

ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗБАВИТЕЛЕЙ ПРИ ОСТЕКЛЫВАНИИ ПЛУТОНИЯ ОРУЖЕЙНОГО КАЧЕСТВА

Кори В.Бадлонг Сильвестер и Скотт А.Симонсон

Был проведен технический анализ для определения осуществимости и практичности остекловывания плутония оружейного качества с различными разбавителями. В качестве разбавителей рассматривались плутоний реакторного качества и отдельные редкоземельные элементы. Использование таких разбавителей могло бы повлиять как на применимость материалов для оружия, так и на долговременную безопасность для окружающей среды.

Разбавление оружейного плутония реакторным только слегка увеличило бы его критическую массу в сжатом состоянии, но при разбавлении выросла бы вероятность преждевременной детонации. Разбавление редкими землями (наиболее эффективен европий) обладало бы высокой эффективностью с точки зрения увеличения критической массы в сжатом состоянии.

Кроме эффективного увеличения критической массы, редкоземельные элементы изучались в качестве инструментов контроля за критичностью благодаря своим способностям поглощать нейтроны и нерастворимости в водосодержащей окружающей среде. Торий (в качестве замены плутония) и редкоземельные элементы Eu, Gd и Sm были добавлены к двум стандартным сортам стеклокерамики (ARM-1 и SRL-165) с последующим вплавлением в стекло. Были проведены водные испытания по выщелачиванию для измерения степени растворимости редких земель и определения влияния добавленных элементов на стойкость стекла. Европий гораздо меньше выщелачивается из испытанных стекол, чем бор. Добавленные элементы не вызывают отрицательного воздействия на прочность стекол, испытанных при температуре 90 °C, с точки зрения окружающей среды. В структурах ARM-1, содержащих многочисленные продукты индуцированного деления, не обнаружено выделения этих продуктов наружу.

К.Сильвестер - кандидат наук, сотрудник инженерно-ядерного отделения Массачусеттского технологического института. С.Симонсон - старший научный сотрудник Кнолловской лаборатории по атомной энергии, Шенектэди, Нью-Йорк.

ВВЕДЕНИЕ

Крупномасштабный демонтаж ядерных боеголовок в США и России вызывает во всем мире тревогу по поводу безопасности. Нетронутые компоненты из оружейного плутония могут быть заново установлены в боеголовки или могут попасть (в принципе, по каналам черного рынка) в руки террористов. Хотя часть плутония, вероятно, будет храниться в качестве резерва (нет опубликованных данных о том, какая именно), существует широко распространенная уверенность в том, что весь "избыточный" оружейный плутоний следует переработать в такую форму, которая делает его менее привлекательным в качестве взрывчатки и обеспечивает поэтому дополнительную защиту от несанкционированного использования, превосходящую институциональные преграды двусторонних и международных мер предосторожности¹.

Национальная академия наук США опубликовала доклад, где рекомендует принять стандарт отработанного топлива для долгосрочного распоряжения плутонием оружейного качества². Это означает, что в своем окончательном виде полученный из оружия плутоний должен быть "примерно столь же недоступным для использования в оружии, как и гораздо больший и все растущий запас плутония в гражданском отработанном топливе". Академия наук далее определила сжигание в реакторах и остекловывание вместе с высоко радиоактивными отходами в качестве двух наиболее обещающих альтернатив, удовлетворяющих этому критерию³.

Пока что большая часть исследований по распоряжению плутонием была сосредоточена на решениях с использованием его в качестве топлива в реакторах⁴. Меньше внимания уделялось изучению вариантов хранения, например, остекловыванию. Данная статья исследует потенциальную роль остекловывания в распоряжении плутонием и представляет соответствующие технические данные для тех, кто принимает решения.

График осуществления остекловывания, затраты и барьеры на пути к распространению делают остекловывание конкурентоспособным по сравнению с реакторными вариантами. Более того, у остекловывания больше гибкости, поскольку состав стекла можно подобрать для удовлетворения соответствующих задач правительств России и США. Например, можно так оптимизировать конструкции стекол, чтобы возвращение плутония неправительственными организациями было бы затруднено, а у правительств (с их огромными ресурсами) все же оставалась возможность вернуть этот материал, если бы он стал экономичным топливом. Такой подход может оказаться более приемлемым для русских и тем самым он ускорит процесс распоряжения плутонием.

В этом духе мы исследовали "чистое" стекло (без продуктов деления), которое химически растворяет плутоний

внутри монолитной матрицы. Хотя стекло без отходов с высоким уровнем радиоактивности (ОВУР) не будет соответствовать "стандарту отработанного топлива" (СОТ), оно предоставит США и России гибкость для добавления ОВУР в будущем или для возвращения материала, чтобы выйти за пределы СОТ. Кроме того, к самому процессу и конечному продукту легко применять меры предосторожности и физической безопасности, что обеспечивает сильное препятствие против несанкционированного использования на субнациональном уровне.

В дальнейшем мы исследуем (теоретически) некоторые последствия химических добавок для безопасности и (экспериментально) последствия для окружающей среды (с ОВУР и без них).

ОРУЖИЕ ИЗ ПЛУТОНИЯ

Предполагаемая цель любой обработки оружейного плутония состоит в том, чтобы помешать материалу быть использованным снова в виде оружия. Требуется понимание конструкции плутониевых вооружений для продвижения к этой цели.

По существу, действие ядерного оружия заключается в том, что взятый в подкритическом состоянии расщепляющийся материал быстро переводится в сверхкритическое состояние. Подкритическая система не выделяет значительной энергии (сверх энергии радиоактивного распада). Но оружие в сверхкритическом состоянии выделяет энергию со скоростью, которая экспоненциально растет со временем⁵. В оружии имплозийного типа переход в новое состояние достигается путем увеличения плотности активного материала (либо плутония, либо высокообогащенного урана) под действием обычной взрывчатки. После короткого периода, проведенного в сверхкритическом состоянии, тепловое расширение приведет к разрушению сборки и к возврату в подкритическое состояние, но не раньше, чем выделится огромное количество энергии, связанной с ядерным оружием.

Два фактора влияют на конструкцию оружия - это критическая масса и скорость образования нейтронов. Критическая масса - это наименьшее количество топлива, требуемое для поддержания цепной реакции деления. Как минимум, данное оружие должно содержать, по меньшей мере, одну критическую массу, чтобы получить какое-либо энергетическое деление. Поэтому чем выше критическая масса, тем выше количество требуемого взрывного "топлива". Такое увеличение размера оружия увеличивает проблемы конструирования и доставки, делая материалы с высокой критической массой менее привлекательными. Может оказаться также, что большие критические массы нельзя "поджечь", поскольку требуемое сжатие просто не может быть достигнуто.

Если способный к делению материал находится в большом нейтронном потоке, возможность деления на ранних стадиях сжатия возрастает. Если это произойдет, результирующее энерговыделение может вызвать расширяющие усилия, мешающие бомбе достигнуть запроецированного сжатия и наивысшего уровня сверхкритичности. Это явление называют преждевременной детонацией. Поскольку значительная часть энергии при ядерном взрыве выделяется на конечных стадиях сжатия, преждевременная детонация заметно снижает ожидаемую мощность оружия.

Различие между оружейным и реакторным плутонием заключается в их изотопном составе. Один из методов увеличения скорости производства нейтронов заключается в разведении оружейного плутония реакторным. Плутоний, содержащий менее 6% Pu-240, называется оружейным. Напротив, реакторный плутоний может содержать более 20% Pu-240. Типичный пример изотопного состава оружейного и реакторного плутония приведен в Табл.1.

Изотопы плутония с четными атомными номерами (238, 240 и 242) обладают гораздо более высокими скоростями спонтанного деления по сравнению с другими изотопами плутония. Добавление реакторного плутония в оружейный увеличивает содержание таких четных изотопов и тем самым повышает скорость образования нейтронов в материале. Физически это можно сделать путем окисления металлического оружейного плутония и смешивания его с окислом реакторного плутония, выделенного для использования в МОХ-реакторах.

Таблица 1: Изотопный состав разных форм плутония (в %)

Изотоп	Оружейная ^а	Реакторная ^б
Pu-238	0.012	1.31
Pu-239	93.9	60.8
Pu-240	5.81	24.5
Pu-241	0.23	8.37
Pu-242	0.022	5.04

^а Взято из статьи Ф.Беркхута и др. "Утилизация выделенного плутония", "Наука и всеобщая безопасность", т.3, N.3, 1993, стр.10.

^б См. Plutonium Fuel: An Assessment, OECD, Paris, 1989, p. 50. Данные приведены для МОХ-топлива в водяном реакторе под давлением; степень выгорания - 33000 МВт.день/т, выдержка - 10 лет.

УХУДШЕНИЕ СВОЙСТВ ПРИ ОСТЕКЛОВАНИИ

Чтобы остекловывание любой плутониевой конструкции рассматривалось как жизнеспособный вариант распоряжения плутонием, оно должно обеспечить препятствия для возможных изготовителей оружия (в частности, для субнациональных групп). Это означает, что как бы ни изменился плутоний, конечный продукт должен быть таким, чтобы его было трудно использовать в качестве взрывчатки. Форма хранения плутония также должна быть приемлемой с точки зрения окружающей среды в течение неограниченного периода хранения. Форма хранения должна поддерживать целостность плутония в условиях, типичных для хранилищ, и успешно избегать несчастных случаев с критичностью и/или выброса опасных элементов. На рис.1 представлена схема остекловывания оружейного плутония. На ней отражены типы разбавителей, которые можно добавить к оружейному плутонию (и к формирующей стеклокерамике), чтобы удовлетворить приведенным выше требованиям.

Что касается опасности военного использования, то остекловочный вариант имеет возможности для изотопного и химического разбавления оружейного плутония, что ухудшает в какой-то степени его взрывной потенциал. Степень ухудшения зависит от использованных разбавителей и состава самой стеклокерамики. Для исследований в качестве возможных разбавителей были выбраны элементы, химически сходные с плутонием, а в качестве изотопного разбавителя изучался реакторный плутоний. Затем мы использовали компьютерную программу для изучения характеристик оружия при подобных смесях и отождествления тех элементов, которые оказываются наиболее опасными для нормального функционирования оружия.

Следовало бы отметить, что ни один вариант обработки (за исключением устранения) не является полностью необратимым. Теоретически всегда можно отделить химические

добавки, а реакторный плутоний можно обогатить нужными изотопами путем лазерного разделения изотопов⁸. Впрочем, возможных нарушителей режима нераспространения могут сдержать значительные затраты средств и времени, которые вызваны трудностями, связанными с растворением стекланной матрицы, а также с выделением и очисткой плутония. Мы пока что не провели экспериментального изучения возможности возвращения плутония из стекла.

Остекловывание должно также обеспечить адекватную защиту окружающей среды и людей. Долговечность с точки зрения окружающей среды становится более важной, если оружейный плутоний будет остекловываться вместе с ОБУР. Были изготовлены стекла разного состава, которые можно использовать с оружейным плутонием, и они испытывались на устойчивость и стойкость по отношению к выщелачиванию. Способность стекла удерживать со временем свои компоненты уменьшает риск облучения людей. Добавление плутония и других разбавителей не должно способствовать выделению продуктов деления.

Выщелачивание отдельных элементов может вызвать в долгосрочной перспективе потерю контроля над реактивностью⁹. Как упоминалось ранее, если произойдет выщелачивание значительного количества поглотителей нейтронов из находящегося на хранении образца, это может вызвать инцидент с возрастанием критичности. Идеальный образец для хранения будет содержать значительные концентрации умеренно растворимых поглотителей нейтронов для контроля над реактивностью Pu-239 и его продукта распада U-235.

К вопросу о безопасности окружающей среды относится предельное количество плутония, загружаемого в стеклокерамику. Чем больше плутония можно растворить в стекле, тем быстрее и дешевле можно избавиться от него. Впрочем, этому есть предел. В какой-то момент плутоний может оказать вредное воздействие на свойства стекла и его фазовую устойчивость. Определение этого предела кратко проводится в эксперименте.

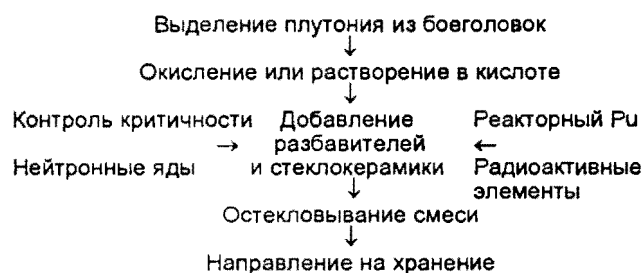


Рисунок 1: Блок-схема остекловывания

ЭФФЕКТИВНОСТЬ УХУДШЕНИЯ СВОЙСТВ ПЛУТОНИЯ

Чтобы провести объективную оценку различных разбавителей, надо выбрать конкретные параметры, важные при проектировании оружия, в качестве основы для сравнения. В следующем разделе дано объяснение выбранных параметров, в также методов вычисления и процедур, использованных для вычисления значений этих параметров. Представлены конкретные исследованные случаи и полученные результаты.

Вычислительные процедуры

Была использована программа MCNP (расчет переноса нейтронов и фотонов методом Монте-Карло) для вычисления данных о критической массе и потоке нейтронов для различных матриц, в которых хранится оружейный плутоний. Критическая масса является имеющим смысл параметром (как отмечено выше) из-за того, что она влияет на размер оружия. Она определяет также минимальное количество материала, которое обязательно надо заполнить несанкционированным образом для производства оружия.

Был рассчитан также поток нейтронов на поверхности образца плутония с заданной массой, но с разными изотопными составами. Эта величина дает относительную информацию о потоке нейтронов внутри самого материала, оценивая тем самым восприимчивость каждого состава к преждевременной детонации.

При всех прогонах программы MCNP для данного анализа предполагалась сферическая геометрия чистого материала. Предполагалось также, что смесь однородна и находится в вакууме. Ясно, что плутониевое оружие не существует в вакууме (оно окружено в действительности нейтронами отражателями и взрывчаткой для имплозии). Но это упрощение считалось достаточным для сравнения.

Для расчетов критичности вычислялась плотность каждой смеси и эта величина затем удваивалась для макетирования сжатия оружия имплозийного типа. Предполагалось, что плутоний находится в α -фазе с плотностью 19.5 г/см^3 (в несжатом состоянии)¹⁰. Большая часть ссылок в литературе на критическую массу даны для несжатой сферы из чистого материала. В анализе учитывалось сжатие, поскольку его легко ввести в программу MCNP и это является чуть более реальной конфигурацией. Оценивался начальный критический радиус материала и затем его подгоняли до тех пор, пока не достигалось значение k (коэффициента размножения), равное единице.

Данные по потоку нейтронов вычислялись путем отслеживания некоторого числа нейтронов, находившихся в твердой плутониевой сфере. Радиус сферы таков, что в нее входят три критические массы (соответствующие сжатому состоянию), но в несжатом виде. Этот сценарий пытается определить количество нейтронов на тех стадиях детонации, которые предшествуют сжатию. В нем также считается, что консервативный конструктор оружия запатует свое устройство тройным количеством требуемого материала.

Затем рассчитывался член с источником нейтронов, чтобы определить скорость образования нейтронов от спонтанного деления. Программа MCNP выдает данные по каждому источнику частиц, так что эта информация необходима для вычисления потока через поверхность.

Исследованные случаи

Как упоминалась ранее, та степень, до которой остекловывание с успехом ухудшает возможность использования оружейного плутония в оружии, зависит от того, что содержится в расплаве. Изотопное разбавление обладает тем преимуществом, что увеличивается критическая масса плутония, а также возрастает вероятность преждевременной детонации. Химическое разбавление уменьшает плотность расщепляющихся атомов, увеличивая тем самым критическую массу. Кроме того, если ядерные свойства разбавителей таковы, что они "крадут" нейтроны из цепной реакции деления, критическая масса возрастает еще больше. Ниже мы приводим отчет об исследованных случаях и пояснение, почему они были выбраны.

Изотопное разбавление. Этот подход, использованный для определения предельных эффектов изотопного разбавления, заключался в том, что предполагались разумные изотопные содержания оружейного и реакторного плутония (см. Табл.1), которые затем смешивались в разных весовых пропорциях. Разбавление реакторным плутонием - это единственный механизм изменения изотопного состава оружейного плутония, не считая сгорания в реакторе. Если разбавить 100 тонн оружейного плутония реакторным плутонием в количестве 20% по весу (смотрите ниже), для этого потребуется около 20 тонн выделенного реакторного плутония. Это больше того, что уже находится на хранении в России¹¹.

Химическое разбавление. Изучалось также влияние химического разбавления в предположении, что на хранение помещен плутоний оружейного качества. Для этих вычислений выбраны матрицы тех типов, какие используются в настоящее время, а также перспективные формы для остекловывания.

Мы начали с рассмотрения металлического плутония и его оксида, так как они являются наиболее привычной формой выделенного плутония. Плутониевые оружейные компоненты изготовлены из металла, а реакторный плутоний хранится в виде спеченного оксида. Данные для этих случаев стали основой при сравнении с другими альтернативными подходами.

Исследованная форма для хранения содержала остеклованную смесь редких земель, тория и плутония. Редкие земли принадлежат семейству лантанидов и они могут препятствовать извлечению плутония благодаря своим химическим свойствам. Для испытаний были выбраны гадолиний,

самарий и европий. Торий был включен в анализ, поскольку его сравнительно трудно отделить от плутония. Эти элементы с самого начала перемешивались с оружейным плутонием так, что на каждый из них приходилось по 20% от веса смеси.

Уран химически похож на плутоний, но сейчас на коммерческой основе используются хорошо разработанные процессы для отделения урана от плутония. Поэтому уран не изучался в качестве разбавителя.

Результаты по критической массе в сжатом состоянии

Критическая масса смесей зависит от концентрации расщепляющихся элементов (Pu-239 - Pu-241), плотности смеси и поперечного сечения разбавителей для процессов, конкурирующих с делением. Как отмечено выше, была вычислена двукратная критическая масса для каждой формы хранения, поскольку эта величина более типична для материала, необходимого во взрывном ядерном устройстве имплозийного типа. Сначала исследовалось изотопное разбавление, а затем и химическое.

Изотопное разбавление имело минимальное воздействие на критическую массу. Расчитанная критическая масса в сжатом состоянии составила 2.7 кг для оружейного плутония и 3.5 кг для реакторного. Малая критическая масса реакторного плутония демонстрирует его взрывной потенциал. Если бы не было спонтанного деления у четных изотопов, реакторный плутоний стал бы таким же привлекательным, как и оружейный.

Уменьшение плотности от 19.5 г/см^3 (металлический плутоний) до 11.46 г/см^3 (кристаллический оксид) повышает критическую массу оружейного плутония с 2.7 до 7.1 кг. Это увеличение относительно велико, но его легко можно перевернуть, переведя оксид в металлическую форму.

Сравнение формы хранения в смеси с редкими землями и форм хранения в виде металла или оксида (рис.2) показывает влияние разбавителей, поглощающих нейтроны. Критическая масса для смеси с редкими землями (с добавкой тория) более, чем на два порядка величины, превышает исходное значение. При расчете критической массы в остеклованной форме считалось, что фракции представлены в виде металла, хотя в стекле они существовали бы в виде оксидов.

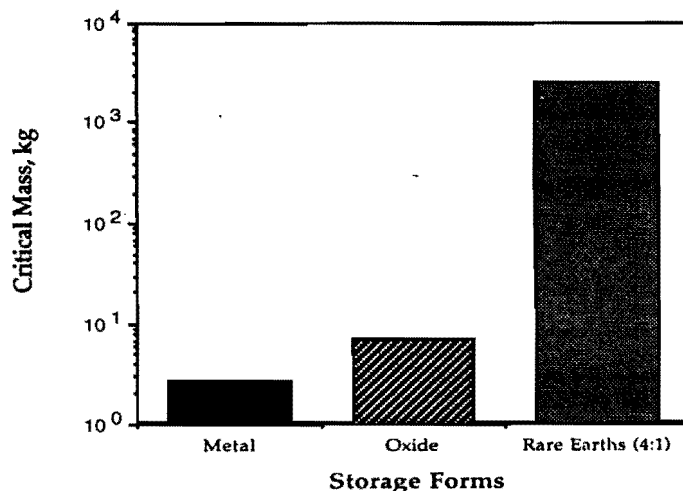


Рисунок 2: Критическая масса для различных форм сжатого плутония. На оси ординат приведены значения критической массы (кг), на оси абсцисс - формы хранения (металл, оксид и смесь с редкими землями).

По мере увеличения концентрации разбавителей (редкие земли и торий) критическая масса возрастает примерно так, как изображено на рис.3. Критическая масса резко возрастает, когда загрузка разбавителем достигает диапазона 50-80% по весу. Включение в стекло достаточного количества редких земель заставило бы изготовителей оружия увеличить степень очистки плутония.

Для исследования вклада каждого отдельного элемента в увеличение критической массы в сжатом состоянии был подготовлен рис.4. Уран включен для сравнения.

Относительно высокое сечение захвата нейтронов в европии (около 0.1 барн при 1 МэВ) в сочетании с его низкой плотностью (5.26 г/см^3 в металлическом состоянии) делают

европий хорошим разбавителем¹². При загрузке 50% по весу критическая масса смеси европия и оружейного плутония в сжатом состоянии более, чем вдвое, выше соответствующих значений для гадолиния или самария. Показано, что естественный уран оказывается наименее эффективным ядом. Ради того, чтобы выделить максимальную возможную выгоду от разбавления этими элементами, для дальнейшего анализа химического разбавления был отобран европий¹³.

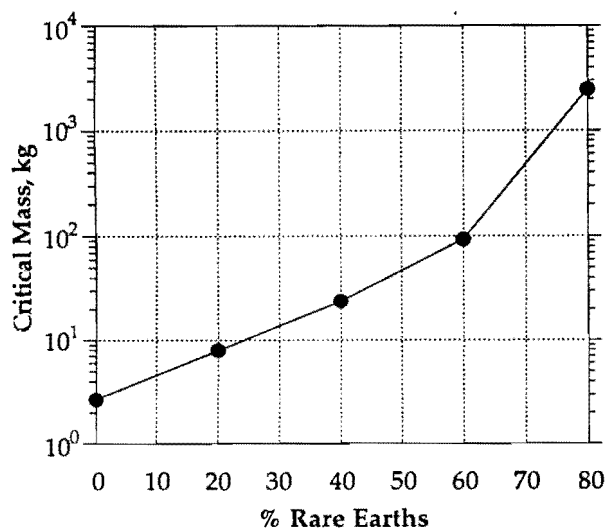


Рисунок 3: Влияние редких земель на критическую массу оружейного плутония в сжатом состоянии. На оси абсцисс отложено процентное содержание редких земель, на оси ординат — значение критической массы (кг).

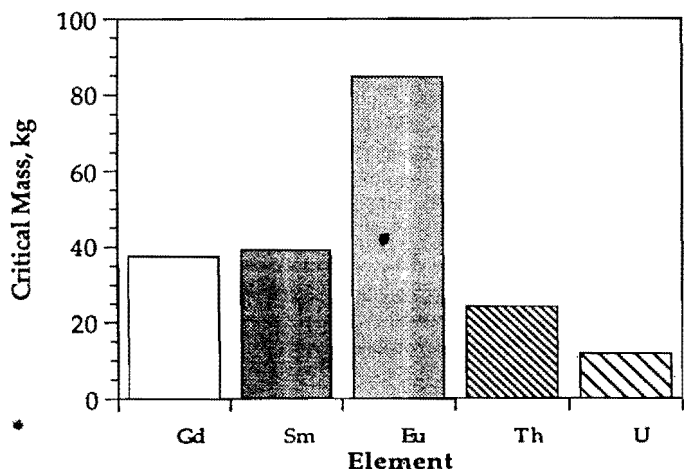


Рисунок 4: Критическая масса в сжатом состоянии для смеси оружейного плутония с 50% чистого элемента. На оси абсцисс отложены элементы (гадолиний, самарий, европий, торий и уран), на оси ординат — значение критической массы (кг).

Данные по критической массе определяют минимальное количество (неразделенного) материала, которое обязательно надо изъять несанкционированным путем для использования в качестве оружия. Добавление нейтронных поглотителей к стеклокерамике увеличит количество материала, требуемого для создания одной критической массы без дополнительной очистки плутония. На рис.5 отображено это соотношение для смеси оружейного плутония и естественного европия. Линия со стрелкой, направленной влево, указывает количество смеси европия с оружейным плутонием, необходимое для подрыва устройства, аналогичного "Троице" (три критические массы)¹⁴. По мере роста доли европия увеличивается количество требуемого материала, что и следовало ожидать.

Впрочем, количество европий-плутониевой смеси в каждом стержне является переменной величиной. Например, если плутоний разбавлен европием (30% по весу) и перемешан со стеклокерамикой таким образом, что на долю оксида плутония приходится 2% веса всего стекла, ворам придется похитить более одного стержня, чтобы занять достаточно смеси европия и оружейного плутония для изготовления оружия (без дальнейшей очистки плутония). Если использовать такие установки, какие применяются в Саванна Ривер, вес стержня составит около 1800 кг. Перемещение таких стержней потребует промышленного оборудования и это перемещение легко можно будет обнаружить.

На рис.5 показан также уровень обработки, требуемый для того, чтобы использовать смесь европия с оружейным плутонием как оружие. Если бы изготовители оружия получили стеклянный стержень с 2%-ной весовой загрузкой оружейным плутонием и с обильным содержанием европия, им придется очищать европий-плутониевую смесь до тех пор, пока весовое содержание европия не станет ниже 23%, чтобы получить нужный материал.

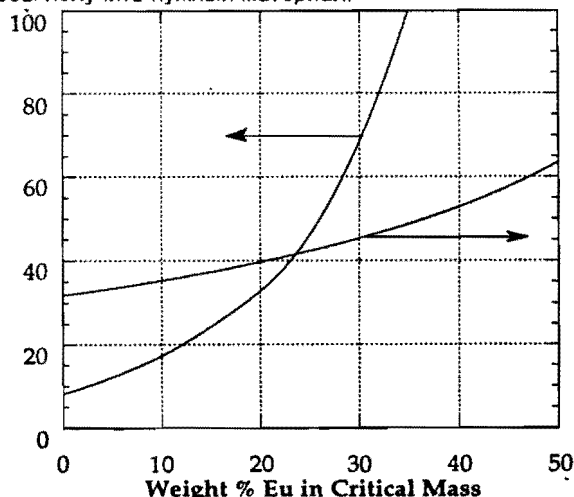


Рисунок 5: Количество взрывчатого материала, содержащегося в стекле с оружейным плутонием, в зависимости от содержания разбавителя (европия). По оси абсцисс отложено процентное содержание европия (по весу) в критической массе. По оси ординат слева отложена масса смеси (кг), требуемая для реализации взрыва типа "Троица". По оси ординат справа отложена масса смеси, содержащаяся в стеклянном стержне массой 1800 кг (при 2%-ной загрузке оксидом оружейного плутония).

По мере роста загрузки стекла плутонием требования к очистке снижаются. Но все же есть экономические побуждения для высокой степени загрузки оружейным плутонием. Кроме того, при более высокой загрузке снизилась бы продолжительность времени, потраченного на отделение оружейного плутония. Подобные компромиссы должны быть внимательно рассмотрены при проектировании стекол.

Результаты по потоку нейтронов через поверхность и скорости их образования

На рис.6 приведены данные по потоку нейтронов от оружейного плутония, разбавленного реакторным плутонием. Добавление относительно небольшого количества реакторного плутония в оружейный (при сохранении общей массы 9 кг) увеличивает относительное содержание Pu-240 и Pu-242. Эти четные изотопы увеличивают скорость спонтанного деления в плутонии и наряду с этим вероятность преждевременного подрыва.

Образование дополнительных нейтронов может эффективно привести к "снятию с вооружения" плутония в любой стране. Как США, так и Россия спроектировали свои боеголовки для запитки их оружейным плутонием. По мере того, как сохраняется доступ к оружейному плутонию, нет стимулов к использованию плутония с измененным изотопным составом. Но если поступить так, то может потребоваться создание новых конструкций оружия, чтобы добиться военных стандартов мощност и надежности. Впрочем, для решения этого вопроса надо детально понимать чувствительность оружия каждой страны к плутонию разного качес-

тва. Это не означает, что мы отрицаем возможное использование реакторного плутония в оружии надежного типа. Мы пытаемся обратить внимание на то, что уменьшение содержания расщепляющегося изотопа и увеличение скорости образования нейтронов (хотя и достаточно слабое) может оказаться достаточным, чтобы убедить военных не использовать такой материал в современных конструкциях.

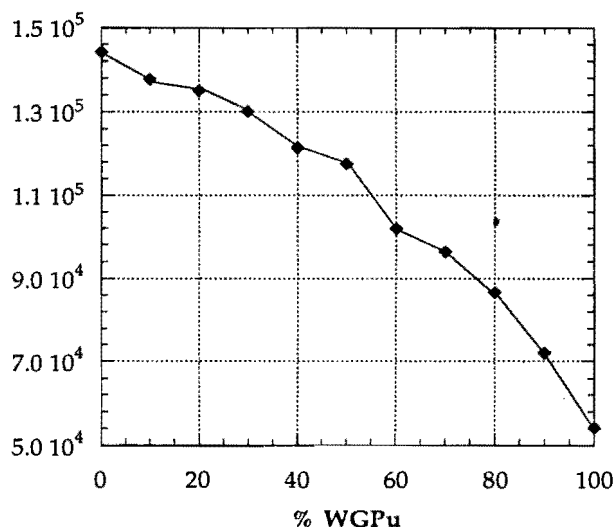


Рисунок 6: Влияние изотопного состава металлического плутония на поток нейтронов через поверхность. На оси абсцисс отложено процентное содержание оружейного плутония, на оси ординат - поток нейтронов (см² с⁻¹).

Безопасность для окружающей среды

Хотя стекла с редкими землями могут обеспечить выигрыш в безопасности при хранении оружейного плутония, надо доказать также, что они безопасны для окружающей среды. Это означает, что все компоненты стекла не должны перемещаться в течение максимально возможного времени. Особую тревогу вызывает случай, когда в стекло введены некоторые растворимые радиоактивные продукты деления. Такие элементы могут представить угрозу для здоровья, если содержащая их вода попадет в биосферу.

Должно быть экспериментально показано, что добавление плутония к любому возможному типу стекла не способствует расстеклованию. Разделение жидких фаз (в стекле содержатся смеси разного состава) нежелательно, поскольку оно могло бы вызвать изменения физических свойств стекла и/или увеличить скорости выщелачивания элементов и общего растворения стекла.

Кроме выщелачивания элементов или общего ухудшения формы для хранения, компоненты стекла могут выходить из материала в результате аварии, связанной с возрастанием критичности. Высокая степень загрузки оружейным плутонием при недостаточном контроле за реактивностью может позволить возникновению критичности в смеси. Это привело бы к нежелательным последствиям, вызываемым образованием свежих продуктов деления, которые обладают прямым доступом к грунтовым водам.

Из боросиликатного стекла быстрее всего уходит бор со скоростью, значительно превышающей скорость плутония¹⁶. По мере того, как относительная доля бора уменьшается в течение тысяч лет, возрастает возможность критичности. Редкоземельные элементы поглощают нейтроны и выщелачиваются с меньшей скоростью, обеспечивая тем самым потенциально более безопасную форму хранения.

Выщелачивание элементов из стекол хорошо изучено в последнее время. Скорости их ухода зависят от множества факторов, например:

- как данный элемент введен в структуру стекла;
- как конкретные участки стекла реагируют с водой;
- как состав и реактивность выщелачиваемого элемента влияют на реактивность стекла
- как структура и реактивность стекла меняют деформацию его поверхностных слоев;

- как растворение стекла изменяет химию выщелачиваемого элемента;
- поток воды вблизи отходов (вовнутрь и наружу)¹⁸.

Вместо того, чтобы изучать конкретные механизмы выщелачивания бора или редкоземельных элементов, мы провели одинаковые испытания со стеклами, содержащими и те, и другие элементы, чтобы обнаружить какие-либо изменения.

Экспериментальные процедуры. Были изготовлены стекла, содержавшие редкие земли и аналог плутония (торий). Непосредственной задачей стало определение того, можно ли добавлять к такой стеклокерамике торий без вызывания расстекловывания. Стеклокерамика расплавлялась при температуре 1150 °C в течение примерно одного часа и затем выливалась в нагретую заранее графитовую форму. Далее форма помещалась в камеру из огнеупорного кирпича для охлаждения. Наконец, стекло выдерживалось при температуре 500-550 °C, а затем тигель охлаждался.

При испытаниях на выщелачивание использовалась деионизованная вода, а сами испытания проводились с отрезанными образцами стекла, чтобы сравнить эффективность проверяемых стеклокерамик к выделению своих компонентов. Мы следовали рекомендациям Центра определения свойств материалов (MCC-1P) для испытаний на выщелачиваемость. Плазменная спектроскопия на аргоне (ICP) обеспечивала данные по составу продуктов выщелачивания.

Для наших экспериментов были отобраны следующие типы стеклокерамики: усовершенствованный стандартный материал ARM-1 и керамика из лаборатории Саванна Ривер (SRL-165). ARM-1 - это боросиликатное стекло с моделями продуктов деления. Это важный тип стекла для лабораторных испытаний, так как его приготавливают для моделирования типичных добавок ОБУР. Использование стекла ARM-1 в наших экспериментах соответствует варианту прямого смешивания оружейного плутония с высоко радиоактивными отходами, которые создают смертельно опасный радиационный барьер.

SRL-165 - это "чистое" боросиликатное стекло, используемое на установке по обработке отходов оборонной промышленности в лаборатории Саванна Ривер (DWPF). Хотя такое стекло не обеспечивает радиационного барьера, введение в эту матрицу оружейного плутония, как кажется, будет более простым и менее опасным делом. В любом случае, похоже, что чистое стекло с оружейным плутонием будет изготавливаться до того, как в него добавляют ОБУР, чтобы уменьшить вероятность аварий с критичностью в течение обработки.

Изученные случаи. Для стекол любого состава было проведено сравнение выщелачивания европия и бора. Кроме того, производилась оценка способности стекол удерживать входящие в него элементы при сохранении структурной целостности. Для анализа использовались (кроме европия и бора) натрий, торий и цезий.

Бор и натрий использовались для оценки структурной целостности стекол. Главным создателем основной структуры стекла является кремний, но его мы не использовали, поскольку он обладает тенденцией к осаждению из раствора, что приводит к неточностям в измерении утечки. Как ожидается, бор также служит создателем структуры и поэтому его вводят в структурную матрицу стекла. Бор растворим в естественной воде и поэтому он служит удобным индикатором ухудшения свойств стекла. Натрий изменяет структуру, а это означает, что он не может сам по себе сформировать стекло, но при смешивании с другими формирувателями структуры он может попасть в стеклянное состояние¹⁷. При производстве стекла это основное изменение состояния. Натрий тоже очень растворим и его характеристики выщелачивания дают нам некоторое представление о полной растворимости стекла.

Данные по скорости ухода тория дают нам указания относительно удержания плутония в стекле. Были получены данные по выщелачиванию цезия для определения влияния изменений ARM на выщелачивание соответствующих продуктов деления. Эти данные должны бы указать на возможности двух используемых в настоящее время стеклокерамик удерживать элементы, которые могут использоваться при распоряжении оружейным плутонием, в то время как другие отходы продолжают выделяться.

Результаты по долговечности. Было изготовлено и испытано несколько вариантов загрузки редкими землями и торием как стеклокерамики ARM-1, так и стекла SRL-165. Образцы стекла ARM-1 загружались 1% и 2% каждого ред-

козельного элемента (всего 3% и 6% по весу). После успешного изготовления (без видимого расстекловывания) этих образцов было изготовлено еще одно стекло ARM с 6%-ной весовой загрузкой редкими землями и 2%-ной весовой загрузкой торием.

На рис.7 отражены данные по выщелачиванию бора при 90 °C из стекла ARM и для каждой из последующих смесей (3%, 6%, и 6% + 2% ThO₂ по весу). Наблюдаемая тенденция типична и для выщелачивания натрия.

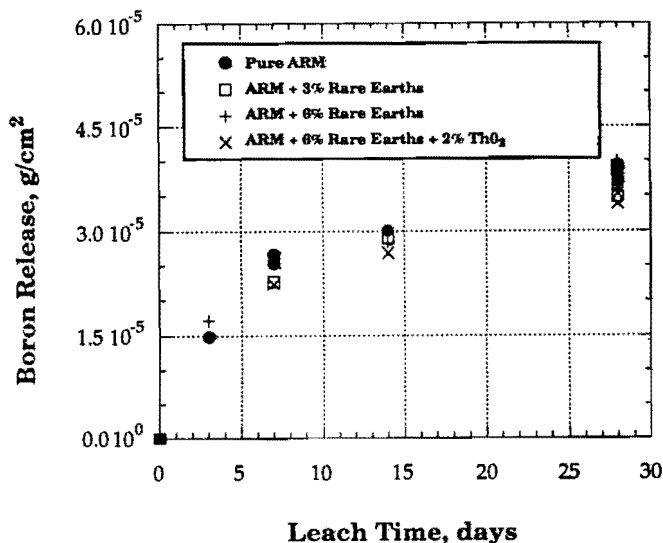


Рисунок 7: Выделение бора из стекол ARM с разными примесями при 90 °C. На оси абсцисс отложено время выщелачивания (дни), по оси ординат - абсолютная величина выделения (г/см³). Кружки относятся к чистому стеклу ARM, квадратики - к 3%-ной примеси редких земель, значки "+" - к 6%-ной примеси редких земель, а значок "x" - к 6% редких земель и 2% ThO₂.

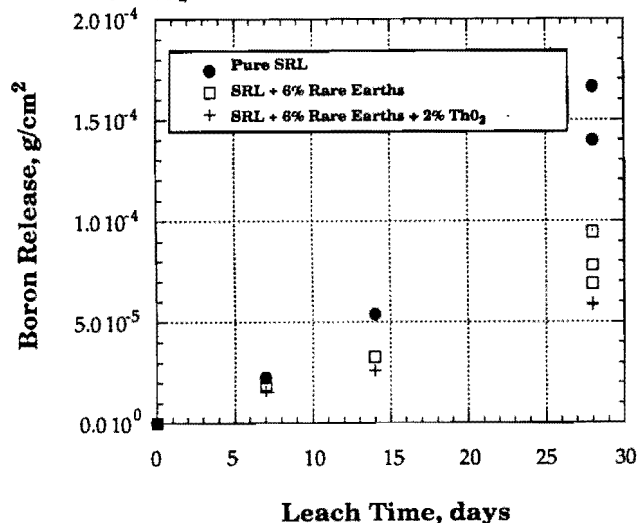


Рисунок 8: Выделение бора из стекол SRL с разными примесями при 90 °C. По оси абсцисс отложено время выщелачивания (дни), по оси ординат - абсолютная величина выделения (г/см³). Кружки относятся к чистому стеклу, квадратики - к стеклу с добавкой 6% редких земель, крестики - к стеклу с добавкой 6% редких земель и 2% оксида тория.

Как показывает рис.7, включение тория и редких земель в стекло ARM не проявляет заметного отрицательного эффекта: возможно небольшое преимущество в отношении структурной долговечности стекла, но для такого утверждения нет статистической базы. Зависимость выделения натрия очень похожа на представленные данные по всем стеклам ARM в течение 28 дней. Как показано, стекло ARM само по себе является качественным материалом, способным удерживать множество разбавителей.

Стекла SRL также функционировали хорошо. Как и для стекол ARM, были изготовлены образцы стекла SRL с 2%-ным весовым содержанием каждой из трех редких земель

(Sm, Gd и Eu). Было изготовлено также SRL стекло с 6%-ным полным содержанием редких земель и 2%-ным весовым содержанием оксида тория. На рис.8 показано выделение бора в течение 28 дней из стекол SRL разного состава в течение 28 дней при 90 °C.

Также представляется, что на долговечность стеклокерамики SRL при 90 °C не влияют добавленные элементы. При 90 °C у стекла SRL с добавками редких земель выделение бора и натрия слегка ниже, чем у чистого стекла SRL. При добавлении тория эти выделения становятся примерно вдвое меньше, чем у чистого SRL. Торий (как можно ожидать) явно помогает созданию стекланной структуры. У тория четырехвалентное состояние (как и у плутония при тех же условиях), что может позволить ему образовать тетраэдрическую конфигурацию с четырьмя атомами кислорода, аналогичную той, какую образует кремний в стекле. Поэтому торий включается в кремниевую решетку и способствует установлению структуры решетки.

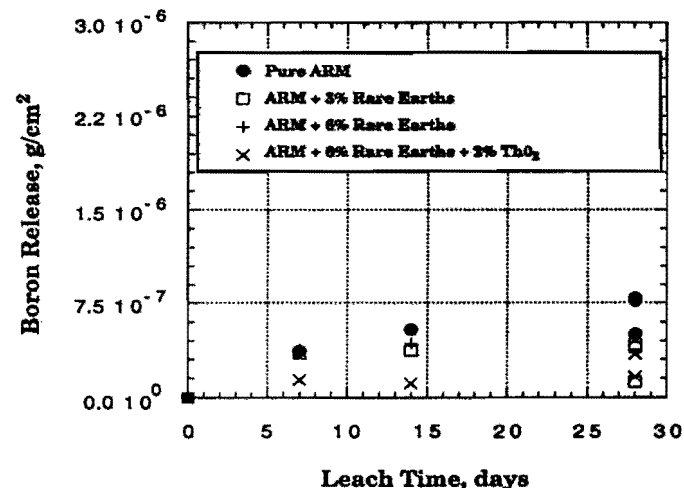


Рисунок 9: Выделение бора из стекол ARM с разными примесями при комнатной температуре. По оси абсцисс отложено время выщелачивания (дни), по оси ординат - абсолютная величина выделения (г/см³). Кружки относятся к чистому стеклу, квадратики - к стеклу с добавкой 3% редких земель, значки "+" - к стеклу с добавкой 6% редких земель, а значки "x" - к стеклу с добавкой 6% редких земель и 2% оксида тория.

Результаты по долговечности при комнатной температуре имеют ту же тенденцию, что и данные при 90 °C. На рис.9 и 10 приведены кривые выщелачивания бора при комнатной температуре из образцов стекол ARM и SRL, соответственно. Когда к стеклу SRL с редкоземельным разбавителем добавляется торий, улучшается удержание бора и натрия. Это еще один пример способности тория увеличивать долговечность стекла.

Следовало бы обратить внимание на абсолютную величину выделений. Данные для бора при комнатной температуре на несколько порядков величины ниже, чем при 90 °C. Это отражает общую тенденцию увеличения растворимости в стекле при более высоких температурах.

С точки зрения долговечности стекло ARM превосходит стекло SRL как при 90 °C, так и при комнатной температуре. Стекло ARM удерживает больше бора и натрия при начальной концентрации их, сравнимой с концентрациями в стекле SRL. Этого можно ожидать, так как уже известно, что имитаторы продуктов распада обладают способностью увеличивать долговечность стекла¹⁸.

Результаты по удержанию тория, цезия и европия

Поскольку торий - аналог плутония, удержание тория в стекле является очень важным. К счастью, как стекло SRL, так и стекло ARM способны сохранить выделения тория на уровнях ниже обнаруживаемого порога (0.0109 ppm). Это оказалось справедливым во всех испытаниях: при 90 °C и при комнатной температуре, что отражает общую нерастворимость большинства актинидов в природных водных растворах¹⁹.

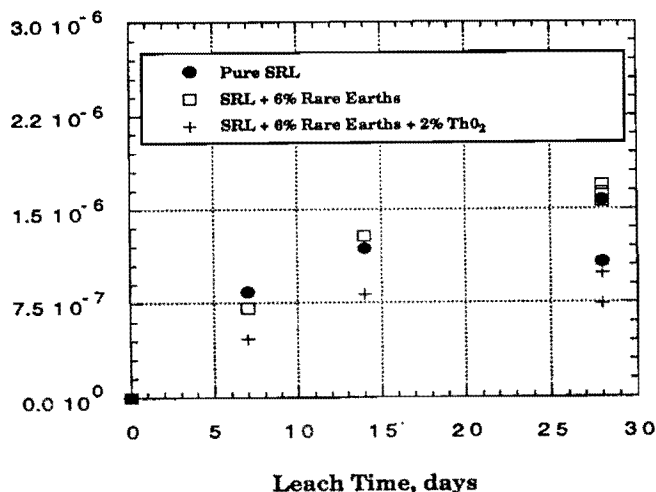


Рисунок 10: Выделение бора из стекол SRL с разными примесями при комнатной температуре. По оси абсцисс отложено время выщелачивания (дни), а по оси ординат - абсолютная величина выделения (г/см³). Кружки относятся к чистому стеклу, квадратики - к стеклу с добавкой 6% редких земель, а крестики - к стеклу с добавкой 6% редких земель и 2% оксида тория.

Во всех случаях также не было замечено выделение цезия. Это важный результат, поскольку введение оружейного плутония и любых разбавителей не должно влиять на способность стекла служить своей основной цели - изоляции отходов. К сожалению, этот эффект надо подтвердить в последующих экспериментах, поскольку порог обнаружения цезия спектрометром ICP достаточно высок (19 ppm). Можно было бы исследовать и другие продукты деления, которые, как ожидается, внесут вклад в ухудшение характеристик (например, технеций, йод, углерод-14 и нептуний-237). Мы рассматривали эти элементы, но с ними трудно работать в университетских условиях и поэтому они не вошли в программу данных исследований.

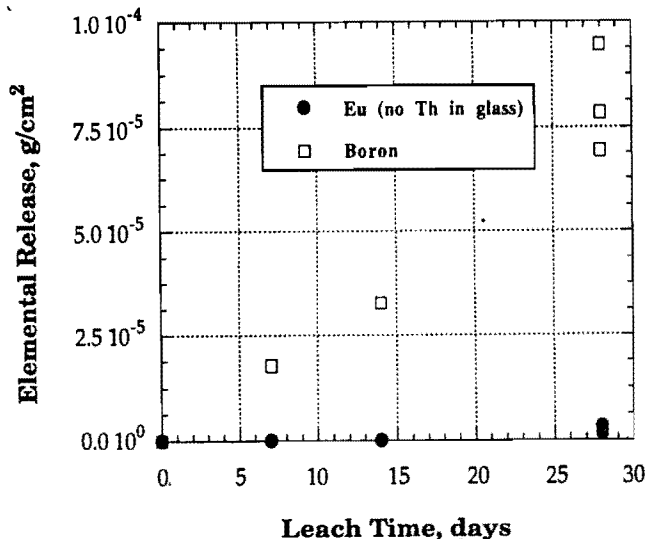


Рисунок 11: Выделение элементов, осуществляющих контроль за реактивностью, из стекла SRL с добавкой 6% редких земель при 90 °C. По оси абсцисс отложено время выщелачивания (дни), по оси ординат - абсолютная величина выделения (г/см³). Кружки относятся к европию (в стекле нет тория) а квадратики - к бору.

В большинстве образцов продуктов выщелачивания европий не обнаруживался. Когда его находили, то чаще всего он присутствовал в очень малых количествах (порядка малого числа ppm). Стекло SRL с 6% редких земель обладало при 90 °C наивысшей концентрацией европия в продуктах выщелачивания; соответствующие данные по выщелачива-

нию европия показаны на рис.11. Для этого стекла европий был обнаружен при концентрациях около 300 ppm. На том же рисунке для сравнения приведен график выделения бора в стекле SRL. Выделение европия исключительно мало по сравнению с бором. После добавления в стекло тория выделение европия из стекла SRL снова становится необнаружимым.

При комнатной температуре выделение европия из стекла SRL с весовой добавкой 6% редких земель уменьшилось до 35 ppm. Соответствующие данные по выщелачиванию европия и бора отложены на рис.12. И опять, выделение бора в том же стекле значительно выше. Добавление тория к этому образцу только слегка (на 5 ppm) уменьшает концентрацию европия в продуктах выщелачивания, но снова надо отметить, что речь идет об очень малых абсолютных значениях.

Интересно отметить, что это единственный случай, когда выделение европия при комнатной температуре оказалось меньше, чем при 90 °C (такое поведение соответствует ожидаемому). Все другие образцы стекол SRL и ARM были более эффективны к удержанию европия при 90 °C. Надо подчеркнуть, что выделения при комнатной температуре еще очень малы (менее 35 ppm), но эти явления нуждаются в дальнейшем исследовании.

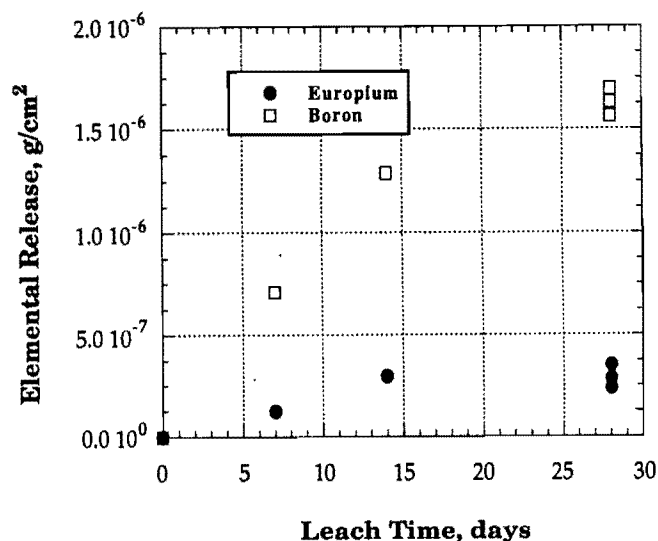


Рисунок 12: Выделение элементов, осуществляющих контроль за реактивностью, из стекол SRL с добавкой 6% редких земель при комнатной температуре. По оси абсцисс отложено время выщелачивания (дни), по оси ординат - абсолютная величина выделения (г/см³). Кружки относятся к европию, а квадратики - к бору.

Вообще говоря, стекло ARM ведет себя лучше, чем SRL, при удержании европия. При 90 °C европий не обнаруживается в продуктах выщелачивания. При комнатной температуре стекло ARM с 6%-ной весовой загрузкой обладает наиболее высокой концентрацией европия (среди всех образцов стекол ARM) в своих продуктах выщелачивания. Но все же его содержание было меньше 10 ppm через 28 дней. На рис.13 показан график выщелачивания европия для этого стекла. Обратите внимание на меньший масштаб графика относительно других кривых для европия. Добавление тория в этот образец мало меняет скорость выщелачивания европия.

Растворимость тория в стекле

Чем выше будет загрузка плутония в стекло, тем меньшее число стеклянных стержней понадобится для обращения с оружейным плутонием. Это соответствует более быстрому временному графику распорядка плутонием с возможной экономией средств. Но увеличение содержания плутония в стекле увеличивает риск возникновения аварий с повышением критичности или проявлений расстекловывания. Последнее опасение послужило предметом наших экспериментов.

Показано, что плутоний растворим при весовых концентрациях 7%, и предполагается, что величина 10% могла бы

оказаться верхним пределом²⁰. Стеклокерамика ARM была перемешана с $\text{Th}(\text{NO}_3)(\text{H}_2\text{O})_8$ так, что эквивалентное содержание оксида тория составляло 10% по весу. Эта смесь плавилась при 1175 °C в течение полутора часов, а затем охлаждалась в печи из огнеупорного кирпича и выдерживалась при 500 °C в течение двух часов. Было предпринято визуальное наблюдение для проверки крупномасштабной упорядоченности. На рис.14 представлена фотография поверхности этого образца. Обратите внимание на деформации в виде белого вещества, похожие на молоко. Они тянутся вдоль стержня в виде волн и являются, похоже, зародышем кристаллизации стекла.

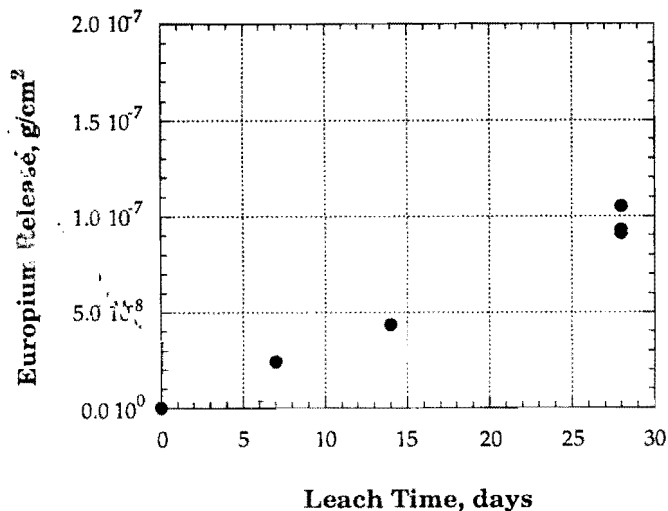


Рисунок 13: Выделение европия из стекла ARM с 6%-ной добавкой редких земель при комнатной температуре. По оси абсцисс отложено время выщелачивания (дни), по оси ординат - абсолютная величина выделения европия (г/см³).

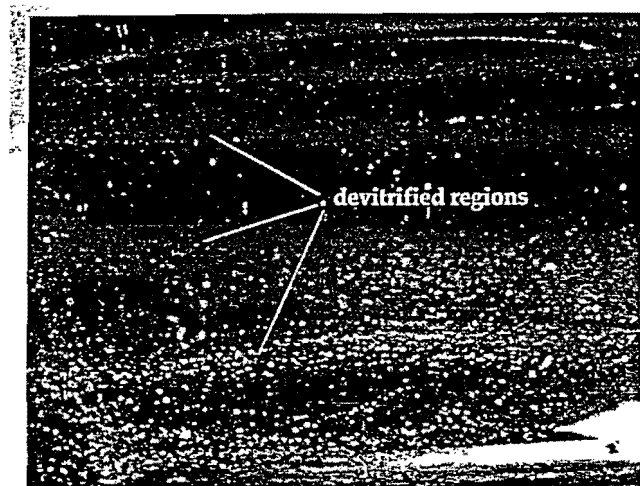


Рисунок 14: Фотография поверхности расстеклованных участков стекла ARM-1 с 10%-ной весовой добавкой оксида тория.

Мы использовали сканирующий электронный микроскоп (SEM) для изучения структуры стекла при увеличении порядка 10^4 , чтобы обнаружить любую микрокристаллизацию. Как показывают рис.15 и 16, фазовое разделение в действительности имеет место. Рис.15 - это увеличенный снимок самой фракции. Деформации пальцеобразной формы представляют из себя просто прожилки в стекле. Впрочем, в нижней правой части рис.15 наблюдается скопление небольших точек, которые кажутся кристаллами. Основная масса стекла сверху и слева от этих сгустков свободна от подобного вещества, что

кажется типичным явлением, поскольку кристаллы имеют тенденцию образовываться в локализованных областях, не внося изменения в другие области. Рис.16 - это фотография скопления таких кристаллических структур с еще более высоким увеличением.

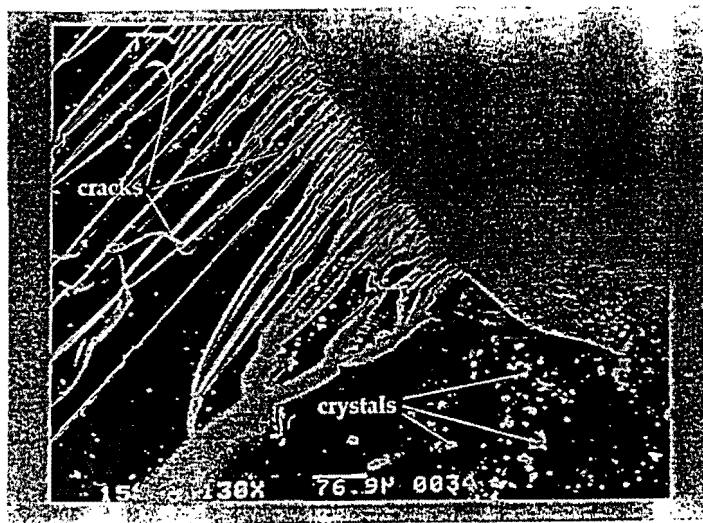


Рисунок 15: Группирование кристаллов в стекле ARM-1 с 10% оксида тория.

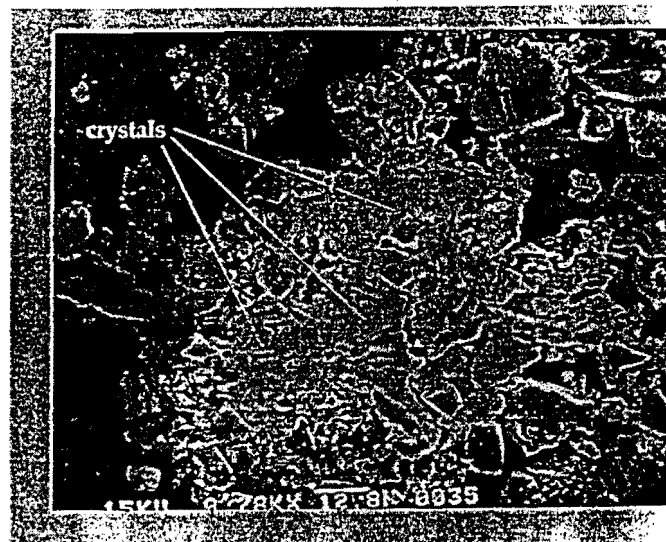


Рисунок 16: Кристаллическая структура в стекле ARM-1 с 10% оксида тория.

Микроанализатор рентгеновских лучей от Оже-эффекта с разрешением по энергии (EDAX) был использован для измерения химического состава в различных точках стекла с целью определения степени его однородности. На рис.17 и 18 приведены показания анализатора при наблюдении стеклянной области и расстеклованных участков, соответственно. Элементный анализ в стеклянной области (рис.17) содержит ожидаемые элементы: Si, O, Ca, Al, Na и Th (пик при 2.98 кэВ). Наблюдался пик от золота, поскольку образец был покрыт золотом для улучшения проводимости при работе с SEM.

На рис.18 анализатор EDAX показал более высокое относительное содержание пиков кремния и кальция от расстеклованных участков по сравнению с данными от остеклованных областей. Наблюдалась также меньшая величина пики кислорода и натрия. Это совместимо с процессом расстекловывания, поскольку кремний стремится заменить другие элементы при кристаллизации. Следует отметить, что хотя расстекловывание имеет место, в расстеклованных

кристаллах не обнаружен торий. Это наводит на мысль, что торий (и, возможно, плутоний) находится все еще в растворе и поэтому довольно устойчив в таком стекле даже при столь высокой загрузке.

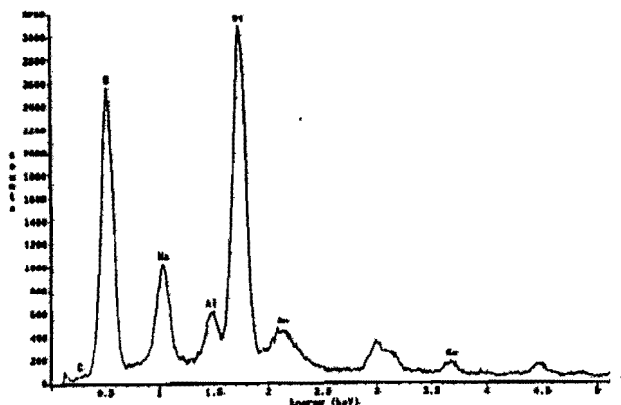


Рисунок 17: Элементный состав некристаллизованных участков стекла ARM-1 с 10%-ной весовой добавкой оксида тория.

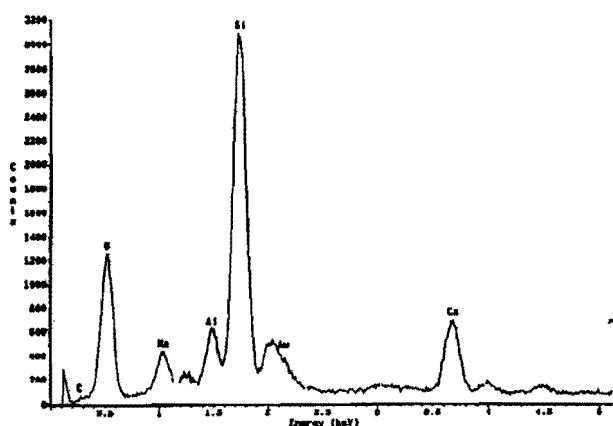


Рисунок 18: Элементный состав расстеклованных участков стекла ARM-1 с 10%-ной весовой добавкой оксида тория.

ВЫВОДЫ

Ухудшение качеств взрывчатого материала

Скорость образования нейтронов может дойти до уровня, соответствующего реакторному плутонию, при достаточном разбавлении. Если весовое содержание разбавителя из реакторного плутония составит 50%, поток нейтронов через поверхность плутониевой сферы весом 9 кг удвоится более, чем вдвое. Химические разбавители могут заметно увеличить критическую массу смеси с плутонием. Такие яды могут вызвать необходимость дополнительной очистки плутония, чтобы использовать его в качестве ядерной взрывчатки. Было показано также, что при соответствующих загрузках плутонием и подмешиваниях европия ворам потребуется красть несколько стержней плутониевого стекла для того, чтобы получить достаточное количество взрывчатки. Истинный размер таких стержней потребует промышленного оборудования, чтобы сдвинуть их с места, а это служит еще одним препятствием к нарушению режима нераспространения.

Безопасность для окружающей среды

Если конечным решением станет обращение с плутонием как с отходами, это явно можно сделать с достаточной безопасностью на основе современных технологий. Стекло-керамики ARM и SRL-165 очень хорошо продемонстрировали на эксперименте свою пригодность к такому процессу. Добавление 2% (по весу) оксида тория и 6% (по весу) редких земель в любой тип указанных стекол не приводит к видимым повреждениям стекла (то-есть к крупномасштабному проявлению расстекловывания). Долговечность стекол с измененным составом (с точки зрения окружающей среды) не изменилась в худшую сторону. Выделение бора и натрия часто в предельном случае уменьшалось при добавлении указанных выше разбавителей. Однако следовало бы провести дополнительные испытания для получения доказательства удержания продуктов деления.

Результаты испытаний по выщелачиванию европия показали, что нерастворимые элементы обладают возможностью долгосрочного контроля над реактивностью оружейного плутония. Это подтверждается тем, что европий более устойчив к выщелачиванию, нежели бор.

Предел растворимости тория в стекле ARM-1 выше, чем 2% по весу, но при 10% может наступить расстекловывание. Эта информация приводит к выводу, что предел для загрузки оружейным плутонием следовало бы установить где-то ниже 10 весовых процентов для сохранения устойчивости стекла.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

Ответственные политики в США и России хотели бы рассмотреть опасность немедленного распространения, но у них разные задачи в связи с тем, использовать ли в конечном итоге плутоний для мирных целей или вообще не использовать его. Конечная мудрость каждой задачи (и методов ее достижения) покрыта неопределенностью. Поэтому кажется, что независимо от выбранной технологии распоряжения плутонием предпочтение следует отдать процессу, обеспечивающему максимальное сочетание немедленной безопасности материала и долгосрочной гибкости.

Вариант с остекловыванием является подходящим методом для обеспечения мер по краткосрочной защите от распространения. Плутоний (изотопно разбавленный или нет) можно было бы остекловать на основе существующих технологий с использованием слегка измененных стекло-керамик. Как показано в наших расчетах, критическую массу неочищенного металла можно было бы сделать исключительно большой. Высокие значения критической массы потребовали бы дополнительного разделения, чтобы получить взрывной материал с подходящими для обращения размерами.

Следовало бы рассчитать подходящую степень загрузки оружейным плутонием для предотвращения кражи материала. Должно потребоваться несанкционированное изъятие нескольких стержней, чтобы получить требуемый материал для производства ядерной взрывчатки, но возможность незначительного хищения многих стержней весом по две тонны станет нетривиальным препятствием для подобных действий. Очевидно, что на месте хранения нельзя будет проводить химической обработки и передвижения стержней, так как для этих операций нужно оборудование промышленного типа. Такая деятельность почти наверняка будет обнаружена при наличии заслуживающих доверия действий по охране.

Остекловывание оружейного плутония, вероятно, не стоит считать способом предохранения от повторного использования его страной-хозяином. Если Россия или США реально захотят этот материал, мало что остановит их. Если даже растворить в стекле ОБУР, то любая из этих стран сможет предпринять достаточно дорогие усилия, чтобы выделить плутоний. Хотя радиационный барьер и связан с неудобствами, он не устранил возможности возвращения плутонием страной-хозяином. Впрочем, выделение окажется исключительно трудным для неправительственных организаций.

В то время как изотопное разбавление не устраняет взрывной потенциал плутония, оно, вероятно, смогло бы стать фактором сдерживания от повторного использования материала страной, владеющей оружием. Даже при незначительном изменении критической массы материал может оказаться плохо подходящим для использования в стандар-

тных импозийных механизмах и в системах доставки, которыми оснащен арсенал каждой страны. Хотя можно было бы разработать целый парк оружия из реакторного плутония, это кажется маловероятным, если учесть наличие оружейного плутония и значительный вклад в его инфраструктуру во всем мире.

Варианту остекловывания присуща выборочность процесса. В его проект можно ввести любое препятствие (кроме устранения). Эту гибкость надо использовать. По мнению авторов, в исходном стекле не должно быть никаких радиоактивных разбавителей, но оно должно содержать элементы, способствующие контролю над критичностью.

Это немедленно вызовет тревогу по поводу безопасности, хотя и предоставляет обеим странам гибкость. Россия могла бы поддержать вариант регенерации плутония для использования в качестве топлива, а США получит время для определения оптимальной стратегии распоряжения с учетом ее многочисленных целей (например, безопасная обработка, способность объединяться с другими программами министерства энергетики и т.п.). Хотя подобный подход может вызвать возражения со стороны тех, кто хочет сжечь оружейный плутоний, кажется, что такая форма остекловывания имела бы наилучшие шансы на принятие.

Включение соответствующих элементов для контроля над реактивностью предоставляет дополнительный выбор. Если окажется нереализованным экономический потенциал плутония, а будущее останется покрытым туманом, остеклованный плутоний можно прямо поместить в природное хранилище. Вне зависимости от того, добавлены ли в стекло ОБУР или нет, европий продемонстрировал свою возможность контролировать реактивность стекла с оружейным плутонием без риска утери его долговечности с точки зрения охраны окружающей среды. Впрочем можно следовать более дешевыми путями с использованием европия²¹.

Другое преимущество варианта с чистым стеклом относится к процессу остекловывания. Слежение за концентрацией оружейного плутония определенно будет более простым в стекле без радиоактивных присадок, нежели при наличии ОБУР или отработанного топлива. Значительная радиация, присутствующая при этих формах хранения, будет маскировать характерные радиоактивные особенности плутония. Остекловывание делает проблему контроля над оружейным плутонием зависящей от истинной экспериментальной верификации, а не от предположений о возможности обратимости.

В итоге остекловывание обеспечивает четкий набор выводов для ответственных политиков. Рациональной представляется политика поддержки тех действий, которые создают больше сдерживания несанкционированному изъятию террористами и мешают повторному использованию в военных целях. Остекловывание без ОБУР могло бы обеспечить относительно дешевый путь к увеличению безопасности самого оружейного плутония и предоставление дополнительного времени. Независимо от того, обрабатывается ли материал для дальнейшей защиты от распространения, удаляется или возвращается для использования в виде топлива, такая стратегия позволяет нам снизить современные тревоги по поводу распространения и подготовиться к неопределенностям в будущем.

Очевидно, что предстоит провести еще больше работ по изучению технической и политической осуществимости остекловывания оружейного плутония. Вычислительные и экспериментальные исследования, описанные в этой статье, изучили только малую часть вариантов, чтобы доказать возможности концепции. Сейчас проводятся испытания долгосрочного выщелачивания для подтверждения наших начальных результатов. Разрабатываются также проблема растворимости стекла и модели критичности, чтобы способствовать проектированию безопасной стеклянной формы.

Как уже отмечалось несколько раз, возможность обратимости усилий по остекловыванию будет иметь первостепенную важность. Требуется детальное изучение возможных процессов разделения. Наша информация должна повлиять на отбор потенциальных разбавителей. Хотя уран и торий

уступают европию в качестве нейтронного ядра, их химическое сходство с плутонием может сделать эти элементы предпочтительными разбавителями. Кроме того, если регенерация легче отделения урана от плутония и в стекле нет ОБУР, то хранение в виде МОХ-топлива казалось бы желательным с точки зрения безопасности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Эта работа поддержана в рамках программы стипендий по ядерной технике и медицине, которую финансирует министерство энергетики, а руководство осуществляет научно-образовательный институт в Окридж. Финансирование поступало также от фонда У. Элтона Джонса.

ССЫЛКИ И ПРИМЕЧАНИЯ

1. National Academy of Sciences, "Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium", National Academy Press, Washington D.C., 1994, p.112.
2. Ibid. p. 34.
3. Ibid. p. 224.
4. US Department of Energy Plutonium Disposition Study, Technical Review Committee Report, Volumes 1&2, July 2, 1993.
5. Budlong Sylvester, K., "A Strategy for Weapon-Grade Plutonium Disposition", дипломная работа по ядерной технике и по технической политике, Массачусетский технологический институт, Кембридж, Мэриленд, сентябрь 1994.
6. Mark, J., Reactor-Grade Plutonium's Explosive Properties, Nuclear Control Institute, August 1990, p.4.
7. Berkhout, F., et al. Disposition of Separated Plutonium, Science and Global Security, v. 3, 1992, p.13.
8. Mark, J., Reactor-Grade Plutonium's Explosive Properties, Nuclear Control Institute, August 1990, p.6.
9. Taubes, Gary, Plutonium Disposal: No Easy Way to Shackle the Nuclear Demon, Science, Vol.263, 1986, p.631.
10. DeVolpi, A., Fissile Materials and Nuclear Weapons Proliferation. Ann.Rev.Nucl.Part.Sci., Vol.36, 1986, p.93.
11. Albright, D., "World Inventory of Plutonium and Highly Enriched Uranium", Oxford University Press, Oxford 1992, p.205.
12. Значения сечений взяты из справочника ENDF/B Cross Sections, Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, November 1972.
13. Содержание европия в земной коре равно 2.1 ppm (столько же, сколько у олова). Содержание золота равно 0.004 ppm (The Elements, John Emsley, Oxford Univ. Press, NY, 1989.)
14. Масса "Тринити" получена в разговоре с Марвином Миллером, профессором ядерной техники Массачусетского технологического института.
15. National Academy of Sciences, "Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium", National Academy Press, Washington D.C., 1984, pp.191-192.
16. Bunker, Bruce C., "Waste Glass Leaching: Chemistry and Kinetics", Scientific Basis for Nuclear Waste Management X, Vol.84, 1987, pp.493-507.
17. Scholes, S.R., "Modern Glass Practice", CBI Publishing Company, Inc., Boston, 1975, pp.33-34.
18. Lutze, W., and R.C.Ewing, ed., "Radioactive Waste Forms for the Future", Elsevier Science Publishing Company, Inc., New York, 1988, pp.559-560.
19. Ibid. pp.497-499.
20. McKibben, J.M., et al, Vitrification of Excess Plutonium, Predecisional Draft, Plutonium Vitrification Task Group, Westinghouse Savannah River Company, WSRC-RP-93-755, May 1993, p.8.
21. Розничная цена европия в 1991 г. составляла 7500 долларов за килограмм (CRC Handbook of Chemistry and Physics 71st Ed. 1990-1991, pp.4-122). Оптовая цена (при возможном низком качестве) почти очевидно будет меньше.