

## ХРАНИМАЯ СМЕСЬ ОКСИДОВ УРАНА И ПЛУТОНИЯ (МОХ): ТРЕТИЙ ПУТЬ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ПЛУТОНИЯ? (\*)

Дж. Канг, Ф. фон Хиппель, А. Макферлейн, Р. Нелсон

К 2010 г. у Великобритании может оказаться 110 тонн выделенного гражданского плутония, а в России - до 150 тонн избыточного оружейного и гражданского плутония. Ни у одной из этих стран нет достаточного количества легководных реакторов (ЛВР) для перевода этого плутония в МОХ-топливо. К тому же устранение плутония путем создания МОХ-топлива затруднительно для ряда других стран. Совместное устранение плутония вместе с высокоактивными отходами может оказаться неосуществимым после переработки топлива, поскольку от соответствующих предприятий требуется быстрый перевод жидких высокоактивных отходов в твердую форму. При третьем подходе дешевые МОХ-стержни перемешиваются с отработанным топливом в контейнерах, предназначенных для окончательного устранения. Мы проанализировали экономику и противодействие распространению такого варианта «хранимой МОХ» и приходим к заключению, что его следует рассматривать серьезно.

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2002 г. и принята к опубликованию 5 мая 2002 г.

Дж.Канг работает в Сеуле (Южная Корея).

Ф.фон Хиппель и Р.Нелсон – сотрудники программы по науке и всеобщей безопасности в Принстонском университете. Почтовый адрес Ф. фон Хиппеля – Program on Science and Global Security, Princeton University, 221 Nassau Str., Princeton, NJ, 08542, USA. Электронный адрес: fnhippel@princeton.edu

А.Макферлейн – сотрудник программы по изучению безопасности в Массачусетском технологическом институте.

(\*) Предыдущие статьи авторов по этой теме появлялись в *The Bulletin of the Atomic Scientists*, May/June 2001, p.53, а также в *Proceedings of the Global 2001 International Conference on the Back End of the Fuel Cycle*, Paris, Sept. 10-13, 2001.

### ВВЕДЕНИЕ

Существует немного физических препятствий для быстрого использования выделенного плутония в ядерном оружии. Поэтому в докладе Национальной академии наук США арсеналы избыточного оружейного плутония в США и России характеризуются как «очевидная существующая опасность для национальной и международной безопасности».<sup>1</sup> Аналогично доклад Британского Королевского общества об очень крупном арсенале выделенного гражданского плутония (который также можно использовать в оружии) приходит к следующему выводу: даже в стабильной Британии «возможность того, что запасы плутония могут на некотором этапе рассматриваться для запрещенного производства оружия, вызывает исключительную тревогу».<sup>2</sup> Поэтому усиливается согласие по поводу того, что плутоний не может бесконечно долго оставаться в выделенном виде. Его следует делать менее доступным для оружейного применения.

США и Россия предложили программы перевода избыточного оружейного плутония (по крайней мере, 34 тонны с каждой стороны) в ураново-плутониевое топливо в виде смеси оксидов (МОХ) для легководных реакторов (ЛВР). До 2002 г. США запланировали «связать» часть своего выделенного плутония в керамических цилиндрах, покрытых металлом и по-

<sup>1</sup> Committee on International Security and Arms Control, *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium* (Washington, DC: National Academy Press, 1994), p.1.

<sup>2</sup> *Management of Separated Plutonium*, (London, The Royal Society, 1998) Summary.

мещенных в канистры с остеклованными высокоактивными отходами (ВАО).<sup>3</sup> Если бы две эти страны сократили свои арсеналы плутония оружейного качества примерно до 20 тонн (это соответствует, может быть, пяти тысячам боеголовок<sup>4</sup>), то США смогут заявить о дополнительных 27 тоннах избыточного плутония, а Россия – примерно о 80 тоннах.<sup>5</sup>

Особое внимание к МОХ-топливу в России и США отчасти связано с тем, что производство МОХ-топлива и его использование являются хорошо разработанными технологиями в Западной Европе. Оно отражает также предпочтение Российского министерства атомной энергии (Минатома). Независимо от текущей экономики Минатом настаивает, что надо использовать топливную ценность своего выделенного плутония. Он настаивает также, что изотопный состав избыточного оружейного плутония в США следует ухудшить до уровня реакторного качества путем нейтронного облучения.

Имеются также крупные запасы выделенного гражданского плутония (всего около 200 тонн), хранящиеся в основном на гражданских предприятиях по переработке в Англии, Франции и России (см. табл.1). Из-за ограниченных возможностей ЛВР устранение через МОХ-топливо станет прямолинейным процессом для менее, чем половины, выделенного гражданского плутония. Великобритания предполагает иметь запас примерно в 115 тонн и только один ЛВР к 2010 г.<sup>6</sup> Возможности российских ЛВР достаточны для того, чтобы, по крайней мере, справиться с оружейным плутонием, избытки которого заявлены. Ряд других стран, имеющих достаточные возможности ЛВР, могут столкнуться с проблемами получения лицензий на работу реакторов с МОХ-топливом. Но практически все страны пока что отказываются иметь дело с МОХ-топливом, изготовленным из принадлежащего другим странам плутония.<sup>7</sup>

Устранение плутония вместе с высокоактивными отходами в принципе было бы возможным на установках по переработке в Англии, Франции и России. Но они отказываются идти по пути такого варианта «антипереработки», пока еще есть надежда получить дополнительные контракты на переработку. От них требуется также сведение к минимуму резерва жидких отходов и поэтому у них может не оказаться достаточного запаса для предлагаемого подхода к устранению плутония, когда прекратится переработка.<sup>8</sup>

Третий вариант устранения плутония – «храняемая МОХ», был предложен группой немецких аналитиков в 1999 г.<sup>9</sup>. В соответствии с этой концепцией изготавливаются МОХ-

---

<sup>3</sup> *Report to Congress on the Projected Life-Cycle Cost of the U.S. and Russian Fissile Materials Disposition Programs*, National Nuclear Security Administration (Distribution Draft), March 30, 2001, Fig. 2.2. В более позднем американском плане связывание плутония не упоминается ("Revised plutonium disposition strategy", Office of Fissile Materials Disposition, National Nuclear Security Administration, U.S. Department of Energy, January 2002).

<sup>4</sup> Среднее количество плутония, приходящееся на боеголовку, засекречено. НАН в своих исследованиях использовала 4 кг в качестве оценки. См. [1], стр.40.

<sup>5</sup> Соединенные Штаты заявили о полном количестве выделенного плутония в докладе *Plutonium: The First 50 Years* (U.S. Department of Energy report DOE/DP-0137, 1996). Для российского арсенала оружейного плутония существуют только оценки в диапазоне  $131 \pm 25$  тонн: D.Albright, F.Berkhout, W.Walker, *Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996* (Oxford University Press, 1997), p.58.

<sup>6</sup> *Radioactive Waste Management Advisory Committee's Advice to Ministers on the Radioactive Waste Implications of Reprocessing*; November 14, 2000.

<<http://www.open.gov.uk/rwmac/reprocess/index/html>>.

<sup>7</sup> Впрочем, Форум по ядерному разоружению в Зюге (Швейцария) разработал предложение «Российский оружейный плутоний и выбор Запада» (2002), в котором предполагается, что российская МОХ будет направляться в Бельгию, Германию и Швейцарию. Это те страны, которые решили окончить переработку своего отработанного топлива и поэтому в них появятся свободные места на реакторах, лицензированных для МОХ-топлива.

<sup>8</sup> Отличный предварительный анализ английских вариантов связывания плутония с радиационными барьерами и без них на основе остеклованных отходов с высокой радиоактивностью и отработанного топлива можно найти в работе Баркера и Садницкого *The Disposition of Civil Plutonium in the UK, April 2001* ([barker@pop.gn.apc.org](mailto:barker@pop.gn.apc.org) ; [sadnicki@aol.com](mailto:sadnicki@aol.com)).

<sup>9</sup> C.Kuppers, W.Liebert, M.Sailer, "Feasibility of vitrification of plutonium with high-active waste concentrate and fabrication of MOX storage rods for direct final disposal instead of a use of MOX

стержни, но они не предназначены для топлива. Вместо этого их будут смешивать непосредственно с отработанным топливом в контейнерах, предназначенных для окончательного хранения. Мы провели дополнительные анализы затрат, критичности и нераспространения для такого подхода и считаем, что он достоин серьезного рассмотрения. На рис.1 показаны пути устранения плутония в виде топлива и хранимой МОХ.

## ЗАТРАТЫ

Поскольку хранимая МОХ не предназначена для использования в реакторе, ее можно спроектировать в соответствии с менее строгими стандартами и с более высоким содержанием плутония по сравнению с топливом для ЛВР. С учетом современной стоимости производства обычного МОХ-топлива этот факт может значительно компенсировать экономию в стоимости топлива для ЛВР, связанную с использованием МОХ-топлива.

**Таблица 1:** Запасы гражданского необлученного плутония<sup>а</sup> (на конец года в тоннах). А – полное количество плутония, находящегося в данной стране; В - количество иностранного плутония в стране; С – количество плутония, вывезенного за границу.

Страна	А	В	С
Бельгия <sup>б</sup>	3,9	?	0,9
Великобритания (2000)	78,1	16,6	0,9
Франция	82,7	38,5	0
Германия <sup>в</sup>	7,2	0	17
Италия	0	0	0,5
Япония	5,3	0	32,1
Нидерланды	0	0	1,2
Россия (2000) <sup>г</sup>	33,4	0	0,0006
Швеция	0	0	0,8
Швейцария (2000) <sup>д</sup>	0,6	0	5
Всего	200	55	50

а) Данные для стран основаны на их заявлениях в МАГАТЭ. Для Италии, Голландии и Швеции данные основаны на оценках Института по науке и международной безопасности, проведенных в 1998 г;

б) Бельгия не предоставила разбивку имеющегося в стране плутония на национальный и заграничный;

в) Германия не предоставила сведений о своем плутонии, находящемся на иностранных заводах по переработке. Наши оценки предполагают, что весь неучтенный плутоний в других странах является германским – при этом пренебрегается иностранным плутонием в Бельгии и швейцарским плутонием в других странах;

г) Хотя Россия перерабатывает зарубежное отработанное топливо, она считается владельцем переработанного плутония;

д) Швейцария заявила только о полном количестве плутония в топливе, которое она отправила за границу для переработки.

Как сказано в исследовании, проведенном в 1999 г. для оставшегося неизвестным немецкого предприятия, хранимую МОХ «первого поколения» с содержанием плутония 9.2% можно изготавливать на существующих европейских заводах по производству топлива по цене около 1850 евро (1665 долларов) за килограмм тяжелого металла (уран и плутоний), исполь-

---

fuel for further handling of separated plutonium”, paper to the IAEA technical committee meeting on “Factors Determining a Long Term Back End Nuclear Fuel Cycle Strategy and Future Nuclear Systems”, Vienna, November 8-10, 1999; G.A.Armantrout, L.J.Jardine, “Disposition of excess plutonium using “off-spec” MOX pellets as a sintered ceramic waste form”, paper to Waste Management 96 Symposia ‘Working Towards a Cleaner Environment’, Tucson, AZ, Feb 25-29, 1996; UCRL-JC-121830 Preprint.

зую современные производственные установки для топливного МОХ.<sup>10</sup> Если ослабить «реакторные» требования к конструкции и контролю за качеством, а также использовать более дешевый цирконий<sup>11</sup> и поднять содержание делящегося плутония в тяжелом металле до 10% (15%-ное содержание всего плутония), то, как показывают оценки, затраты на стержень вырастут примерно на 10% из-за увеличения забот в связи с возросшей критичностью при более высокой концентрации плутония. Но благодаря более высокой загрузке затраты на килограмм помещенного в стержень плутония можно будет сократить на треть до 12000 долларов на кг плутония для хранимой МОХ «второго поколения».

Впрочем, могут появиться другие дополнительные затраты для хранимой МОХ, поскольку она не заменяет топливо из НОУ (низкообогащенного урана). Один источник затрат появится из-за необходимости иметь дополнительные контейнеры для хранения и устранения хранимой МОХ, а другой связан с соответствующим размещением контейнеров. Эти дополнительные затраты оцениваются нами в 1000 долларов на кг плутония.<sup>12</sup>

Для сравнения укажем, что при стоимости производства 1800 долларов за кг тяжелого металла для МОХ-топлива<sup>13</sup>, содержащего 6.1-8.5% плутония и заменяющего НОУ-топливо стоимостью 800-1200 долларов за кг урана, затраты на использование топливной МОХ для устранения плутония составят 7100-16400 долларов на кг плутония. Конкретные затраты в пределах этого диапазона зависят от содержания плутония в МОХ-топливе и о степени обогащения НОУ-топлива, которое выводится из топливного цикла – иными словами, все зависит от проектного уровня выгорания МОХ- и НОУ-топлива. Для большего выгорания требуются более высокие степени содержания плутония или обогащения урана. Мы рассматриваем в статье уровень выгорания в пределах 43-53 МВт·день/кгТМ. Содержание плутония определяется также содержанием его делящихся изотопов, а оно уменьшается при увеличении уровня выгорания отработанного топлива, из которого возвращается плутоний. Мы предполагаем, что диапазон такого выгорания составит 33-43 МВт·день/кгТМ.<sup>14</sup> Максималь-

---

<sup>10</sup> Производство стоит 1700 евро, а остальные 150 евро – это затраты на трубы из циркониевого сплава, заглушки, пружины и т.п.

<sup>11</sup> Большая часть цены циркония реакторного качества связана с необходимостью очистки его от нейтронного яда – гафния.

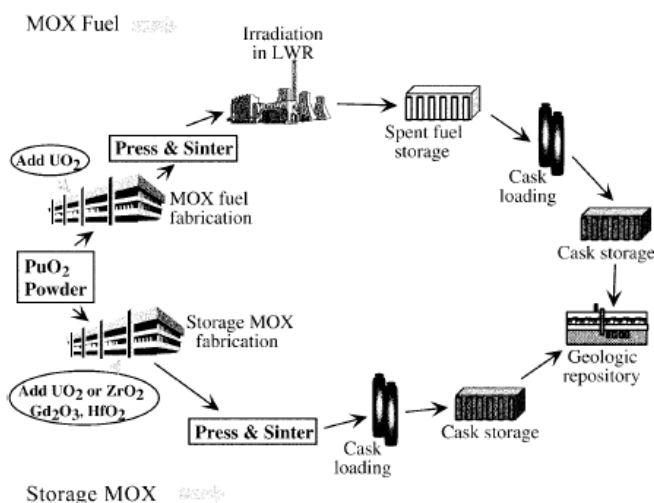
<sup>12</sup> Контейнер «Поллукс» может вместить 2360 топливных стержней для водяного реактор под давлением ( K.Janberg, H.Spikler, “Status of Development of Final Disposal and Prospects in Germany”, *Nuclear Technology* 121, February 1998, pp.136-147). Хотя хранимая МОХ будет смешиваться с отработанным ЛВР-топливом, потребуются дополнительный контейнер для каждой партии из 2360 стержней хранимой МОХ. При весовом содержании плутония в тяжелом металле, равном 15%, в таком количестве МОХ-стержней будет около 800 кг плутония. Мы считаем, что стоимость каждого контейнера составляет 0.5 миллионов долларов, а стоимость его размещения в хранилище – 0.4 миллионов долларов, что основано на оценках цены в 4.94 миллиардов долларов (в ценах 2000 г.), связанной с размещением 14768 контейнеров в геологическом хранилище Юкка Маунтин (US Department of Energy, Office of Civilian Radioactive Waste Management, Department of Energy, May 2001, DOE/RW-0533) и на оценочных затратах в 1.16 миллиардов долларов для сооружения 180 км туннелей (Report to Update Total System Life Cycle Cost Estimates for Site recommendation/License Application, TRW Environmental Safety Systems Inc. Department of Energy, TDR-CRW-SE-000001 REV 1,1999); *Analysis of the Total System Life Cycle Cost of the Civilian Radioactive Waste Management Program*, Office of Civilian Radioactive Waste Management, Department of Energy, DOE/RW-0510, 1998.

<sup>13</sup> Мы предполагаем, что затраты окажутся на 10% выше, чем приводилось для хранимой МОХ «первого поколения».

<sup>14</sup> Изотопное содержание урана и плутония в свежем и отработанном топливе при таких уровнях выгорания приведено в работе *Plutonium Fuel: An Expert Assessment* (Nuclear Energy Agency of the Organization for Economic Cooperation and Development, 1989). Так сказано, что обогащение НОУ-топлива при выгорании 43 МВт/кг составляет 3.7%. При 0.3%-ном содержании урана-235 в отбросах от обогащения необходимое количество природного урана составит 8.3 и 10.0 кг, соответственно, а потребная работа на обогащение – 4.7 и 6.1 единиц. Содержание делящихся изотопов в плутонии зависит также от сроков хранения отработан-

ные затраты в приведенном выше разбросе цен относятся к текущей практике, а минимальные ожидаются в течение ближайших десяти лет.

Если основываться на этих цифрах, то в будущем удаление плутония при помощи сгорания МОХ-топлива (при высоком уровне выгорания как первичного плутония, так и самого МОХ-топлива) окажется дешевле удаления плутония на основе хранимой МОХ. Впрочем, можно увидеть, что в странах, не обладающих адекватным выбором МОХ-топлива, затраты на удаление плутония путем хранимой МОХ окажутся сравнимыми с существующими затратами на субсидирование удаления плутония при помощи топливной МОХ. Сравнение затрат приведено в Табл.2.



**Рисунок 1:** Этапы устранения плутония в виде топлива и хранимой МОХ. Оба процесса начинаются слева ( $\text{PuO}_2$  Powder – порошок оксида плутония) и заканчиваются справа (Geologic repository – геологическое хранилище). Верхний путь – топливный: на заводе по производству топлива добавляется оксид урана, далее производится прессовка и запекание смеси, затем происходит облучение топлива в ЛВР, отработанное топливо поступает на хранение и потом загружается в контейнеры, которые помещаются на промежуточное хранение перед заложением в геологическое хранилище. Нижняя цепочка – путь хранимой МОХ: на заводе по производству МОХ к оксиду плутония добавляют оксид урана или оксиды циркония, гадолиния и гафния, после прессовки и запекания смеси она загружается в контейнеры, которые поступают на промежуточное хранение, а в конце концов направляется в геологическое хранилище.

Впрочем, оценки затрат на изготовление топлива меняются в широких пределах. Например, совсем свежие оценки правительства США по затратам на удаление 34 тонн избыточного американского оружейного плутония в виде МОХ-топлива доходят примерно до 70000 долларов на кг плутония.<sup>15</sup> Текущие оценки затрат на устранение 34 тонн избыточного рос-

ного топлива, из которого он воспроизводится, из-за короткого времени жизни (14.4 года) плутония-241. Предполагается, что время хранения до переработки составляет 10 лет.

<sup>15</sup> Около 34 тонн американского оружейного плутония должно быть переведено в МОХ-топливо при оцениваемых полных затратах около 2.4 миллиардов долларов (в постоянных ценах 2001 г.), что составляет примерно 70 миллионов долларов за тонну, даже если принять во внимание предполагаемую экономию в 733 миллионов долларов от неиспользованного НОУ-топлива. В эти затраты входят 1.4 миллиардов долларов на НИР и предварительные капитальные и строительные затраты на постройку предприятия для МОХ-производства, 1.2 миллиардов долларов на 12 лет работы и 0.5 миллиардов долларов на нештатные ситуации (мы полагаем, что эти деньги поделятся поровну между капитальными и операционными затратами). Сюда не включены дополнительные оценки в 1.7 миллиардов долларов на извлечение металлического плутония из оружейных «компонентов» и перевод его в оксид, удобный для получения МОХ. Мы не учли также «ВОУ-кредит» размером в 231 миллионов долларов, выделяемый в докладе (“Revised plutonium disposition strategy”) МОХ-

сийского оружейного плутония составляют около 44000 долларов на кг плутония.<sup>16</sup> Для такой высокой стоимости изготовления экономия средств при производстве хранимой МОХ примерно окажется сопоставимой с экономией средств на НОУ-топливо, связанных с использованием топливной МОХ. Чтобы проиллюстрировать это, мы показали в табл.2 затраты на хранимую МОХ с 10%-ным содержанием плутония в предположении, что содержание оружейного плутония в американской и российской топливной МОХ составит 5.3% и 4.4%, соответственно, и содержание делящихся изотопов в оружейном плутонии доходит до 94%. Предполагается также, что затраты на изготовление МОХ-топлива фиксированы, а все иные затраты в расчете на кг ТМ выше на 10% для хранимой МОХ по сравнению с топливной МОХ.

**Таблица 2:** Сравнение затрат на удаление плутония с помощью топливной или хранимой МОХ (в долларах на кг плутония). Во втором и третьем столбцах приведены данные по топливной МОХ (в первой строке числитель соответствует проектному значению выгорания МОХ, а знаменатель – выгоранию отработанного НОУ-топлива, из которого извлекается плутоний. Уровень выгорания указан в единицах МВт-день/кгТМ).

	Топливная МОХ		Хранимая МОХ
	53/43	43/33	
Производство	21 200	29 500	12 000
Кредит на топливо	14 100	13 100	
Стоимость контейнеров и размещения	-	-	1 000
<b>Конечные затраты</b>	<b>7 100</b>	<b>16 400</b>	<b>13 000</b>
Затраты на удаление 34 т плутония в США*	70 000		73 000
Затраты на удаление 34 т плутония в России**	44 000		27 000

\*) включая кредит на топливо в размере 22000 \$/кг.  
 \*\*) включая кредит на топливо в размере 10000 \$/кг.

## КРИТИЧНОСТЬ

Для определенности предположим, что смесь хранимой МОХ и отработанного топлива удаляются в контейнерах «Поллукс», разработанных для устранения немецкого отработанного топлива. В этих контейнерах находятся пластины из боросодержащей стали, расположенные между топливными отсеками (см. рис.2) и поглощающие нейтроны. При таких пластинах в контейнере могут храниться даже топливные стержни со свежей МОХ, имеющей содержание делящихся изотопов плутония (Pu-239 + Pu-241) до 5.3%, и они не становятся критическими при полном погружении в воду.<sup>17</sup> Пластины из боросодержащей стали могут не гарантировать долгосрочную подкритичность на завершающей стадии хранения, поскольку

предприятию от использования ВОУ, который освобождается в процессе демонтажа компонентов.

<sup>16</sup> Самая последняя оценка полных затрат составляет 1.5 миллиардов долларов, где основные затраты – 1.4 миллиарда долларов, идут на производство МОХ-топлива, хранение и перевозки (0.46 миллиардов долларов на НИР и постройку, 0.66 миллиарда долларов на работу в течение 17 лет, 0.19 миллиардов долларов на хранение и 0.12 миллиардов долларов на транспортировку). Кроме того, 300 миллионов долларов выделяются на подготовку семи российских реакторов к использованию МОХ-топлива. Эти затраты частично компенсируются оцениваемой экономией в размере 345 миллионов долларов от замены НОУ-топлива (10000 долларов на кг плутония). Сюда не включены дополнительные оценки в 310 миллионов долларов на перевод металлического плутония в оксид. *Cost Estimates for the Disposition of Weapon-grade Plutonium Withdrawn from Russian Nuclear Military Program*, Joint U.S.-Russia Working Group, March 2001, p.7.

<sup>17</sup> Janbetg, Spikler, “Status of Final Disposal Casks and Prospects in Germany”. При 5.3%-ном содержании делящихся изотопов плутония в свежем МОХ-топливе авторы получили значение  $k_{eff} = 0.84$  в мокром контейнере. Для проверки нашей модели контейнера мы провели такие же вычисления и получили величину 0.85.

бор, как ожидается, будет гораздо скорее вымываться из сборки, чем плутоний.<sup>18</sup> Впрочем, даже без бора, как показывают наши расчеты, контейнер «Поллукс» останется подкритичным при заполнении стержнями хранимой МОХ, содержащими 10% (по весу) оксида делящегося плутония, в смеси со стержнями отработанного топлива из НОУ в соотношении 1:2 (см. табл.3). Даже бесконечная гексагональная сборка из стержней хранимой МОХ в смеси со стержнями отработанного НОУ (при том же соотношении, см. рис.3) окажется подкритичной ( $k_{eff} < 1$ ).<sup>19</sup>

Может оказаться возможным добавить к хранимой МОХ поглотители нейтронов. Отличными нейтронными поглотителями являются как гадолиний, так и гафний и оба эти элемента образуют оксиды, которые совместимы по кристаллической структуре с оксидом плутония  $PuO_2$  и устойчивы к химическому вымыванию. По этой причине американский проект связывания плутония с отходами, имеющими высокий уровень активности, предлагал смешивать как гадолиний, так и гафний (примерно в одинаковом атомном соотношении) с плутонием оружейного качества в керамических формах, которые затем погружаются в стекла, содержащие высокоактивные отходы.<sup>20</sup>

Стоимость подобных нейтронных поглотителей составит при подобных концентрациях менее 1000 долларов на кг плутония.<sup>21</sup> Но экономия в процессе производства, связанная с отсутствием необходимости заботиться о критичности, должна существенно превзойти подобные расходы.<sup>22</sup> В табл.3 показано влияние добавления таких нейтронных поглотителей на критичность смеси одной трети стержней хранимой МОХ и двух третей стержней отработанного НОУ-топлива. Эффект от нейтронных ядов меньше в сухих контейнерах, поскольку такие яды лучше работают с замедляющимися до тепловых энергий нейтронами. При наличии нейтронных ядов окажется возможным надежно загружать контейнер «Поллукс» хранимой МОХ (без всяких иных примесей) без потери подкритичности.<sup>23</sup> Это обеспечивает уверенность в том, что ошибки при загрузке не приведут к возникновению аварий, связанных с появлением критичности.

---

<sup>18</sup> Смотрите, например, обсуждение проекта Юкка Маунтин в документе *Disposal Criticality Analysis Methodology Topical Report YMP/TR-004Q*, Revision 0, November 1998.

<http://www.ymp.gov/documents>,

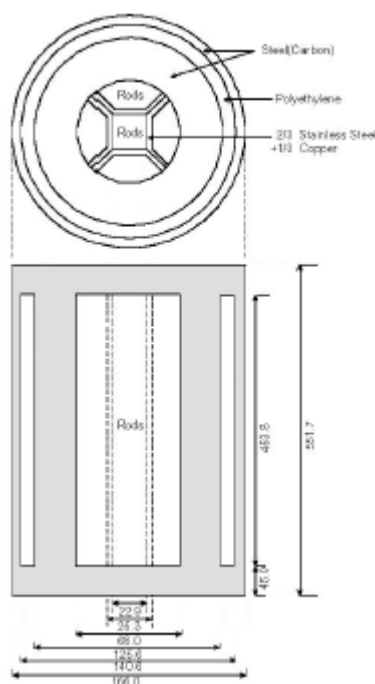
<sup>19</sup> Вычисления критичности проводились при помощи программы MCNP4 (Los Alamos National Laboratory, *Monte Carlo N-Particle Transport Code System*, Radiation Safety Information Center, document CCC-660 MCNP4B2, 1998). Считалось, что топливо находится в гексагональной решетке с расстоянием между центрами 1.17 см, обладает эффективной длиной 3.9 м, а размер газосборника ТВЭЛ равен 0.64 м; плотности НОУ и хранимой МОХ составляют 10.4 и 10.5 г/см<sup>3</sup>, соответственно (95% теоретической плотности). Считалось, что верхняя и нижняя крышки контейнера изготовлены из стали толщиной 45 и 53 см, соответственно. Диаметр топливной таблетки был выбран равным 0.91 см, а внутренний и наружный диаметры трубки из циркониевого сплава-4 – 0.93 см и 1.076 см, соответственно. Хранимая МОХ выбрана в виде смеси 15% диоксида плутония и 85% диоксида обедненного урана (0.2 % урана-235), причем изотопный состав плутония совпадает с тем, каким обладает отработанное НОУ-топливо с выгоранием 43 МВт-д/кгТМ после хранения в течение 10 лет. Начальное обогащение отработанного НОУ-топлива, перемешанного с хранимой МОХ, было выбрано равным 3.7%, а степень выгорания составила 43 МВт-д/кг.

<sup>20</sup> Lawrence Livermore National Laboratory, Westinghouse Savannah River Company, Argonne National Lab, Pacific Northwest National Lab, *Integrated Development and Testing Plan for the Plutonium Immobilization Project* [LLNL, UCRL-ID-131608, Rev.3, PIP-00-035, March 2000, <http://library.llnl.gov>], Table 2.1.

<sup>21</sup> Для одного атома каждого яда на атом делящегося плутония, или 0.66 г гадолиния и 0.75 г гафния на грамм делящегося плутония. Мы считаем, что цена гадолиния и гафния составит примерно 0.5 и 0.2 доллара за грамм, соответственно.

<sup>22</sup> Напоминаем, что оценки стоимости хранимой МОХ вырастут на 10% за стержень при возрастании уровня содержания делящегося компонента от примерно 6% до 10%.

<sup>23</sup> Расчеты критичности при полном заполнении контейнера только хранимой МОХ приводят к значениям  $k_{eff} = 0.68$  для влажного контейнера и 0.78 – для сухого. Если убрать нейтронные яды, то значения  $k_{eff}$  вырастут до 1.02 и 0.85, соответственно.



**Рисунок 2:** Конструктивные детали контейнера «Поллукс». Сверху приведено горизонтальное сечение контейнера (обозначения: углеродистая сталь, полиэтилен, нержавеющая сталь с медью в соотношении 2:1, в середине стержни). Снизу приведен радиальный разрез, где показаны внутренняя и внешняя части контейнера; снаружи располагаются стержни из замедлителя, а отработанное топливо находится в центральной части. Такая конструкция была использована при расчете критичности. Размеры указаны в сантиметрах.

## ПОСЛЕДСТВИЯ ДЛЯ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ХРАНИЛИЩ

Как уже отмечалось, для удаления плутония путем смешивания хранимой МОХ с отработанным топливом потребуются дополнительные контейнеры. Отработанное МОХ-топливо заменяет отработанное НОУ-топливо, а хранимая МОХ не заменяет отработанное топливо. Впрочем, емкость геологического хранилища в большей степени определяется теплом от радиоактивных распадов, нежели объемом сосудов с радиоактивными отходами, и в течение 500 лет после выгрузки из реактора скорость выделения тепла отработанным МОХ-топливом превышает сумму тепловыделений эквивалентных количеств хранимой МОХ и отработанного НОУ-топлива (см.рис.4). Это связано с тем, что топливная МОХ содержит больше плутония-238 (период полураспада 88 лет) и америция-241 (432 года), выделяющих заметные количества тепла<sup>24</sup>.

<sup>24</sup> МОХ-топливо, предназначенное для выгорания до уровня 43 МВт-д/кгТМ содержит примерно 4.6% делящегося плутония. Ниже приведены процентные содержания отдельных изотопов плутония в отработанном НОУ-топливе, отработанном МОХ-топливе (оба при выгорании 43 МВт-д/кгТМ) и в хранимой МОХ, изготовленной из плутония, который выделен из отработанного НОУ-топлива десятилетней давности (при том же уровне выгорания):

	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu/Am-241	Pu-242
ЛВР (отр.)	2,0	52,5	24,1	15,2	6,2
МОХ (отр.)	2,8	37,4	32,6	18,2	9,0
МОХ (хр.)	3,1	55,8	25,6	9,9	6,6

В более далеком будущем общее тепловыделение от возрастающего количества долгоживущих изотопов в хранимой МОХ и отработанном НОУ-топливе превысит тепловыделение отработанного МОХ-топлива. Это превышение составит 1.1 через 1000 лет, 1.5 через 5000



**Таблица 3:** Коэффициент размножения нейтронов ( $k_{eff}$ ) в смеси, состоящей из одной части хранимой MOX и двух частей отработанного НОУ-топлива (с нейтронными ядами и без них, с сухой и влажной смесью).

	Бесконечная решетка		2360 стержней в контейнерах с бором	
	Влажная	Сухая	Влажная	Сухая
Без ядов	0,89	0,75	0,73	0,49
С ядами	0,63	0,71	0,53	0,47

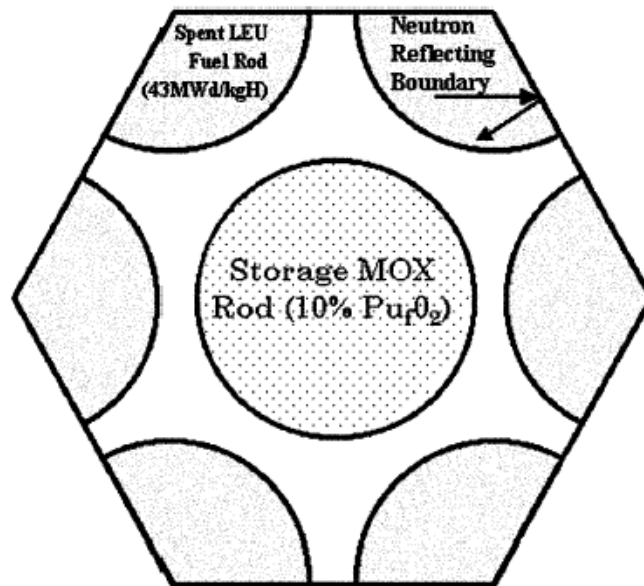
Отказ от неловкости в связи с тем, что хранимая MOX – хорошее топливо, позволяет создать такую конструкцию, где она становится еще лучшей средой для хранения плутония. Мы уже упоминали о возможности добавления нейтронных поглотителей. Окажется также возможным изготовить формы для радиоактивных отходов из химически более прочного материала, чем оксид урана  $UO_2$ . Диоксид урана быстро переходит в оксиды с большей валентностью и поэтому можно ожидать, что он относительно скоро потеряет свои качества в хранилище с окисляющей окружающей средой, характерной для разрабатываемого американского хранилища в горах Юкка Маунтин (Невада).<sup>25</sup>

Одной из химически прочных и радиационно стойких альтернатив диоксиду урана оказывается диоксид циркония ( $ZrO_2$ ). Если всерьез рассматривать хранимую MOX, то такой вариант заслуживает серьезного отношения. Придется вносить изменения в существующие установки для создания MOX, чтобы изготавливать формы для хранения на основе диоксида циркония. Важнейшим требуемым изменением окажутся прессы с более высоким давлением, преобразующие керамику в таблетки. Один из возможных компромиссов для большей стойкости циркониевых форм заключается в том, что при отсутствии добавок обедненного урана появится сильно обогащенный изотоп уран-235, который является продуктом распада плутония-239 с периодом полураспада 24 000 лет. Но не совсем ясно, будет ли плутоний в химически менее стойкой форме на основе диоксида урана оставаться связанным с ураном в течение достаточного длительного времени, чтобы смог эффективно измениться изотопный состав урана. Конечно, если повысить химическую стойкость хранимой MOX, это само по себе не решит проблему стойкости отработанного НОУ-топлива, содержащегося в формах, которые изготовлены на основе диоксида урана.

---

лет, 1.8 через 20000 лет и 1.3 через 100000 лет. Но за время от 1000 лет до 100000 лет абсолютное тепловыделение от тонны отработанного MOX-топлива упадет от 380 до 5 Вт/тМ.

<sup>25</sup> Даже при восстановительной среде в хранилище (какую создает, например, соль) могут возникать локальные условия для окисления в результате гидролиза воды в порах вблизи контейнеров с радиоактивными отходами. Поэтому возможность окисления MOX вызывает беспокойство для всех хранилищ L.H.Johnson, L.O.Werme, "Materials characteristics and dissolution behavior of spent nuclear fuel", *Bull. Materials Research Soc.*, December 1994, pp.24-27; A.Loida, B.Grambow, H.Geckeis, "Anoxic corrosion of various high burnup spent fuel samples", *Jour. Nuclear Materials*, 238,(1996), pp.11-22; B.Grambow, A.Loida, E.Smailos, J.Kim, "Geochemical assessment of actinide isolation in a German salt repository environment", *Eng. Geology*, 52, (1999), pp. 221-230.



**Рисунок 3:** Гексагональная ячейка со стенками, отражающими нейтроны, которая используется для подсчета критичности бесконечной сборки, содержащей два стержня с отработанным НОУ-топливом на один стержень хранимой МОХ. Текст в левом верхнем углу решетки указывает, что отработанное топливо соответствует выгоранию 43 МВт-день/(кгТМ). Справа указаны стенки, отражающие нейтроны. В центре находится стержень из хранимой МОХ, содержащей 10% оксида делящегося плутония.

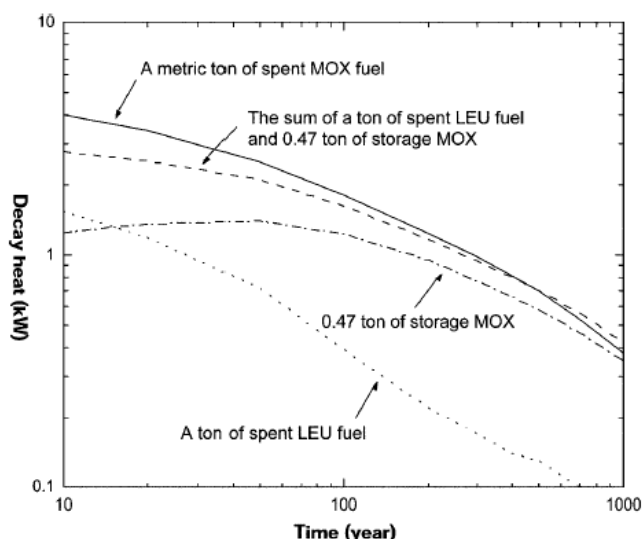
### ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЮ

Если окажется возможным открыть предназначенный для окончательного хранения контейнер, будут ли стержни хранимой МОХ отделены от стержней с отработанным топливом (с последующим извлечением плутония) гораздо быстрее, чем будет выделено такое же количество плутония из отработанного топлива? Очень похожий вопрос исследовался в 2000 г. комитетом Национальной академии наук США (НАН) в связи с предложенными в то время формами связывания американского плутония.<sup>26</sup>

В докладе НАН задавался вопрос, сможет ли террористическая группа при помощи взрывчатки быстро отделить содержащие плутоний керамические цилиндры от окружающего их стекла, содержащего ядерные отходы с высокой радиоактивностью. В случае хранимой МОХ проблема физического отделения хранимой МОХ может оказаться относительно легкой, но если стержни внешне будут неотличимы от стержней с отработанным топливом, то потребуются радиационные измерения для определения наличия или отсутствия продуктов деления, обладающих высокой радиоактивностью.<sup>27</sup>

<sup>26</sup> *Spent-Fuel Standard for Disposition of Excess Weapon Plutonium: Applications to Current DOE Options* (National Academy press, 2000), p.10.

<sup>27</sup> Один из рецензентов предположил, что можно отличать стержни хранимой МОХ от стержней отработанного НОУ-топлива по их тепловыделению. Для отработанного НОУ-топлива с выгоранием 43 МВт-д/кгТМ, пролежавшего на хранении 10 лет после выгрузки из реактора, тепловыделение составит около 1.5 Вт/кгТМ, а для хранимой МОХ – около 2.7 Вт/кгТМ. Если диаметр топливного стержня равен 1.076 см, площадь поверхности составит 380 см<sup>2</sup>/кг, значения тепловыделения отработанного НОУ-топлива и хранимой МОХ составят 0.0039 и 0.0071 Вт/см<sup>2</sup>, соответственно. Для черного тела, находящегося в равновесии с окружающей средой, которая имеет температуру 20<sup>0</sup>С, это будет соответствовать температуре 26<sup>0</sup>С в случае отработанного НОУ- топлива и температуре 32<sup>0</sup>С в случае хранимой МОХ. Измерение столь малой разницы температур в сложных тепловых окружающих условиях может оказаться более трудным, чем отождествление стержней по их гамма-излучению.



**Рисунок 4:** Сравнение количеств тепла, выделяемого при радиоактивном распаде тонны отработанного МОХ-топлива (при выгорании 43 МВт-день/кгТМ) в сравнении с суммой тепла от распада тонны отработанного НОУ-топлива (при таком же уровне выгорания) и 0.47 тонны хранимой МОХ при одинаковом содержании плутония в свежем МОХ-топливе. По оси абсцисс отложено время (в годах), по оси ординат – темпы тепловыделения (в кВт). Подписи к индивидуальным графикам (сверху вниз): 1 – Тонна отработанного МОХ-топлива; 2 – Сумма тонны отработанного НОУ-топлива и 0.47 тонны хранимой МОХ; 3 – 0.47 тонны хранимой МОХ; 4 – Тонна отработанного НОУ-топлива.

Процесс отделения можно выполнять дистанционно в большой «горячей» камере или под водой в бассейне для хранения отработанного топлива. Но если прямой подход к контейнерам, содержащим хранимую МОХ и отработанное топливо, заблокирован из-за большого расстояния или из-за других препятствий, кажется невозможным, чтобы похитители смогли достать хранимую МОХ и скрыться с ней за то время, какое будет, возможно, доступно для них.

Первой задачей для похитителей плутония, как только они проникнут через охрану и доберутся до предназначенного для хранения контейнера, станет вопрос, как его открыть. В контейнере «Поллукс» внешняя крышка, весящая около 2.7 тонны, закреплена болтами. Средняя крышка весом 0.25 тонны приварена. Наконец, внутренняя крышка, весящая почти тонну, завинчена. В обычных условиях потребуется, по крайней мере, несколько часов, чтобы открыть контейнер.

В исследовании НАН утверждается, что крышка контейнера с отработанным топливом «может быть срезана или отброшена взрывом за несколько минут». Но удаление верхней крышки приведет также к удалению радиационного экрана, которым она и является. Похитители затем столкнутся с проблемой, как вытащить хранимую МОХ в условиях мощного радиационного поля, которое, если его не экранировать, достаточно велико, чтобы обеспечить смертельную дозу за десятки минут.<sup>28</sup>

Выделение хранимой МОХ может потребовать больше времени, если заполнить пред-

<sup>28</sup> Расчетная доза на расстоянии 1 м от нижнего края сборки отработанного НОУ-топлива с выгоранием 30 МВт-д/кгТМ в водяном реакторе под давлением, пролежавшего на хранении 10 лет, составляет 630 бэр/час с учетом экранировки нижней пластиной из нержавеющей стали толщиной 1.5 см (ослабление примерно в два раза). W.R.Lloyd, M.K.Sheaffer, W.G.Sutcliffe, *Dose-Rate Estimates from Irradiated Light-Water-Reactor Fuel Assemblies in Air*, (Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-115199, 1994). Контейнер «Поллукс», заполнен на две трети отработанным НОУ-топливом, что эквивалентно 6.7 сборкам отработанного топлива. Доза, превышающая 650 рад, практически всегда оказывается смертельной даже при госпитализации и тщательном лечении. *Sources and Effects of Ionizing Radiation, Vol. 11: Effects, Annex J. "Exposures and Effects of the Chernobyl accident"* (New York: United Nations, 2000), Table 11.

назначенный для окончательного хранения контейнер веществом, которое «склеивает» его с отработанным топливом. Подходящим материалом мог бы стать легко плавящийся металл типа свинца. Подобный связывающий материал (или помещенная в него сетка) должен достаточно прочно удерживать стержни и гарантировать, что скорее поломаются их концы, прежде чем можно будет вытащить эти стержни.

Впрочем, даже при подобных дополнительных мерах владельцы хранилища могут выдвинуть хранимую МОХ достаточно быстро. Например, может потребоваться всего лишь день (или что-нибудь в этом роде), чтобы нагреть контейнер до точки плавления заполняющего вещества и вылить его это вещество. Тем не менее, хранимая МОХ в массивном контейнере и в смеси с отработанным топливом, обладающим высоким уровнем радиоактивности, оказывается предпочитаемой для бесконечного хранения выделенного плутония с учетом связанных с этим рисками для безопасности.

Кое-кто возражает против связывания плутония оружейного качества, поскольку, несмотря на облучение, оружейное качество плутония сохраняется. Это возражение иногда становится излишним, так как плутоний реакторного качества подходит для оружия.<sup>29</sup> Во всяком случае, для большинства из рассмотренных здесь случаев плутоний уже обладает реакторным качеством и поэтому возражение неприменимо. Даже для оружейного плутония можно понизить его характеристики путем смешивания с плутонием реакторного качества.

Полный анализ распространения должен принять во внимание возможность утечки при изготовлении, транспортировке и загрузке хранимой МОХ. Впрочем, соответствующий риск фактически будет таким же, как для аналогичных этапов при свежем МОХ-топливе. Этап загрузки хранимой МОХ в контейнер – это аналог загрузки свежего МОХ-топлива в активную зону реактора. Потребуется такие же средства мониторинга и безопасности.

## ПРОИЗВОДСТВО

Очевидным местом для изготовления хранимой МОХ послужат существующие предприятия для изготовления МОХ-топлива после того, как они больше не заняты основным производством. В табл.4 показаны существующие и планируемые установки для изготовления МОХ-топлива. Сроки деятельности старых предприятий (бельгийский завод Дессель и французский Кадараш) приближаются к завершению, а предприятие Кадараш в любом случае должно быть закрыто из-за сейсмической опасности. Компания «Кожема» стремится получить лицензию на расширение производительности своего относительно нового завода Мелокс, чтобы компенсировать закрытие двух более старых предприятий. Английский завод в Селлафилде недавно получил лицензию на производство.<sup>30</sup> Япония собирается построить завод для производства МОХ, чтобы удалять плутоний, выделенный на перерабатывающем заводе Роккашо.<sup>31</sup>

При работе на полную мощность английский завод в Селлафилде сможет через семь лет переработать в хранимую МОХ 115 тонн гражданского плутония, которые Англия планирует накопить к 2010 г. Впрочем, придется предусмотреть радиационный барьер для отработанного топлива от нового газового реактора, которое будет отличаться от ЛВР-топлива (а именно на него спроектирован завод в Селлафилде). Это может облегчить задачу для террористов, пытающихся выкрасть стержни хранимой МОХ, и поэтому увеличивает предпочтение «склеиванию» стержней хранимой МОХ и отработанного топлива. Предлагаемый российский завод сможет аналогично связать 50 тонн российского гражданского плутония примерно за четыре года. Если сохранится безвыходная ситуация с загрузкой МОХ-топлива в

---

<sup>29</sup> Дж. Карсон Марк, «Взрывные свойства реакторного плутония», *Наука и всеобщая безопасность*, т.4, вып.1 (январь 1994 г.); *Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium* (Washington, DC: National Academy Press, 1994), p.32; *Nonproliferation and Arms Control Assessment of Weapons-usable Fissile Material Storage and Excess Plutonium Alternatives* (U.S. Department of Energy, 1997), p.37.

<sup>30</sup> «Cogema aims to close Cadarache soon, move MOX fuel fabrication to Melox», *Nuclear Fuel*, April 2, 2001; «Cogema hopes to increase throughput at Melox VOX fuel fabrication plant», *Nuclear Fuel*, April 30, 2001; «U.K. decision to allow SMP to operate prompts Irish, Norwegian objections», *Nuclear Fuel*, Oct. 15, 2001.

<sup>31</sup> «MOX Plant Construction Plan», *Nuke Info Tokyo*, Jan./Feb. 2001.

японские энергетические реакторы, то японские электростанции могут оказаться более заинтересованными в хранимой МОХ.

**Таблица 4:** Производительность изготовления хранимой МОХ на имеющихся и планируемых предприятиях для изготовления МОХ-топлива (А – количество тяжелого металла (ТМ) в топливе; В – плутоний реакторного качества (15% от ТМ)).

Предприятия (статус)	Производительность (т/год)	
	А	В
<b>СТАРЫЕ</b>		
Бельгия: Дессел (1973-)	35	5
Франция: Кадараш (1970-)	40	6
<b>НОВЫЕ</b>		
Франция: Мелокс: (1995-)	115 – 195?	18-29?
Англия: Селлафилд (2002-)	120	18
<b>ПЛАНИРУЕМЫЕ</b>		
США: Саванна (2007?)	50	7,5
Россия: МОХ ФФФ (2007?)	90	13
Япония: Роккашо (2008?)	130	20
Plutonium and Highly Enriched Uranium 1996, p. 197, за исключением последней информации, указанной в тексте.		

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом того факта, что всего небольшое число зарубежных энергетических компаний заключают новые контракты с английскими и французскими перерабатывающими компаниями, а сами они вряд ли захотят нести достаточно долго тяжесть поддержки национального перерабатывающего комплекса, скоро начнет иссякать поток только что выделенного плутония. Тогда окажется больше шансов обратить внимание всего мира на важность ликвидации существующих арсеналов выделенного плутония. В этом контексте хранимая МОХ кажется жизнеспособным вариантом для стран с большим запасом выделенного плутония, у которых нет прямого доступа к возможности удаления МОХ-топлива. Относительно небольшое число существующих и планируемых предприятий для производства МОХ-топлива сможет относительно быстро справиться с подобными «осиротевшими» запасами плутония.