

ОПАСНОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЛЯ ПОДЗЕМНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ ПЛУТОНИЯ

Эдвин С. Лайман и Харольд А. Фейвесон

Отдельные наблюдатели указали недавно на опасность того, что хранилища отработанного топлива могли бы в конечном итоге стать относительно дешевыми источниками делящегося материала для ядерного оружия, то-есть, плутониевыми "залежами". Впрочем, диапазон условий, при которых разработка хранилищ будет выглядеть привлекательной по сравнению с другими возможностями приобретения плутония, оказывается очень узким.

Добыча значимых количеств плутония займет несколько месяцев, как минимум, и ее без труда обнаружат, если места захоронения находятся под разумным контролем. В любом случае, если не помещать отработанное топливо в подземные хранилища, а оставлять его на временное хранение для последующей переработки, когда плутоний и другие актиниды выделяются и преобразуются, то это направление само по себе приводит к значительной опасности несанкционированного использования плутония или его хищения.

Эдвин С. Лайман - научный руководитель Института ядерного контроля в Вашингтоне, округ Колумбия, США. Харольд А. Фейвесон - старший исследователь Центра по изучению энергетики и окружающей среды Принстонского университета, США.

ВВЕДЕНИЕ

Подземные хранилища являются запланированным местом для размещения большей части всемирных запасов отработанного ядерного топлива от коммерческих ядерных реакторов и, по крайней мере, части плутония, изытого из снятых с вооружения ядерных боеголовок. Общественное обсуждение этих вопросов концентрируется главным образом на экологических аспектах таких хранилищ. Однако возникают и вопросы ядерного нераспространения. Отдельные наблюдатели недавно привлекли внимание к опасности того, что подобные хранилища могли бы в конечном счете стать "плутониевыми залежами" - относительно недорогими источниками делящегося материала для ядерного оружия¹. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ) признает такую возможность и, как ожидается, потребует сохранения контроля за хранилищами отработанного топлива навечно.

Но отдельные аналитики полагают, что хранилища нельзя надежно контролировать в течение длительного времени, и поэтому считают неразумным простое удаление содержащих плутоний веществ под землю. Вместо этого они поддерживают идею содержания этих веществ на охраняемых временных складах с одновременным продолжением разработок гипотетических технологических подходов, дающих возможность полного уничтожения запасов плутония путем сжигания их в ядерных реакторах².

При анализе опасностей от добычи плутония предполагалось, что длительный контроль за подземными хранилищами может быть, по крайней мере, столь же эффективным и надежным, какой необходим в любом случае на других ядерных установках. Наоборот, схемы уничтожения плутония связаны с более высокой опасностью распространения и поэтому потребуют значительно более широкого и дорогого контроля.

Хотя нельзя полностью исключить вероятность того, что в один прекрасный день может начаться разработка подземного хранилища с целью приобретения плутония, это совсем не является поводом для отказа от его прямого удаления. Имеющиеся (и постоянно растущие) запасы плутония во всем мире представляют опасность с точки зрения распространения ядерного оружия на длительные сроки независимо от того, останутся ли они на наземных складах или же будут захоронены под землей. Впрочем, этот риск можно свести к минимуму, если идти по последнему пути. Окажется ли конечный риск достаточно малым, чтобы по нему можно было судить о выгодах непрерывного производства ядерной энергии, это тот вопрос, на который надо направить внимание общества.

СТОИМОСТЬ ДОБЫЧИ ПЛУТОНИЯ

Отработанное топливо от промышленных реакторов

обладает высокой радиоактивностью и содержит значительное количество (примерно один весовой процент) долгоживущих изотопов плутония, которые можно использовать в оружии. Наличие в отработанном топливе гамма-активных продуктов деления (например, Cs-137) делает необходимыми защиту людей от отработанного топлива толстым экраном и возможность работы с ним методами дистанционного управления. Эту особенность отработанного топлива называют "самозащитой".

Ряд стран, включая США, Канаду и Швецию, планируют удалять отработанное топливо прямо в подземные хранилища. Другие страны, например, Франция и Великобритания, перерабатывают свое топливо, отделяя химическим путем плутоний от урана и продуктов деления. Очищенный плутоний, с которым можно обращаться непосредственно, гораздо более уязвим с точки зрения несанкционированного использования и хищения, так что для его защиты требуются более строгие меры контроля и безопасности.

Отработанное топливо примерно в течение столетия после помещения в хранилище будет сохраняться в виде, допускающем его извлечение. После этого туннели для подхода и вентиляционные шахты будут засыпаны и опечатаны, а вспомогательное оборудование будет демонтировано. После закрытия хранилища возврат помещенного в него материала (в принципе, это еще возможно) станет более трудным и дорогим, а также потребует больше времени.

Опасение, что хранилища станут со временем "плутониевыми залежами", возникает, в основном, в результате двух факторов. Во-первых, необходимые для возврата из хранилища отработанного топлива время и усилия (хотя они и значительны) могут оказаться благоприятными по сравнению с другими путями, по которым страна может приобрести отработанное топливо, т.е. "руды", из которой можно извлечь плутоний. Во-вторых, в результате относительно короткого (30 лет) периода полураспада Cs-137 радиационный барьер вокруг отработанного топлива снизится в течение нескольких столетий после изытия из реактора до небольшого уровня, так что можно будет обращаться со старым отработанным топливом с меньшим риском подвергнуться радиационной опасности.

Пути для возврата отработанного топлива из запечатанного хранилища обсуждались в работах для Международной оценкитопливного цикла (INFCE) в 1979 г.³. Вообще говоря, они повлекут за собой сборку оборудования на месте работ, сооружение новых вспомогательных наземных установок и систем для обращения с активным топливом, бурение новых туннелей и использование соответствующих методик для безопасного выкапывания отработанного топлива и подъема его к поверхности. Фактическая стоимость такой деятельности будет зависеть от желательных темпов получения плутония и конкретных деталей конструкции хранилища. В данной статье принимается уровень годовой добычи

плутония в 100 кг, чего в случае необходимости хватит для 10-12 ядерных боеголовок.

Работы по INFCE определили две стратегии разработки хранилищ. Первая заключается в попытке определить положение нескольких канистр с отработанным топливом путем бурения скважин небольшого диаметра в районе хранилища. Вторая, которую INFCE считает заслуживающей большего доверия, но в какой-то степени более дорогой, связана с восстановлением начального подземного хранилища. Действительно, страна, которая ищет плутоний для крупной оружейной программы, скорее предпочтет последний подход, поскольку он устанавливает длительный источник поступления материала.

Восстановление хранилища повлечет значительные объемы горных работ, сравнимые с затраченными на его начальное создание. В настоящее время крупные подземные горные работы требуют обычно капитальных затрат в сотни миллионов долларов⁵ и сроков в 2-5 лет до начала производства. Например, затраты на создание подземного шведского хранилища с ежегодной загрузкой около 280 тонн отработанного топлива (содержащего 2,8 тонн плутония) оценивались примерно в миллиард долларов⁶. Для получения 100 кг плутония в год это сводится к стоимости свыше ста миллионов долларов.

Недавно было высказано предположение, что в результате успехов в технологии машин для проходки туннелей (МДПТ) первый из сценариев INFCE сегодня более правдоподобен, так что значительное количество плутония можно будет вернуть из хранилища за несколько месяцев при затратах менее 10 миллионов долларов, если просто бурить туннели небольшого диаметра⁷. Например, как следует из современного проекта предложенного американского хранилища в Юкка Маунтин (Невада) возврат одной заложенной канистры принесет улов в 10 тонн отработанного топлива, в котором содержится 100 кг плутония.

Однако, эта оценка не принимает во внимание тот факт, что проходчикам придется скорее всего проделать несколько туннелей, чтобы наткнуться на канистру с отработанным топливом (это указано в работах по INFCE). Например, в хранилище Юкка Маунтин будет находиться около 10 000 канистр, расположенных в одном слое на площади свыше 500 га⁷. При таком расположении вероятность наткнуться на канистру при бурении туннеля диаметром 3,6 м перпендикулярно к плоскости хранения составляет только 2%. Вряд ли будет реально искать уровень заложения в хранилище при помощи МДПТ, так что если первый туннель не наткнется на канистру, то у проходчика не будет иного выбора, как начать все снова. Таким образом, в среднем понадобится проложить 50 туннелей, чтобы найти одну канистру. При обычной стоимости прокладки туннелей в 5000 долларов/метр один туннель длиной в 1 км с диаметром 3,6 м обойдется в пять миллионов долларов, а пятьдесят таких туннелей будут стоить 250 миллионов долларов. При средней скорости проходки 30 м/день на завершение каждого туннеля уйдет примерно месяц, но поскольку в операцию проходки входит период освоения в 5-10 недель до выхода на полный уровень производительности, а подготовительный период может занять от 2 до 12 недель, то более реалистичная оценка требуемых сроков составит 3-6 месяцев. При последовательной проходке на отыскание первой канистры может уйти несколько лет. Параллельная проходка туннелей может ускорить процесс, но потребует одновременно приобретения и использования многих МДПТ, что значительно увеличит затраты и требования к персоналу, сделав операцию к тому же не столь скрытной. Таким образом, даже при использовании современных МДПТ такой подход явно не станет более привлекательным по сравнению со вскрытием хранилища.

СТАНДАРТ ПРОИЗВОДСТВА МАТЕРИАЛА

Выберет ли страна-нарушитель режима нераспространения вариант разработки хранилища, зависит от того, как это предприятие может выглядеть на фоне других доступных путей приобретения плутония или высоко-

обогащенного урана. Вехой в оценке способности конструкции хранилища препятствовать попыткам распространения является "стандарт производства материала". Планы долгосрочной организации ядерных отходов, содержащих делящиеся материалы, должны быть составлены таким образом, чтобы нарушители осознали следующее: возратить делящийся материал будет по существу так же трудно, как получить его из наименее доступного альтернативного источника (например, путем нового производства)⁸. Если этому вопросу уделяется внимание, должно оказаться нетрудным так спроектировать хранилище, чтобы удовлетворить данному стандарту с разумной уверенностью.

Стандарт производства материала является консервативным, так как похоже, что в будущем появятся более легкие пути для получения делящихся материалов, чем новое их производство. В странах с работающими ядерными реакторами всегда будут в наличии готовые партии отработанного топлива либо на временных складах, либо в активных зонах реакторов. Разработка закрытого хранилища была бы гораздо менее привлекательной, чем кража отработанного топлива из существующего топливного цикла. В странах, где работают установки по переработке топлива или имеются запасы выделенного плутония, выбор гораздо более очевиден.

Если бы в конечном итоге ядерная энергетика и ядерное оружие оказались ликвидированными, можно рассматривать обстановку по-иному. В "безъядерном мире" разработка хранилищ могла бы стать привлекательной для получения отработанного топлива, так как единственной альтернативой станет производство нового материала с самого начала. Такой путь, куда входят добыча урана, переработка его в топливо, создание промышленных реакторов для получения плутония и управление их работой, без сомнения, оказывается дорогим и требующим больших сроков.

В соответствии с данными Управления по технологическим оценкам программа, рассчитанная на получение в течение года отработанного топлива, где будет содержаться 100 кг плутония, на основе реактора с тепловой мощностью 400 мегаватт, потребует капитальных вложений в диапазоне 350-800 миллионов долларов при сроках сооружения 5-7 лет⁹. Впрочем, если приложить особые усилия, то время на разработку производства 100 кг плутония в год можно сократить и до двух лет, как это было в случае проекта "Манхэттен"¹⁰, но при более высоких затратах (2 миллиарда долларов в ценах 1992 г.).

Следует также рассмотреть возможность производства высоко-обогащенного урана (ВЭУ) - другого материала, используемого в ядерном оружии. Оценка затрат на установку с центрифугой, способную получить 300 кг ВЭУ в год (с оружейной точки зрения это примерно эквивалентно сотне кг плутония), дает величину в интервале 100-500 миллионов долларов. Хотя эти затраты кажутся близкими к тому, что требуется для производства плутония, цена производства ВЭУ более чувствительна к техническим новациям, так что можно ожидать ее значительного уменьшения в будущем.

Как только нарушители режима нераспространения завладеют отработанным топливом или из хранилища, или в результате нового производства, им потребуются завод химического разделения для извлечения и очистки плутония. Цена такой установки будет зависеть от ее производительности и степени радиационной защиты, которую она может обеспечить.

Из-за относительно низкого уровня самозащиты после нескольких сотен лет хранения отработанное топливо не нуждается в массивных экранах и его можно обрабатывать даже в "перчаточных камерах", а не на предприятиях с дистанционным управлением. Было высказано предположение, что это станет серьезным стимулом к разработке старых хранилищ вместо того, чтобы создавать новое отработанное топливо.

Впрочем, такое преимущество не является решающим. Если использовать стандарты защиты от слабого излучения, то стоимость постройки элементарной установки для ежегодного извлечения 100 кг плутония из реакторного топлива с возрастом 150 дней можно пони-

зять до 50-150 миллионов долларов, что составит только часть расходов на приобретение отработанного топлива. Оценки сроков создания небольшого разделительного завода занимают диапазон от полугода до четырех лет.

Более того, даже после угасания Cs-137 участвующим в добыче и обработке старого отработанного топлива рабочим все еще будет требоваться защита от заметной радиобиологической опасности, связанной с долгоживущими радионуклидами, например, от проникающего нейтронного излучения, вдыхания альфа-частиц и возможных аварий в результате достижения критичности.

В мире, свободном от ядерного оружия (независимо от того, вскрывается ли хранилище или организуется новое производство), налаживание производства плутония на уровне 100 кг/год скорее всего потребует капитальных вложений порядка нескольких сот миллионов долларов и подготовительного периода порядка двух лет, если рассчитывать на современные технические возможности. Новые технологические разработки смогут облегчить борьбу из указанных путей.

Если нужны более высокие темпы производства, сравнимые с тем, что было достигнуто во время наибольшего подъема уровня холодной войны (несколько тонн плутония в год), вскрытие хранилищ может оказаться более эффективным путем, нежели строительство требуемого числа промышленных реакторов. Это несоответствие можно скорректировать путем изменения отдельных проектных параметров хранилища, например, расстояния между канистрами с отходами или глубины захоронения, чтобы повысить расходы на возврат отработанного топлива. Впрочем, такие изменения тоже имеют тенденцию сделать захоронение более дорогим, так что нет ясности в вопросе о том, будет ли соответствующее уменьшение риска стоить подобных затрат.

РОЛЬ ДОЛГОСРОЧНОГО КОНТРОЛЯ

В соответствии с основными направлениями деятельности МАГАТЭ контроль за делящимися материалами нельзя прекращать до тех пор, пока МАГАТЭ само не определит, что материал больше не может быть использован для любой ядерной деятельности или что его "практически нельзя вернуть". Группа советников МАГАТЭ пришла в 1988 г. к выводу, что последнее понятие никогда и нигде нельзя применить к отработанному топливу, даже после запечатывания хранилища. Эта группа рекомендовала МАГАТЭ не прекращать контроль за отработанным топливом¹¹. Как ожидается, МАГАТЭ потребует, чтобы гарантии к хранилищам отработанного топлива применялись бесконечно долго - такое определение кажется оправданным. Вскрытие хранилища не станет быстрой или тихой операцией, но ее можно провести. Впрочем, для гарантий, эффективно сдерживающих вскрытие, не требуются дорогие и интрузивные инспекции. Этот контроль можно сосредоточить на процедурах сохранности и наблюдения, включая дистанционное наблюдение со спутников.

Требование бесконечно долгих гарантий для хранилищ может показаться нереальным и необычным, а также обременительным для последующих поколений, но оно разумно. Если ядерная энергетика будет продолжать действовать, хранилища станут одним из многих типов установок, которые придется ставить на гарантии. Если ядерная энергетика затухнет, то международной общественности кроме контроля за хранилищами придется проверять отсутствие тайного производства материалов, которые можно применять для создания оружия. В самом деле, задача проверки известного числа хранилищ была бы гораздо более прямолинейной, нежели проверка отсутствия скрываемой деятельности, которая может существовать фактически в любом месте.

Помещение отработанного топлива под землю фактически снизит будущие заботы о гарантиях. Уязвимость отработанного топлива к несанкционированному использованию или к хищению будет возрастать по мере уменьшения радиационного барьера. Если отработанное топливо содержится в течение бесконечно длительного

периода на хранении, откуда его можно взять, то меры контроля и безопасности должны ужесточаться со временем. С другой стороны, помещение постаревшего отработанного топлива в запечатываемое хранилище создаст геологический барьер для компенсации ослабшего радиационного.

С точки зрения современной практики гарантий, два эти барьера по существу эквивалентны. МАГАТЭ при установлении своих целей для своевременного обнаружения утечки ядерного материала считало, что плутоний, находящийся в облученном топливе, можно превратить в готовые оружейные компоненты в течение 1-3 месяцев; для плутония из необлученных смесей (старое отработанное топливо попадет в эту категорию) соответствующий срок, как предполагается, составит 1-3 недели¹². Даже при наиболее оптимистических предположениях о характеристиках МДПТ очень маловероятно, чтобы похититель смог вынуть старое отработанное топливо из запечатанного хранилища и превратить его готовые компоненты меньше, чем за месяц. Поэтому задачи МАГАТЭ по своевременному обнаружению утечек облученного топлива можно с таким же успехом использовать для гарантий запечатанных хранилищ.

ЧТО ДЕЛАТЬ С ПЛУТОНИЕМ: ЗАХОРОНИТЬ ИЛИ СЖЕЧЬ?

Гленн Сиборг - типичный представитель тех, кто обращается к аргументу о "плутониевых залежах" для оправдания извлечения плутония из отработанного топлива. На заседании Американского ядерного общества (АЯО) в Сан-Франциско (1995 г.) он обрушился на "широко распространенное предположение о том, что можно избежать опасностей распространения, если оставить отработанное топливо в покое", аргументируя это тем, что "те, кто выступает за хранение отработанного топлива, ... совсем необязательно находятся в выгодном положении при спорах о нераспространении"¹³.

Но если не помещать отработанное топливо в хранилище, что тогда? Как говорится в докладе группы АЯО под председательством Сиборга, "...через длительное время... риск распространения плутония может быть полностью устранен только путем его потребления в качестве ядерного топлива"¹⁴. На самом же деле, если отказаться от экзотических альтернатив (например, заброса плутония на Солнце), то основной альтернативой подземному захоронению остается претенциозная процедура, которую называют РИТ (разделение и трансмутация). Операция РИТ направлена на уничтожение долгоживущих радионуклидов (в том числе плутония, более тяжелых актиноидов и отдельных продуктов деления) путем извлечения их из отработанного топлива и последующего деления или развала в ядерном реакторе или в устройстве, управляемом ускорителем заряженных частиц¹⁵.

Осуществление РИТ приведет к действительно крупномасштабной переработке и повторной загрузке. Например, рассмотрим, что будет связано с обработкой американского запаса отработанного топлива, который сейчас содержит около 35 000 тонн и растет со скоростью примерно 2000 тонн/год. Переработка такого количества материала потребовало бы четырех предприятий, каждое из которых не уступает по размеру английскому перерабатывающему заводу THORP, если считать, что завод может работать в течение 40 лет.

Поскольку на каждую тонну отработанного топлива легководного реактора приходится около 10 кг трансуранов (плутоний, нептуний и более тяжелые актиноиды), системе РИТ придется обработать запас накопленных трансуранов массой 350 тонн плюс по 20 тонн/год в дальнейшем. За сорокалетний период активной деятельности реактор на быстрых нейтронах с охлаждением жидким металлом, обладающий электрической мощностью 1.4 ГВт, поглотит около 30 тонн трансуранов (при эффективности конверсии 0.62). Если допустить, что производительность американских легководных реакторов не изменится в течение 40 лет, то программе РИТ потребуется около 40 реакторов на быстрых нейтронах.

Поскольку в отработанном топливе быстрого реактора останется еще достаточно много трансуранов, топливо придется перерабатывать, а выделенные трансураны снова направлять в процесс. В зависимости от того, насколько хотят разрушить трансураны, процесс РИТ может занять от сотен до тысяч лет.

Кроме заводов по переработке и реакторов, системы РИТ будут содержать целый набор дополнительных установок для изготовления плутониевого топлива, обращения отходов, их обработки и хранения, а также многочисленные транспортные связи. Такой беспрецедентный масштаб деятельности будет исключительно трудно и дорого ставить на гарантии. Если даже придумать технологии, при которых плутоний в течение всего топливного цикла будет номинально оставаться в смеси с продуктами деления, всегда можно перестроить процесс для очистки плутония.

Поэтому, меры контроля над системами РИТ следует поддерживать постоянно, как и над хранилищами отработанного топлива. Более того, гораздо больше забот будет с системами РИТ как из-за числа установок, так и в связи с используемыми методами контроля. Гарантии над установками, имеющими дело с большими массами сырья, например, над перерабатывающими предприятиями, основаны на методах учета материалов, так что они по своей сути менее надежны и их труднее использовать, чем процедуры наблюдения за сохранностью, несомнимые для контроля за хранилищами. Если даже в отдаленном будущем опасность добычи плутония станет значительно меньше благодаря системам РИТ, это преимущество нельзя сравнить с риском распространения и экологическими опасностями в ближайшее и не столь отдаленное время от переработки и перезарядки топлива.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом вышесказанного, диапазон условий, при которых вскрытие хранилищ будет казаться привлекательным по сравнению с иными методами приобретения плутония, оказывается очень узким.

В странах с ядерными топливными циклами вскрытие хранилищ будет менее привлекательным по сравнению с другими, более прямыми путями получения пригодного для оружия материала. В мире без ядерного оружия добыча очень больших количеств плутония из хранилищ может оказаться более быстрой и дешевой, чем путь производства, хотя с учетом неопределенностей развития технологий трудно провести имеющие смысл сравнения. Как минимум, добыча значительных количеств плутония займет несколько месяцев и ее можно будет легко заметить, если площадки для хранения находятся под разумными гарантиями. Во всяком случае, если отработанное топливо не помещать в хранилища, а оставлять на не полностью закрытых складах и в конечном итоге обрабатывать по программе РИТ, подобный подход сам по себе породит заметный риск утечки или кражи плутония.

По этим причинам последние предложения сократить усилия по разработке подземных хранилищ в США заслуживают сожаления, так как они могут на десятилетия отложить перемещение отработанного топлива с временных складов в США и за рубежом. Подземные хранилища могут не быть идеальным решением проблемы ядерных отходов, но это наименее рискованный из доступных сейчас выборов для запасов отработанного топлива и плутония, которые уже произведены во всем мире.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Swahn, J., The Long-Term Nuclear Explosives Predicament, Technical Peace Research Group, Institute of Physical Resource, Chalmers Institute of Technology Goteborg, Sweden, (1992).
2. Downman, C., цитировано в работе B.Hileman, "Hard Choices for Nuclear Energy", Chem. Eng. News, 24, (October 28, 1996).
3. Материалы делегации США на седьмой рабочей группе совещания по международной оценке ядерного топливного цикла, "Safeguards for Geologic Repositories", INFCE/DEP/WG.7/18, МАГАТЭ, ена, (1979).
4. Peters, W.C., Exploration and Mining Geology, (John Wiley and Sons, New York, 1987).
5. Агентство по ядерной энергии, Организация по экономическому сотрудничеству и развитию (OECD), The Cost of High-Level Waste Disposal in Geologic Repositories: An Analysis of Factors Affecting Cost Estimates, (OECD, Paris, 1993).
6. Peterson, P.R., Science & Global Security, Vol.6, (1996), pp.1-29.
7. TWR Environmental Safety Systems, Strategy for Waste Containment and Isolation for the Yucca Mountain Site, (TESS, Las Vegas, NV, 1995).
8. Lyman, E.S., Final Proceedings of the U.S. Department of Energy Plutonium Stabilization and Immobilization Workshop, CONF-951259, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., (1995).
9. U.S. Congress, Office of Technology Assessment, Technologies Underlying Weapons of Mass Destruction, OTA-BP-ISC-115, (U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 1993).
10. Cochran, T., W.Arkin, R.Norris and M.Hoenig, Nuclear Weapons Databook, Vol.II: U.S. Nuclear Warhead Production, (Ballinger, Cambridge, MA, 1987).
11. Linsley, G. and A.Fattah, IAEA Bulletin, Vol.2, (1994), pp. 22-26.
12. МАГАТЭ, IAEA Safeguards Glossary, 1987 Edition, IAEA, Vienna, (1987).
13. "Burying Spent Fuel is Not the Best Approach to Non-Proliferation, Seaborg Tells ANS", Spent Fuel, Vol.2, (November 6, 1995).
14. Американское ядерное общество, Protection and Management of Plutonium, American Nuclear Society, La Grand Park, IL, (1995).
15. Комитет по разделительной технологии и системам трансмутации (STATS), Национальный исследовательский совет, Национальная академия наук США, Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation, (National Academy Press, Washington, D.C., 1996).