо будет переработано и возвращено в реактор чрез 100 дней после выгрузки его из реактора³². В рамках такого предположения подсчитывается радиационное поле интенсивностью 4 Зв/час от 10 кг «катодного продукта» (содержащего около 2 кг трансуранов) и 10 Зв/час от топливной сборки ИРБН, содержащей 90 кг катодного продукта (при-

табл.2 приведено значение 8.1 Зв/час, полученное при расчете методом Монте-Карло (примечание [16]). Такое расхождение оказалось наибольшим для всех расчетов, проведенных вручную. При внимательном рассмотрении оказалось, что по линии 2.2 МэВ расхождений нет, но метод Монте-Карло дает более высокие значения дозы от линий с меньшими энергиями, а затем рассматривает другие неуказанные линии, что повышает общую дозу еще на 50%.

³⁰ Смотрите примечание [12].

³¹ Оценки содержания церия-144 в трансуранах имеют точность в диапазоне 10-25%. "Physics studies of higher actinide consumption in an LMR" by R. N. Hill, D. C. Wade, E. K. Fujita, and H. Khalil, Proceedings of the International Conference on the Physics of Reactors, Marseille, France, 1990, I-83.

³² "Nonproliferation and Safeguards Aspects of the IFR" by W. H. Hannum, D. C. Wade, H. F. McFarlane, and R. N. Hill, *Progress in Nuclear Energy*, **31**, 1-2 (1997): 203.

мерно, 20 кг трансуронов), которое создано отработанным топливом с возрастом 100 дней³³. Если сравнивать эти величины с нашими результатами из табл. 2, следует принять во внимание тот факт, что содержание церия-144 в трансуронах будет на порядок величины меньше для отработанного топлива ИРБН по сравнению с отработанным топливом ЛВР, а это, соответственно, уменьшает поле гамма-излучения на кг трансуронного материала в ИРБН³⁴.

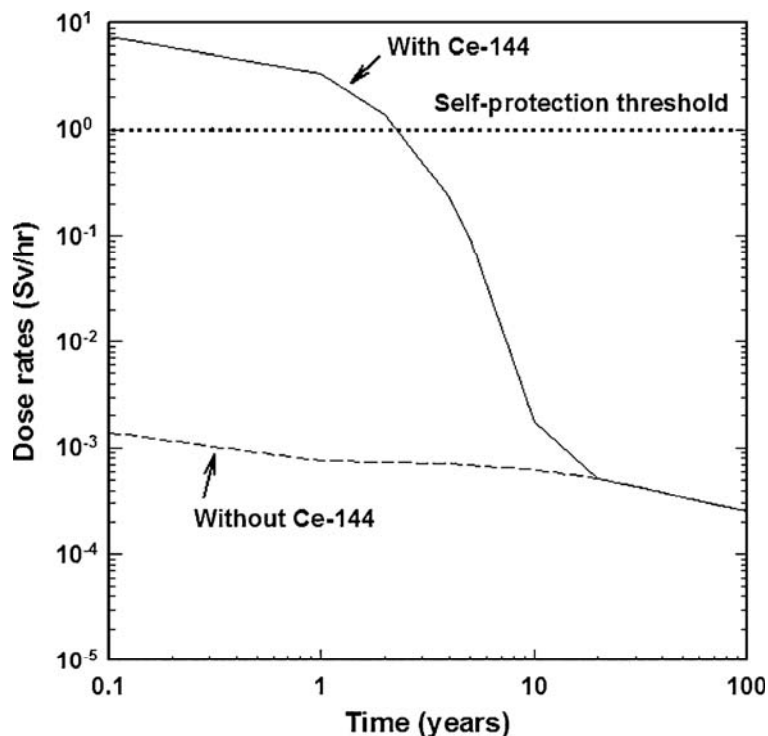


Рис.1: Эффект включения церия-144 в интенсивность радиационной дозы на расстоянии одного метра от сферы весом 1 кг из трансуронов, извлеченных из отработанного топлива ЛВР с выгоранием 53 МВт.д/кгТМ. По оси абсцисс отложено время (годы) в логарифмическом масштабе. По оси ординат также в логарифмическом масштабе отложена интенсивность дозы (Зв/час). Надписи (сверху вниз): С церием-144; Порог самозащиты; Без церия-144.

К сожалению, эти преимущества противодействия распространению, предоставляемые пиропереработкой, не имеют отношения к проблеме уже существующего и растущего запаса американского отработанного топлива ЛВР. Это топливо в среднем пролежало уже более

³³ Смотрите [32], рис.3. Рассмотрение самопоглощения в этой статье кажется странным, потому что в тексте утверждается, что дозу излучения можно оценить в следующем предположении: один ватт мощности гамма-излучения на расстоянии один метр переводится в интенсивность дозы, равную одному Зв/час. Приблизительно это справедливо, если не экранировать излучение от источника празеодим-144. Без учета самопоглощения изотропный точечный источник с мощностью гамма-излучения 1 Вт создает на расстоянии 1 м поток квантов, равный $1.8 \cdot 10^{11} (1/E) \text{ см}^{-2} \cdot \text{час}^{-1}$, где E – средняя энергия гамма-квантов (МэВ). Средняя энергия гамма-лучей, испускаемых празеодимом-144, составляет 1.24 МэВ. Коэффициент перевода флюенса в дозу для этой энергии равен примерно $5.4 \cdot 10^{-12} \text{ Зв} \cdot \text{см}^2$ (смотрите [15]). Это приводит к оценке дозы величиной 0.78 Зв/час. Нелинейность между дозой и количеством трансуронов, которая приведена в статье [32] о катодном продукте и топливной сборке ИРБН, впрочем, подразумевает, что самопоглощение было принято во внимание.

³⁴ Выход ядер церия-144 при делении плутония-239 быстрыми нейтронами равен 0.037 на деление – это составляет примерно 80% от среднего значения для деления плутония $_{94}\text{Pu}$ (и урана $_{92}\text{U}$ -235 (смотрите примечание [33] и приведенные там ссылки). Отработанное топливо ИРБН содержит 22% трансуронов (а отработанное топливо ЛВР – только около 1%) и, как считается, 10% продуктов деления (отработанное топливо ЛВР – около 5%). Смотрите [32], табл. 1 и 2.

десяти лет после выгрузки из реакторов и поэтому содержит незначительные количества церия-144.

ВЫВОДЫ

Дозы излучения от трансуранов без лантанидов на три с лишним порядка величины ниже порога МАГАТЭ на самозащиту.

Включение любого из двух редкоземельных продуктов деления (церий-144 или европия-154) может увеличить интенсивность дозы выше порога самозащиты. Но церий-144 с периодом полураспада 0.8 лет уже распался во всем отработанном топливе ЛВР за исключением совсем свежего извлеченного топлива. У европия-154 период полураспада составляет 9 лет, но он не остается с трансуранами в топливном цикле с пиропереработкой. Поэтому похоже, что хранение плутония из старого топлива ЛВР в смеси с другими трансуранами и с редкоземельными продуктами деления (без учета европия-154) не сделает его значительно более защищенным собственным излучением.

Переработка вначале разрабатывалась с целью выделения плутония для ядерного оружия из металлического уранового топлива реакторов для производства плутония. Затем эта технология была использована для отделения плутония от топлива энергетических реакторов (оксид урана) с более высоким уровнем выгорания, чтобы сформировать активные зоны реакторов-бридеров (размножителей плутония), чье крупномасштабное промышленное использование поначалу ожидалось в 90-х гг. Сейчас, когда появление реакторов-бридеров неопределенно задерживается, главной целью становится то, как избежать невозвратимого помещения долгоживущих трансурановых радиоактивных изотопов в подземные хранилища.

Впрочем, в США не планируется в течение, по крайней мере, сотни лет окончательное решение о размещении отработанного топлива. Законодательство по созданию национальных хранилищ требует, чтобы они были спроектированы и построены так, чтобы позволить вернуть любое отработанное ядерное топливо, помещенное туда, в подходящий период работы установки по любой причине, имеющей отношение к здоровью и безопасности населения, или в связи с окружающей обстановкой, или с целью разрешить возврат экономически ценного содержания такого отработанного топлива³⁵.

Сейчас планы МЭ заключаются в том, чтобы иметь время до закрытия хранилища (по крайней мере, 100 лет после начала размещения³⁶).

В этом контексте трудно увидеть необходимость для отделения трансуранов от американского отработанного топлива, особенно с учетом того, что Соединенным Штатам и другим странам уже приходится размещать сотни тонн избыточного плутония, который они ранее выделили для гражданских и оружейных целей³⁷.

³⁵ National Waste Policy Act of 1982, Sec. 122.

³⁶ *Final Environmental Impact Statement for a Geological Repository for the Disposal of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste at Yucca Mountain, Nye County, Nevada, [Final Yucca Mt EIS] DOE/EIS-0250, 2002.*

<http://www.ocrwm.doe.gov/documents/feis.2/summary/indexsum.html>

³⁷ На конец 2003 г. в МАГАТЭ было заявлено о более чем 230 тонах гражданского плутония. Смотрите David Albright and Kimberley Kramer, "Separated Civil Plutonium Inventories: Current Status and Future Directions," Revised July 8, 2005, <http://www.isis-online.org/global.stocks/separated.civil.pu.pdf>, Table 1. Примерно половина этого количества принадлежит США и России, причем ни одна из этих стран не имеет плана размещения. США и Россия продекларировали также по 34 тонны избытка оружейного плутония. Похоже, что в дальнейшем эти цифры вырастут.