

ВЗРЫВНЫЕ СВОЙСТВА РЕАКТОРНОГО ПЛУТОНИЯ

Дж. Карсон Марк

Последующее обсуждение сконцентрировано на вопросе, смогут ли террористическая организация или «пороговое» государство использовать выделенный из топлива легководного реактора плутоний для создания ядерного взрывного устройства со значительной разрушающей мощностью. В некоторых кругах, связанных с политикой нераспространения, продолжает обсуждаться вопрос, можно ли создать бомбу из реакторного плутония при высокой степени выгорания. А если это возможно, то не будет ли такая задача слишком сложной для того, чтобы ею занялись пороговое государство или террористическая группа. Хотя относящаяся к этим вопросам информация доступна для публики (и была таковой в течение значительного времени), она собрана здесь для использования политическими деятелями и представителями общественности, которые беспокоятся о предотвращении распространения ядерных взрывчатых веществ.

Автор работал директором теоретического отдела Лос-Аламосской национальной лаборатории в 1947-1972 гг.

Этот материал создан на основе переработки статьи под тем же названием, которую д-р Марк подготовил для института ядерного контроля в Вашингтоне и которая издана в публикации этого института NPT at the Crossroads: Issues Bearing on Extending and Strengthening the Treaty, August 1990. Она была впервые опубликована в журнале *Наука и всеобщая безопасность*, т. 4, № 1 в 1993 году. Она перепечатывается здесь в связи с 20-летним юбилеем журнала.

ВВЕДЕНИЕ

Плутоний-239 образуется в ядерных реакторах благодаря захвату нейтрона ураном-238 и двум последующим бета-распадам. Извлеченный из реакторного топлива плутоний будет содержать кроме изотопа Pu-239 другие изотопы, образовавшиеся в результате последовательного захвата нейтронов или реакций (п,2п). При очень низкой степени выгорания топлива доли вторичных изотопов очень малы. Например, содержание Pu-240 может составлять несколько процентов от общей массы плутония, доля Pu-241 будет примерно на порядок величины ниже, а доля Pu-242 - еще на порядок ниже. Плутоний с такими характеристиками используется для оружия.

В коммерческих реакторах выгорание топлива значительно выше по сравнению с реакторами, предназначенными для получения оружейного плутония, а при более высоком выгорании относительное содержание более тяжелых изотопов возрастает, как показано на рис. 1 для легководных (водо-водяных) реакторов. При выгорании 33000 МВт-сутки на тонну (характеристика отработанного топлива для большинства водо-водяных реакторов под давлением на сегодня) типичное содержание изотопов плутония после удаления из реактора таково: 59% Pu-239, 21% Pu-240, 14% Pu-241 и 5% Pu-242. Из остальных изотопов плутония, которые также будут присутствовать в совсем небольших относительных количествах, наиболее значителен Pu-238, доля которого достигает уровня в 1-2%. В дальнейшем мы будем рассматривать, можно ли использовать в качестве ядерной взрывчатки плутоний с относительно высоким содержанием Pu-240, Pu-241 и Pu-242, которое характерно для извлеченного из коммерческих энергетических реакторов плутония (то-есть, «реакторного» плутония). Как повлияет реакторный плутоний на критическую массу, необходимую для ядерного взрыва? Какова будет вероятность преждевременного подрыва такой массы, и какой окажется результирующая мощность «хлопка»? В табл. 1 приведены изотопные составы для плутония разной чистоты.

Таблица 1: Примерный изотопный состав сортов плутония разной чистоты.

Степень чистоты	Изотопы				
	Pu-238	Pu-239	Pu-240	Pu-241 ¹	Pu-242
Сверхчистый	-	0.98	0.02	-	-
Оружейный ²	0.00012	0.938	0.058	0.0035	0.00022
Реакторный ³	0.013	0.603	0.243	0.091	0.050
Оксидное топли- во ⁴	0.019	0.404	0.321	0.178	0.078
Бридерное топ- ливо	-	0.96	0.04	-	-

¹ Вместе с Am-241.

² N.J. Nicholas, K.L. Coop, R.J. Estep, LA-12237-MS, 1992.

³ Плутоний, выделенный из отработанного топлива водяного реактора на низкообогащенном уране с выгоранием 33 МВт-сутки/кг, которое выдерживалось 10 лет до переработки.

⁴ Плутоний, выделенный из отработанного топлива с выгоранием 33 МВт-сутки/кг, которое выдерживалось 10 лет до переработки.

КРИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕАКТОРНОГО ПЛУТОНИЯ

Как видно из рис. 2, где приведены значения нейтронных поперечных сечений для деления в зависимости от энергии для главных изотопов плутония и урана (а также для америция-241 - продукта распада Pu-241), все изотопы плутония способны к делению. Действительно, критическая сборка из чистого металлического плутония может быть создана вне зависимости от его изотопного состава. Число нейтронов на деление (приблизительно три) одно и то же для Pu-239, Pu-240, Pu-241 и Pu-242. Оба нечетных изотопа (239 и 241) относятся к делящимся, то есть их деление может быть вызвано нейтронами любой энергии - как медленными, так и быстрыми. Их сечения отличаются в деталях, но они достаточно подобны, так что их «чистые» критические массы (вещество стандартной плотности без нейтронного отражателя) примерно равны и составляют около 15 кг для металла в δ -фазе (металлический плутоний может существовать в шести аллотропных формах, соответствующих различным кристаллическим конфигурациям; применительно к оружию чаще всего упоминаются α -фаза с плотностью 19,6 г/см³ и δ -фаза с плотностью 15,7 г/см³).

Для Pu-240 порог деления близок к 1 МэВ, но выше 1 МэВ сечение деления, хотя и более низкое по сравнению с Pu-239, все же выше, чем у U-235. Чистая критическая масса для Pu-240 в α -фазе составляет около 40 кг. Поскольку чистая критическая масса оружейного урана (с содержанием U-235 94%) равна 52 кг, можно сказать, что Pu-240 более эффективный делящийся материал, нежели оружейный уран, в металлической системе.

При рассмотрении изотопа Pu-242 удобно обратить внимание и на изотоп Am-241. Это дочерний продукт плутония-241, который испускает β -частицы с периодом полураспада 14,7 лет. Хотя его нет в свежем реакторном плутонии, содержание Am-241 непрерывно нарастает и, поскольку в отработанном топливе плутония-241 больше, чем плутония-242, оно в конечном итоге может превзойти содержание Pu-242. Характеристики деления Am-241 гораздо менее благоприятны по сравнению с Pu-241, так что по мере того, как плутоний замещается америцием, критическая масса плутония будет возрастать со временем, хотя не столь быстро, но никогда не вырастет слишком значительно. У каждого из изотопов Pu-242 и Am-241 порог деления близок к 1 МэВ. Выше 1 МэВ их сечения деления близки и каждое из них превышает сечение деления для U-235.

На практике при любом выгорании и в любой момент времени после удаления из реактора критическая масса металлического реакторного плутония лежит между значениями для Pu-239 и Pu-240, то есть такой плутоний более реактивен по сравнению с оружейным ураном. Реакторный плутоний можно привести в сверхкритическое (то есть, во взрывное) состояние при помощи любой системы сборки, которая может работать с U-235. В табл. 2 приведены значения чистых критических масс для различных изотопов плутония.

Чистые критические массы - это не те массы, которые нужны для создания изделия, поскольку при использовании отражателя нейтронов толщиной около 10 см критическая масса каждого из этих веществ может быть уменьшена примерно вдвое по сравнению с начальной чистой критической массой. Но относительное ранжирование критических масс почти не изменится при использовании отражателей.

Таблица 2: Различные свойства изотопов плутония и америция-241.

Изотоп	Период полураспада (лет) ¹	Критическая масса (кг, α -фаза)	Спонтанные нейтроны ($\text{г}^{-1}\text{с}^{-1}$)	Тепловыделение (Вт/кг)
Pu-238	87,7	10	2600	560
Pu-239	24 100	10	0,022	1,9
Pu-240	6 560	40	910	6,8
Pu-241	14,4	10	0,049	4,2
Pu-242	376 000	100	1700	0,1
Am-241	430	100	1,2	114

¹ По α -распаду, за исключением Pu-241, преобразующегося в Am-241 по β -распаду.

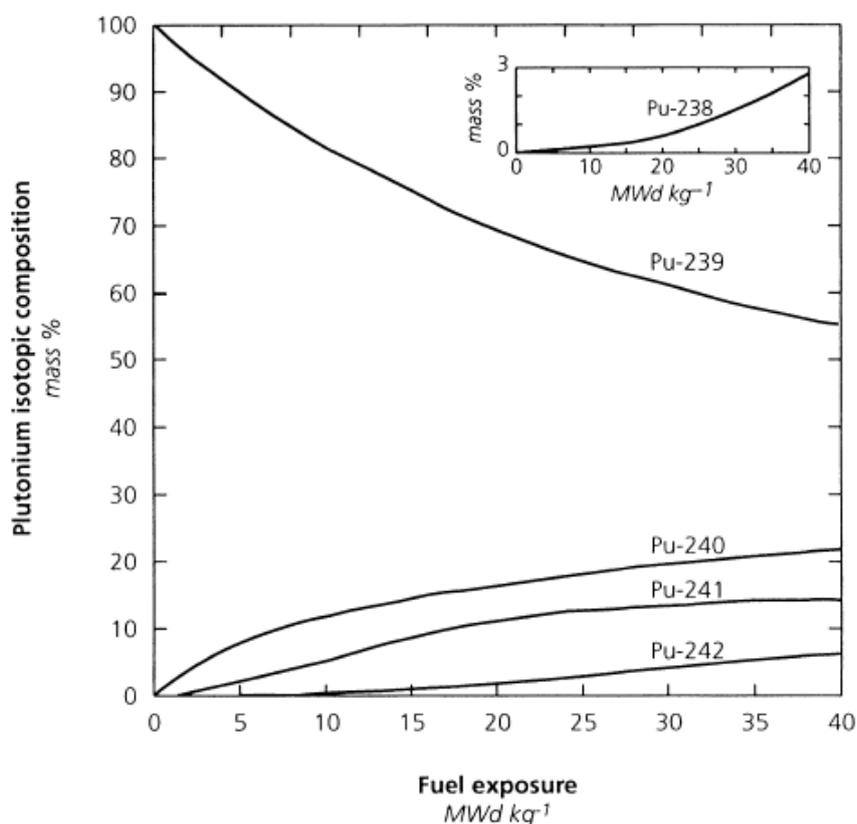


Рисунок 1: Изотопный состав плутония в зависимости от выгорания ядерного топлива в водянном реакторе под давлением после выгрузки. По горизонтальной оси отложено выгорание топлива в МВт-сутки/кг, по вертикальной оси – концентрация изотопов плутония в весовых процентах.

ЦЕПНАЯ РЕАКЦИЯ

Появившийся в плутониевой системе нейтрон может с разной вероятностью вызвать деление (при котором вылетают три нейтрона), выйти из системы или исчезнуть в результате поглощения. (В металлической системе вероятность последнего события совсем мала и в нашем случае. ею можно пренебречь.) Обозначим через k число прямых потомков первично-

го нейтрона, которые не уходят из системы; тогда результирующее изменение числа нейтронов составит $(k - 1)$, а скорость изменения будет равна $(k - 1)/\tau$, где τ - среднее время жизни нейтрона в системе. Если обозначить $(k - 1)/\tau = \alpha$, то число нейтронов в цепочке, начатой в начальный момент времени одним нейтроном, будет составлять $e^{\alpha t}$.

В подкритической системе величина k меньше единицы, α меньше нуля и число нейтронов экспоненциально уменьшается. В критической системе $k = 1$, $\alpha = 0$ и число нейтронов не меняется со временем. Таким образом, в критической системе вероятность деления нейтроном равна $1/3$, а вероятность выхода нейтрона из системы равна $2/3$. В надкритической системе k больше единицы, $(k - 1)$ и α - положительные величины, а число нейтронов экспоненциально растет, увеличиваясь в e раз за время α^{-1} . Хотя численный диапазон величины $(k - 1)$ четко ограничен (между нулем и двумя, причём достигает двух, когда ни один нейтрон не уходит из системы, то есть в бесконечной среде), он обеспечивает полное определение влияния степени надкритичности на скорость экспоненциального развития цепной реакции.

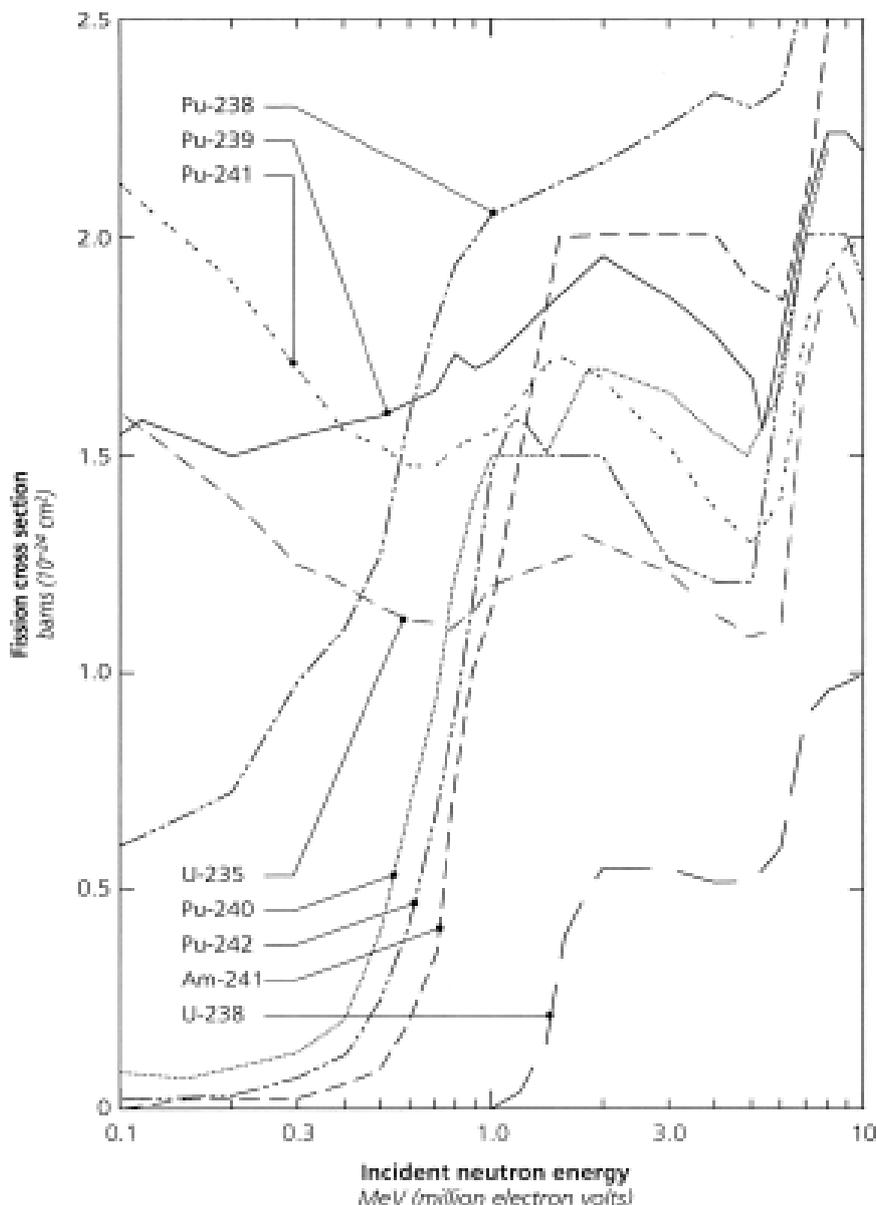


Рисунок 2: Сечение деления нейтронами для основных изотопов плутония и урана (и америция-241, продукта распада Pu-241) (по вертикальной оси, в барнах) в зависимости от энергии нейтронов (по горизонтальной оси, в МэВ).

Время жизни нейтрона в металлической системе τ - очень малая величина. Полная длина свободного пробега нейтрона в несжатом металлическом плутонии (δ -фаза) от рождения

до последующего деления составляет всего лишь около 15 см. (Поскольку рассеяние на ядрах происходит в несколько раз чаще, чем деление, этот пробег длиной 15 см обычно состоит из нескольких более коротких отрезков, проходимых в направлениях, распределение которых близко к случайному.) Средняя энергия нейтронов деления, движущихся в плутонии, после нескольких столкновений близка к 1 МэВ, так что их скорость составляет около $1,4 \cdot 10^9$ см/с. Соответственно, время жизни t близко к 10^{-8} с, а величина α равна примерно $(k - 1)10^8$ с⁻¹. Это значение α будет, конечно, изменяться пропорционально плотности вещества, поскольку длина свободного пробега (следовательно, и τ) обратно пропорциональна плотности.

При начале цепной реакции, когда происходит всего несколько делений на грамм вещества, состояние вещества никак не изменится. Фактически потребуется около e^{35} делений, чтобы выделилась одна калория на грамм в куске плутония массой около 10 кг, и это просто увеличит температуру вещества где-то на 30 °С, что не повлияет заметно на размер или форму вещества, а также на условия его движения. Но при e^{42} делений в системе массой 10 кг, выделяемая при делении энергия составит около килокалории на грамм - это типичное энерговыделение взрывчатки. На этом этапе цепной реакции плутоний будет испаряться и начнет оказывать на окружающую среду давление порядка мегабар. Такие давления преодолеют любые силы, прилагаемые для начального сжатия сборки, и за очень короткое время приведут к быстрому расширению ее центральной части. Можно полагать, что установление такого разрушающего движения и будет означать начало взрыва. Нельзя получить очень точное значение для этого момента, но точность здесь не имеет никакого значения. В дальнейшем мы будем принимать значение e^{45} делений как указание на начало, взрыва.

Если цепная реакция начинается только после завершения сборки, значение α в начале взрыва будет совпадать с номинальным значением α_0 , относящимся к завершённой сборке. Если же реакция пойдет еще до завершения сборки, когда α только еще стремится к α_0 , то значение α в момент начала взрыва будет таким, чтобы интеграл от $\alpha \cdot dt$, взятый от момента начала цепной реакции, оказался равным 45. Наименьший взрыв от преждевременного поджига произойдет при таком наиболее раннем начале цепной реакции, когда система станет критической в процессе сборки.

Во всех случаях α остается положительной величиной при начале взрыва, так что число нейтронов и скорость энерговыделения продолжают возрастать, даже если значения $(k - 1)$ (и, следовательно, α) будут уменьшаться из-за расширения сердцевин и последующего сокращения ее надкритичности. Это будет продолжаться до, тех пор, пока величина $(k - 1)$ не обратится в нуль (этот момент можно назвать «вторым критическим»), и в этот момент число нейтронов достигает максимума; почти одновременно максимума достигает и скорость энерговыделения. Начиная с этого момента система становится подкритической, число нейтронов быстро падает и, хотя энергия продолжает выделяться, скорость энерговыделения уменьшается, пока все нейтроны не уйдут из системы. Значительная доля полного энерговыделения падает на эту подкритическую фазу разлета сборки.

Из рассмотрения развития ядерного взрыва станет очевидным, что в любой конкретной системе с центральной сферой и нейтронным отражателем конечное энерговыделение будет тем меньше, чем меньше степень надкритичности (чем меньше значение α во время взрыва). Но это само по себе не дает нам возможности оценить степень ослабления мощности взрыва, связанного с тем или иным уменьшением значения α при начале взрыва. Однако Роберт Сербер¹ представил качественные аргументы, чтобы показать, что мощность любой конкретной сборки будет примерно пропорциональна значению α^3 при начале взрыва. (Обозначения Сербера совсем не такие, как у нас, а принятые им приближения применимы только к системам с ограниченной степенью надкритичности, но его заключения, хотя и качественные, подходят для наших целей, которые также носят качественный характер.)

МОЩНОСТЬ «ХЛОПКА»

В качестве чисто гипотетического примера рассмотрим твердую сборку имплозивного типа, использованную для «Тринити» (первого американского ядерного испытания 16 июля 1945 г.). Предположим наличие такой комбинации сердцевин и отражателя; когда критическая масса составляет около половины чистой критической массы. Сборка при создании

должна быть подкритической, но чтобы получить максимально благоприятные характеристики, допустим, что в процессе создания сборка близка к критической. Тогда масса плутониевой сферы (δ -фаза) должна быть в районе 7-8 кг; следовательно, ее радиус близок к 5 см. Поскольку направленная вовнутрь ударная волна от взрывчатки слегка сожмет отражатель, система станет критической примерно в то время, когда ударная волна дойдет до поверхности центральной сферы. При скорости волны около 5 км/с она пройдет через сферу где-то за 10^{-5} с. Таким образом, в течение t_0 (примерно 10^{-5} с) система будет оставаться надкритической до завершения формирования сборки, пока ударная волна не дойдет до центра. Предположим также, что в конечном состоянии $(k - 1)$ близко к единице, то-есть находится в середине диапазона надкритичности от 0 до 2. При таких допущениях расчетное значение α для этой гипотетической системы будет равно $\alpha_0 = 10^8$, а величина $\alpha_0 t_0$ составит приблизительно 10^3 . Обозначим расчетную мощность взрыва через Y_0 .

В качестве первого грубого приближения предположим, что α линейно изменяется со временем, то-есть, $\alpha = c \cdot t$ (аналогичное приближение было принято Сербером; конечно, оно не точно, так что в результате мы получим только общее представление). Наименьшее значение взрыва, который произойдет из-за преждевременного поджига, определяется цепной реакцией, начинающейся с $\alpha = 0$ и завершающейся, когда интеграл от $\alpha \cdot dt$ станет равным 45. Наименьшая возможная мощность взрыва от преждевременного поджига называется мощностью «хлопка» Y_F . Пусть α_F и t_F - значения α и надкритического промежутка времени, относящиеся к «хлопку», тогда $1/2 \alpha_F \cdot t_F = 45$, или $(\alpha_F)^2 / c = 90$. Для номинальной ситуации $\alpha_0 \cdot t_0 = (\alpha_0)^2 / c = 1000$. Отсюда следует, что $(\alpha_F)^2 / ((\alpha_0)^2) = 90/1000$, то-есть, $\alpha_F = 0,3 \alpha_0$. Используя теперь зависимость $Y \propto \alpha^3$, получим, что $Y_F = 0,027 Y_0$. Итак, грубо говоря, в нашем гипотетическом примере мощность «хлопка» лежит в диапазоне нескольких процентов от расчетной мощности. Таким образом, если расчетная мощность равна 20 кт, то мощность «хлопка» может составить 0,5 кт.

На основе приведенных выше аргументов можно сделать несколько замечаний. Одно из них состоит в том, что можно добиться того же конечного состояния, если использовать более быстрое радиальное сжатие, поскольку при уменьшении t_0 вырастут отношения α_F / α_0 и Y_F / Y_0 . Аналогично, если конкретное устройство надо подвести к более эффективному конечному состоянию (например, путем получения более высокого значения α_0 из-за увеличения сжатия), то хотя мощность «хлопка» может стать меньше по отношению к расчетной (выросшей) мощности, она вырастет по абсолютной величине (по крайней мере, на основе использованных выше приближений). И, наконец, если, как это справедливо для т.н. «пушечной» системы (где критическая сборка создается выстреливанием навстречу друг другу двух подкритических масс с относительной скоростью примерно $3 \cdot 10^4$ см/с, а не $5 \cdot 10^5$ см/с, как предполагалось выше), значение t_0 увеличится более, чем в 10 раз, то отношение α_F / α_0 уменьшится более, чем в $10^{1/2}$ раз, а отношение Y_F / Y_0 - более, чем в 30 раз. Наряду с этим резко вырастет вероятность преждевременного взрыва. В этом и состоит сущность привычного заявления о том, что плутоний нельзя использовать в сборке «пушечного» типа.

Приведенные выше аргументы, относящиеся к плутонию, применимы также и к оружейному урану. Не считая более высокой критической массы, важное отличие состоит в том, что в уране с 94%-ным содержанием U-235 внутренний источник нейтронов слабее по сравнению с оружейным плутонием в несколько тысяч раз. Мощность "хлопка", действительно, очень мала, но источник нейтронов достаточно слаб, так что вероятность слишком раннего преждевременного поджига в устройствах с оружейным ураном оказывается вполне терпимой даже в сборке пушечного типа.

ВЛИЯНИЕ ПРЕЖДЕВРЕМЕННОГО ПОДЖИГА НА РАЗБРОС МОЩНОСТЕЙ

Через неделю после первого ядерного взрыва 16 июля 1945 года Роберт Оппенгеймер изложил заместителю генерала Лесли Гровса² ожидаемые характеристики изделия типа «Тринити» в боевых условиях:

«Вероятность того, что первая боевая бомба «Толстяк» из плутония сработает с худшими, чем оптимальные, показателями, составляет около 12%. Существует 6%-ная вероятность, что энерговыделение будет ниже 5000 тонн, и 2%-ная вероятность, что оно окажется

ниже 1000 тонн. Энерговыделение не должно быть существенно ниже 1000 тонн, если только не произойдет реальных сбоя в одном из компонентов.».

А еще через неделю генерал Гровс написал начальнику объединенных штабов:

«Существует определенная вероятность - от 12% до 20% по мере того, как мы будем увеличивать темпы производства в Хэнфорде испытанного оружия, что взрыв окажется слабее из-за подрыва ранее оптимального времени. Но в любом случае взрыв должен быть порядка тысяч тонн.»

Таблица 3: Вероятность получения определенного выхода (по данным письма Оппенгеймера) в сборке типа "Тринити" для нейтронных источников различной мощности.

Источник	Энерговыделение			
	20 кт	5 кт	1 кт	до 1 кт
Тринити	0,88	0,94	0,98	0,02
х 10	0,28	0,54	0,82	0,18
х 20	0,08	0,29	0,67	0,33
х 30	0,02	0,16	0,55	0,45
х 40	0,006	0,08	0,45	0,55

Таблица 4: Вероятность получения определенного выхода (по данным письма Оппенгеймера) в сборке типа "Тринити", но в два раза более быстрой, для нейтронных источников различной мощности.

Источник	Энерговыделение			
	20 кт	5 кт	1 кт	до 1 кт
Trinity	0,94	0,97	0,99	0,01
х 10	0,54	0,74	0,90	0,10
х 20	0,28	0,54	0,82	0,18
х 30	0,16	0,40	0,74	0,26
х 40	0,08	0,30	0,67	0,33

Таблица 5: Генерация нейтронов при спонтанном делении и тепловыделение при распаде для плутония различного качества.

Степень чистоты	Нейтроны спонтанного деления ($\text{г}^{-1}\text{с}^{-1}$)	Тепловыделение при распаде (Вт/кг)
Сверхчистый	20	2.0
Оружейный	66	2.3
Реакторный	360	10.5
Оксидное топливо	570	13.7

Ясно, что оба - Оппенгеймер и Гровс, говорили о том, что мы определили как мощность «хлопка». Они не устанавливают значения этой мощности, но в соответствии с их заявлением, что «...она не должна быть меньше тысячи тонн», можно предположить, что они думали о некоей величине, большей половины этого значения и лежащей, вероятно, где-то вблизи 700 тонн. Поскольку расчетная мощность данного изделия, как считалось в то время, составляла 20 кт, 700 тонн представляют 3,5% от нее, а это не вступает в противоречие с тем, что уже было сказано о мощностях "хлопка" для изделия такого типа. Содержание Pu-240 в плутонии, использованном для изделия "Тринити", не было объявлено, но оно должно быть совсем небольшим, менее значения 6%, которое принято сейчас для определения плутония "оружейного" типа. Реакторы, на которых был произведен плутоний, использованный в июле 1945 года, начали работать только в декабре 1944 года - за ограниченное время, доступное для облучения, сам достигнутый уровень облучения был очень низок. Принципиальным результатом использования реакторного плутония вместо плутония высокой чистоты, имевшегося в распоряжении летом 1945 года, стало бы увеличение вероятностей того, что мощ-

ность будет ниже номинала, но это не изменило бы в значительной степени фактическое значение мощности «хлопка», который всегда будет повторен или превзойден.

В связи с улучшением опытных данных и значительно выросшими вычислительными возможностями, дающими более точное описание относящихся к делу сложных нейтронных и гидродинамических процессов по сравнению с 1945 годом, наиболее вероятно, что приведенные Оппенгеймером конкретные цифры потребуют некоего пересмотра. Но это не изменит общей картины, так что значения Оппенгеймера адекватны нашим потребностям, которые носят чисто качественный характер.

Произведенную Оппенгеймером классификацию вероятностей можно перефразировать следующим образом: для имплозивной системы сборки «Тринити» при использованной степени чистоты плутония изделие с вероятностью 88% могло выжить достаточно долго без возникновения цепной реакции, чтобы обеспечить расчетную мощность в 20 кт; с вероятностью 94% оно могло уцелеть достаточно долго, чтобы мощность оказалась выше 5 кт (четверть расчетной мощности); с вероятностью около 98% оно обеспечивало мощность свыше 1 кт. Только в двух процентах от всех подрывов цепная реакция пошла бы настолько рано, что энерговыделение оказалось между мощностью «хлопка» и одной килотонной. Изменение одного лишь нейтронного источника меняет эти вероятности. Например, для источника, интенсивность которого выросла в n раз, вероятность выживания с получением расчетной мощности окажется равной только 0.88^n , и так далее. В частности, вероятности обеспечить указанный уровень мощности с источниками нейтронов, интенсивность которых превышает интенсивность источника «Тринити» в 10, 20, 30 и 40 раз, приведены в табл. 3. В табл. 4 приведены вероятности достижения указанных уровней мощности для системы сборки, сжимаемой в два раза быстрее, чем «Тринити».

Самый большой нейтронный источник, указанный в табл. 3, вероятно, интенсивнее того, какой может быть в максимально выгоревшем на сегодняшний день плутонии (см. табл. 5). Замена плутония высокой чистоты, использованного в изделии «Тринити», на слегка большую массу реакторного плутония повлияет как на номинальную мощность, так и на мощность хлопка. Но приведенная выше общая картина останется справедливой: в системах сборки типа «Тринити» для реакторного плутония любой степени чистоты можно, имея расчетную мощность порядка десятков, кт и соответствующую мощность хлопка, составляющую несколько процентов от расчетной, то-есть, несколько сот тонн. По мере того, как интенсивность источника нейтронов возрастает от низкого уровня к очень высокому, - распределение получаемой мощности изменится от такого, где типичной окажется расчетная мощность и очень сильные преждевременные поджиги происходят редко, до такого, где расчетная мощность реализуется редко (хотя полностью ее никогда нельзя исключить), а типичные значения мощности лежат в диапазоне от одной до нескольких мощностей хлопка. Хотя мощности таких околохлопковых взрывов гораздо слабее расчетных (почти в 20 раз в рассмотренном конкретном случае - для так называемого "примитивного" изделия типа «Тринити»), они все же оказываются весьма опасными. Очень сильные разрушения и опасность от ударных, тепловых и радиационных эффектов, действие которых простиралось примерно на милю для использованных в Японии бомб, для подобных «малых» мощностей будут эффективны «только» на расстояниях порядка $1/3 - 1/2$ мили.

ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЕ

В связи с широким диапазоном α -активности веществ, помещенных в табл. 5, существует широкий диапазон тепловыделения и излучения радиации этими веществами. Оружейный материал (обращение с которым уже привычно) выделяет около 2,5 Вт/кг, а реакторный материал - более 10,5 Вт/кг. Герхард Локе недавно обратил внимание, что сырая ядерная взрывчатка, содержащая, по-видимому, 8 кг реакторного плутония, будет испускать наружу почти 100 Вт тепла, что гораздо выше 8 Вт, испускаемых примерно тремя килограммами оружейного плутония, которые, как он считает, содержатся в современной ядерной боеголовке³.

Поскольку расположенная вокруг плутониевой сферы взрывчатка обладает изоляционными свойствами, которые всего лишь в несколько раз хуже, чем у дерева (около 0,4 Вт/К)⁴, всего 10 см ВВ могли бы привести к равновесной температуре сердцевины около 190

С.⁵ По-видимому, темпы разрушения многих типов ВВ начинают становиться существенными при температурах выше, примерно 100 С.

Что касается испускаемой радиации, то полученные Иоханом Сваном из технической группы мирных исследований университета Чалмерса (Гетеборг, Швеция) данные⁶ указывают на почти шестикратное превышение поверхностной дозы облучения у такого вещества как реакторный плутоний, упомянутый в табл. 5 (и восьмикратное для оксидного топлива) по сравнению с оружейным плутонием, с которым обычно приходится иметь дело.

При конструировании сырой ядерной взрывчатки на основе реакторного плутония придется учитывать дополнительное энерговыделение и радиационное облучение, но явно можно обеспечить меры, чтобы справиться с этими особенностями. Например, поскольку у алюминия теплопроводность почти в 1000 раз выше, чем у ВВ, тепловой мостик с полным поперечным сечением на поверхности центральной сферы порядка 1 см² мог бы вдвое уменьшить подъем температуры, вызванный реакторным плутонием.

ВЫВОДЫ

1. Реакторный плутоний при любом уровне выгорания является потенциально взрывчатым веществом.
2. Трудности при разработке эффективной конструкции самого прямолинейного типа не существенно выше с использованием реакторного плутония, чем те, с которыми пришлось столкнуться при использовании оружейного плутония.
3. Хотя опасности при обращении с реакторным плутонием в чем-то превышают опасности, связанные с оружейным плутонием, они такого же типа и их можно преодолеть, применяя те же самые предосторожности. По крайней мере, это может стать проблемой только при создании умеренного количества изделий. Для проекта, требующего сборки изделий на конвейере, может потребоваться больше предосторожностей типа дистанционных систем управления на отдельных рабочих этапах, чем при обращении с оружейным плутонием или с ограниченным числом изделий.
4. Необходимость в защите против распространения и неправильного использования выделенного плутония фактически одинаково относится к плутонию любой чистоты.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Robert Serber, *The Los Alamos Primer: The First Lectures on How to Build an Atomic Bomb* (Berkeley, California: University of California Press, 1992). (Записи лекций Сербера 1943 года при открытии Лос-Аламосской лаборатории, рассекреченные примерно в 1965 году).
2. Цитируется в: Albert Wohlstetter, *Foreign Policy*, 25, Winter 1976-1977, p.160.
3. Gerhard Locke, "Why Reactor-Grade Plutonium is No Nuclear Explosive Suitable for Military Devices", prepared for Workshop on the Disposition of Plutonium, Bonn, 13-16 June 1992.
4. According to Egbert Kankleit, Christian Kuppers and Ulrich Imkeller, *Bericht zur Waffentauglichkeit von Reaktorplutonium* (IANUS Institute für Kernphysik, Technische Hochschule Darmstadt).
5. В предположении, что радиус сборки равен семи сантиметрам при наружной температуре 20 С.
6. Johan Swahn, "The Long-Range Nuclear Explosives Predicament" (Goteborg: Technical Peace Research Group, Institute of Physical Research Theory, 1992).

ВЕРОЯТНОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МОЩНОСТЕЙ ВЗРЫВА

Фрэнк фон Хиппель и Эдвин Лайман

В этой заметке приводятся расчеты вероятностей различных мощностей взрыва ядерных взрывных устройств, основанные на упрощенной модели поведения имплозионных конструкций Марка.

Фрэнк фон Хиппель и Эдвин Лайман работали в Центре энергетических и экологических исследований Принстонского университета. В 2009 году Фрэнк фон Хиппель работал по программе «Наука и всеобщая безопасность» в Школе общественных и международных отно-

шений Вудро Вильсона, Принстон, штат Нью-Джерси. В 2009 году Эдвин Лайман работал по программе «Наука и всеобщая безопасность» в Союзе обеспокоенных ученых, Вашингтон, округ Колумбия.

Эта заметка была впервые опубликована в журнале *Наука и всеобщая безопасность*, т. 4, № 1 в 1993 году. Она перепечатывается здесь в связи с 20-летним юбилеем журнала.

В упрощенной модели Марка предполагается, что скорость размножения нейтронов линейно возрастает от нуля в момент времени $t = 0$ до единицы в момент максимальной сверхкритичности $t = t_0$

$$k - 1 = \frac{t}{t_0}$$

Временной экспоненциальный множитель нейтронной цепной реакции в этом случае равен

$$\alpha = \frac{k - 1}{\tau} = \frac{t}{t_0 \tau}$$

где τ - среднее время между поколениями нейтронов.

Критерий предварительной детонации Марка заключается в том, что если цепная реакция начинается преждевременно, в момент t_i , то e^{45} делений произойдут до того, как будет достигнута максимальная критичность, т.е.

$$\int_{t_i}^{t_f} \alpha(t) dt = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{(t_0 \tau)} \right] \left[(t_f)^2 - (t_i)^2 \right] = 45$$

где $t_i < t_0$. Определяя t_f , получаем:

$$t_f = \left[(t_i)^2 + 90 t_0 \tau \right]^{1/2} \quad (\text{A-1})$$

Расчетная мощность взрыва Y_Q будет достигнута при $t_f \geq t_0$, или

$$t_i \geq t_0 \left(1 - \frac{90 \tau}{t_0} \right)^{1/2} \equiv t_i^{crit} \quad (\text{A-2})$$

Из выбранных Марком значений $t_0 = 10^{-5}$ сек и $\tau = 10^{-8}$ сек следует, что $t_i \geq 0,9544 \cdot 10^{-5}$ сек.

Марк использовал также приближение из сборника *Los Alamos Primer*¹, связывающее уменьшенную мощность взрыва при преждевременной детонации Y с расчетной мощностью взрыва Y_0

$$Y = \left[(k_f - 1)^3 \right] Y_0 = \left(\frac{t_f}{t_0} \right)^3 Y_0 \quad t_f < t_0 \quad (\text{A-3})$$

где

$$k_f \equiv k(t_f) = \frac{t_f}{t_0}$$

Из уравнения A-1 минимальное значение t_i равняется

$$(t_f)_{\min} = (90t_0\tau)^{1/2}$$

Поэтому из уравнения А-3 следует, что минимальное значение Y равно

$$\left(\frac{Y}{Y_0}\right)_{\min} = \left(\frac{90\tau}{t_0}\right)^{1/2} \quad (\text{A-4})$$

Спонтанное деление плутония приводит к генерации N нейтронов в секунду. Для шести килограммов плутония² оружейного качества или реакторного качества величина N соответственно равна $3 \cdot 10^5$ и $20 \cdot 10^5$ нейтронов в секунду. Мы рассмотрим также случай с $N = 3 \cdot 10^4$ нейтронов в секунду (один процент плутония-240), который, как мы считали, приблизительно соответствует оценкам вероятности пониженной мощности взрыва для испытания «Тринити», приведенным в письме Оппенгеймера к Гровсу.

Ожидаемое значение того, что один нейтрон может начать цепную реакцию, равно $(k - 1)$. Поэтому вероятность P того, что цепная реакция начнется до момента времени T , равна³

$$P(t < T) = 1 - \exp[-NT(k-1)_{av}] = 1 - \exp\left[-\frac{1}{2}NT\left(\frac{T}{t_0}\right)\right] \quad (\text{A-5})$$

где мы использовали то обстоятельство, что из-за линейного возрастания $(k - 1)$

$$(k-1)_{av} = \frac{1}{2}(k-1) = \frac{1}{2}\left(\frac{T}{t_0}\right)$$

Из уравнений А-2 и А-5 следует, что вероятность взрыва с полной мощностью равна

$$1 - P(t < t_i^{crit}) = \exp\left[-\frac{1}{2}N(t_0 - 90\tau)\right] \quad (\text{A-6})$$

Для значений параметров $t_0 = 10^{-5}$ сек и $\tau = 10^{-8}$ сек вероятности того, что цепная реакция не начнется, пока не будет гарантирована полная мощность взрыва, для значений скорости генерации спонтанных нейтронов N в $0,5 \cdot 10^5$, $3,0 \cdot 10^5$ и $20,0 \cdot 10^5$ нейтронов в секунду, соответственно равны 79,7, 25,5 и 0,0112 процента.

Дифференциальная вероятность для цепной реакции, начинающейся в момент времени t_i , определяется как

$$\frac{dP}{dt} = N\left(\frac{t_i}{t_0}\right) \exp\left[-\frac{1}{2}N\left(\frac{t_i^2}{t_0}\right)\right]$$

Плотность вероятности пониженной мощности взрыва (dP/dY) определяется следующим выражением

$$\begin{aligned}
\frac{dP}{dY} &= \left(\frac{dP}{dt_i} \right) \left(\frac{dt_i}{dY} \right) \\
&= \left(\frac{dP}{dt_i} \right) \left(\frac{dt_i}{dt_f} \right) \left[\frac{dt_f}{d(k_f - 1)} \right] \left[\frac{d(k_f - 1)}{dY} \right] \\
&= \left(\frac{dP}{dt_i} \right) \left(\frac{t_f}{t_i} \right) (t_0) \frac{1}{3} \left[\left(\frac{t_0}{t_f} \right)^2 \right] \frac{1}{Y_0} \\
&= \frac{1}{3} \left(\frac{1}{Y_0} \right) N \left(\frac{t_0^2}{t_f} \right) \exp \left[-\frac{1}{2} N t_0 \left(\frac{t_i}{t_0} \right)^2 \right]
\end{aligned}$$

Определяя

$$x \equiv \frac{Y}{Y_0}$$

и подставляя t_i из уравнения А-1 и t_f из уравнения А-3, мы получим

$$\frac{dP}{dx} = \left[\frac{1}{3} N t_0 \exp(45N\tau) \right] x^{-1/3} \exp \left[-\frac{1}{2} N t_0 x^{2/3} \right]$$

И, наконец, интегрируя от

$$x_{\min} = \left(\frac{90\tau}{t_0} \right)^{3/2}$$

(см. уравнение А-4) до x , получаем

$$P \left(\frac{Y}{Y_0} < x \right) = \int_{x_{\min}}^{\infty} dx' \left(\frac{dp}{dx'} \right) = 1 - \exp \left[-\frac{1}{2} N t_0 x^{2/3} + 45N\tau \right]$$

Когда $x = x_{\max} = 1$, мы имеем такую же полную вероятность преждевременной детонации с пониженной мощностью, как та, которая была рассчитана из уравнения А-6 и

$$P \left(\frac{Y}{Y_0} < 1 \right) = 1 - P(Y = Y_0)$$

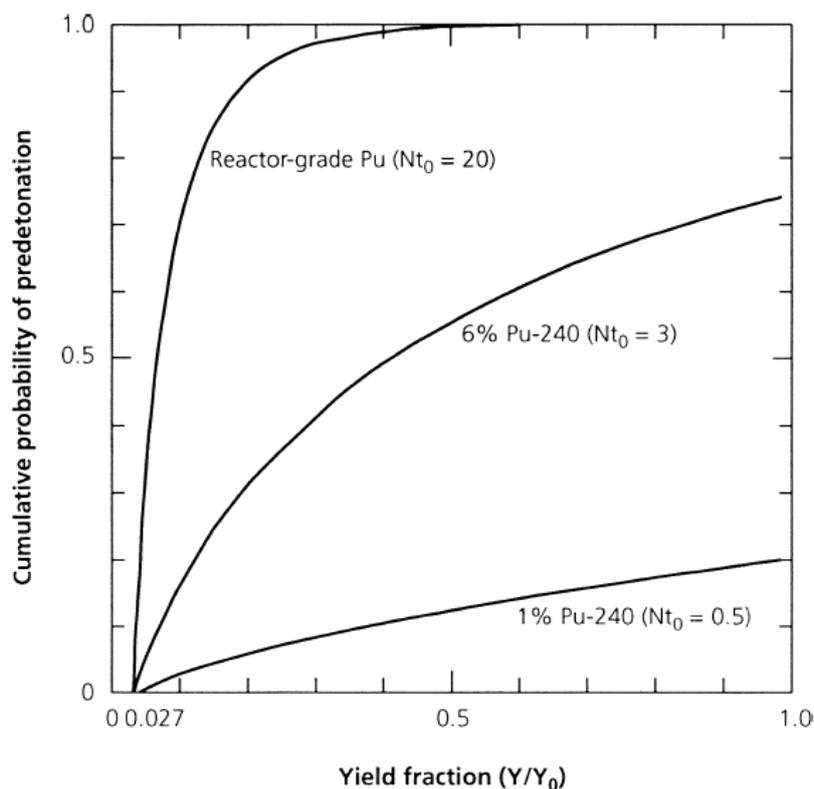


Рисунок А-1: Интегральная вероятность предварительной детонации $P(Y/Y_0 < 1)$ в зависимости от доли мощности Y/Y_0 для плутониевых зарядов со скоростью генерации спонтанных нейтронов N , равной 0,5; 3 и 20-Ю⁵ нейтронов в секунду при $t_0 = 10^{-5}$ и $\tau = 10^{-8}$ секунды.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Robert Serber, *The Los Alamos Primer: The First Lectures on How to Build an Atomic Bomb* (Berkeley, California: University of California Press, 1992), p. 42.
2. По сообщениям, в устройстве для испытания «Тринити» содержалось 6,1 килограмма плутония. General Leslie R. Groves, Memorandum to the Secretary of War, 18 July 1945, Appendix P in Martin Sherwin, "A World Destroyed", New York, Alfred A. Knopf, 1975.
3. Robert Serber, *The Los Alamos Primer: The First Lectures on How to Build an Atomic Bomb* (Berkeley, California: University of California Press, 1992), p. 48.