

## Приложение А

### РАСЩЕПЛЯЮЩИЕСЯ МАТЕРИАЛЫ И МОДЕЛИ ЯДЕРНЫХ БОЕПРИПАСОВ

*Стив Феттер, В.А. Фролов, О.Ф. Прилуцкий, Р.З. Сагдеев.*

В данном приложении рассматриваются расщепляющиеся материалы, которые могут быть обнаружены при поиске ядерного оружия. Состав расщепляющегося материала определяет тип и мощность излучения, образующегося при радиоактивном распаде, а конструкция оружия определяет долю выходящего излучения.

#### 1. Состав расщепляющихся материалов

Изотопы расщепляющихся материалов - это те, которые могут поддерживать реакцию деления на быстрых нейтронах. На таких реакциях основано действие взрывных устройств, подобных тем, что разрушили Хиросиму и Нагасаки. В современном ядерном оружии большая доля энергии выделяется в реакциях термоядерного синтеза, но взрывные устройства на основе деления ядер все равно остаются необходимыми для инициирования термоядерной реакции.

В американском ядерном оружии используются два расщепляющихся изотопа: уран-235 и плутоний-239. Несколько других изотопов тоже могут применяться в качестве расщепляющихся материалов (например, уран-233 или плутоний-241), но все они более дороги для производства и изготовления, а также более радиоактивны, по сравнению с ураном-235 или плутонием-239.

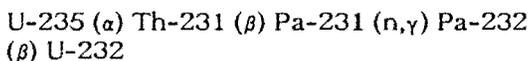
##### 1.1. Высокообогащенный уран

Природный уран содержит 0,7% урана-235. При изготовлении высокообогащенного урана используются различные технологии разделения изотопов для увеличения концентрации урана-235 до 90% и более. Количество высокообогащенного урана, предназначенного для использования в американском ядерном оружии оценивается примерно в 500 тонн<sup>1</sup>. Если предположить, что в американских арсеналах имеется около 25 000 ядерных устройств, то на каждое из них придется около 20 килограммов высокообогащенного урана. Для сравнения, для создания современного взрывного устройства на основе деления или для "запала" термоядерного устройства, по оценке требуется от 10 до 15 килограммов высокообогащенного урана<sup>2</sup>. Поскольку в большинстве современных ядерных боеприпасов для запального устройства применяется плутоний, то вероятно,

что в американских ядерных боеприпасах высокообогащенный уран применяется в так называемых термоядерных вторичных компонентах.

Мы предполагаем здесь, что высокообогащенный уран содержит 93,5% урана-235, 5,5% урана-238, и 1% урана-234<sup>3</sup>. Если в качестве исходного продукта процесса обогащения используется чистый природный уран, тогда никаких других изотопов в наличии не будет. С другой стороны, если исходный продукт будет загрязнен ураном из переработанного реакторного топлива, то будут присутствовать изотопы урана-232, 233 и 236.

Уран-232 образуется в ядерных реакторах по такой схеме:



В течение года в результате распада урана-235 образуется около одной части на миллиард Pa-231 с периодом полураспада 33 тысячи лет и сечением захвата тепловых нейтронов 260 барн. Один грамм урана-232 излучает около  $2,7 \cdot 10^{11}$  фотона с энергией 2,614 МэВ в секунду в результате распада одного из своих дочерних ядер, таллия-208 (см. Приложение Б).

Два последних изотопа в малых концентрациях проблем не представляют, но уран-232 сильно радиоактивен: при концентрации всего лишь 0,05 частей на миллиард, уран-232 будет испускать фотоны со скоростью, равной скорости испускания таких фотонов из всех других изотопов в высокообогащенном уране, вместе взятых<sup>4</sup>. Согласно требованиям Министерства энергетики США, допустимый уровень концентрации урана-232 в исходном продукте для разделения изотопов в 80 раз выше, чем для высокообогащенного урана<sup>5</sup>.

Если высокообогащенный уран в американских ядерных боеприпасах загрязнен

ураном-232, то обнаружить такие боеприпасы будет проще, чем следует из нашего анализа. Сторона, пытающаяся затруднить пассивное обнаружение, сможет, конечно, использовать в процессе обогащения только чистый природный уран.

Мы предполагаем, что для включения свежеприготовленного высокообогащенного урана в ядерное устройство нужен по крайней мере один год. В большинстве хранящихся ядерных боеприпасов высокообогащенный уран значительно старше. Его средний возраст в американских ядерных боеприпасах составляет около 30 лет<sup>6</sup>. По-видимому, материалы советского производства несколько моложе. Однако, скорость образования фотонов в основных линиях зависит от возраста высокообогащенного урана не очень сильно.

Даже если после обогащения в конечном продукте останутся только изотопы урана, их радиоактивный распад с течением времени приведет к появлению изотопов многих других элементов. На практике, высокообогащенный уран может быть загрязнен легкими элементами, такими как углерод и кислород. Хотя эти элементы сами по себе не радиоактивны, они могут испускать нейтроны, при столкновениях с образующимися в процессе радиоактивного распада урана - частицами. Если легкие элементы присутствуют в значительных концентрациях, то скорость выхода нейтронов в  $(\alpha, n)$ -реакциях может быть больше, чем при спонтанном делении в высокообогащенном уране. К сожалению, у нас нет возможностей определить концентрацию примесей легких элементов в высокообогащенном уране. Для расчета скорости  $(\alpha, n)$ -реакции, мы предполагали, что весовая концентрация кислорода равна 0,2%, что примерно равно его концентрации в плутонии оружейного качества.

## 1.2. Плутоний оружейного качества

Плутоний не существует в природе, за исключением загрязнений искусственного происхождения. Его производят из урана в ядерных реакторах. Плутоний оружейного качества содержит около 93% расщепляющегося изотопа плутония-239. Общее количество плутония оружейного качества в арсенале США оценивается в 93 000 кг<sup>7</sup>. На одну боеголовку приходится 3-4 кг плутония; этого количества достаточно для изготовления ядерного взрывного устройства<sup>8</sup>.

Мы предположим, что после переработки (процесса, в котором плутоний извлекают из реакторного топлива) плутоний оружейного качества содержит только изотопы плутония и небольшие количества легких элементов. В

нем могут присутствовать также следы осколков деления, но они не будут влиять на результаты нашего анализа. И в случае радиоактивного распада плутония в результате образуется много других изотопов. Средний возраст плутония оружейного качества в арсенале США около 20 лет, а материалы советского производства должны быть несколько моложе<sup>9</sup>. Наиболее удобные для обнаружения линии плутония через 20 лет хранения становятся в 10 раз сильнее, чем через 1 год после изготовления.

Мы предполагаем, что изотопный состав плутония оружейного качества таков: 93,5% плутония-239, 6,0% плутония-240, 0,44% плутония-241, 0,05% плутония-242 и 0,005% плутония-238<sup>10</sup>. Два других долгоживущих изотопа, плутоний-236 и плутоний-244, присутствуют в весьма малых концентрациях. Плутоний-244 особого влияния не окажет, но плутоний-236 сильно радиоактивен. Плутоний-236 может стать главным источником фотонов высоких энергий из плутония оружейного качества при концентрациях выше 10 частей на миллиард<sup>11</sup>. Вероятно, что плутоний-236 присутствует в плутонии оружейного качества в концентрациях меньших, чем 1 часть на миллиард, мы будем пренебрегать его наличием<sup>12</sup>.

В малых концентрациях будут присутствовать и легкие элементы, такие как литий, бериллий, углерод и кислород. Несмотря на то, что у нас нет возможности получить точные оценки концентраций этих примесей, известно, что при  $(\alpha, n)$ -реакциях в 1 г плутония оружейного качества образуется около 1 нейтрона/с<sup>13</sup>. Для обеспечения эквивалентной скорости образования нейтронов достаточна концентрация кислорода в 0,2 весовых процента.

Очистка плутония оружейного качества. Плутоний-239 не является сильным источником нейтронов и фотонов. Фактически все излучения, которые могут быть использованы для пассивного обнаружения, связаны с другими изотопами плутония. Например, 97% нейтронов из плутония оружейного качества образуются при спонтанном делении плутония-240. Если можно будет понизить концентрацию других изотопов (при разумной стоимости), то пассивное обнаружение будет сильно затруднено.

Ядерная боеголовка с 4 кг плутония должна испускать около 400 000 нейтронов в секунду (см. табл. 3 в основной статье). Как показали проведенные в основной статье расчеты, при мощности излучения в 1000 нейтронов в секунду ее обнаружение находится на пороге возможного, а при понижении ее до 100 нейтронов в секунду становится вообще невозможным (по крайней мере,

переносными приборами). Это может быть достигнуто при снижении концентрации плутония-240 в 400-4000 раз, и концентрации плутония-238 и 242 в 20-200 раз. Концентрация примесей легких элементов также должна быть понижена на 1-2 порядка величины для уменьшения нейтронного излучения от ( $\alpha, n$ )-реакций.

Хотя очистка от нежелательных элементов достаточна проста, очистка от нежелательных изотопов плутония сложна и дорога. Единственный метод разделения изотопов, при котором может быть достигнута требуемая высокая чистота, - это лазерное разделение изотопов в атомарной паре (метод AVLIS). В данном процессе лазер ионизирует не нужный (или, наоборот, нужный) изотоп, который затем собирается на заряженной пластине. Запланированный американский завод разделения специальных изотопов (SIS) позволит при одном проходе через секцию разделения AVLIS превратить плутоний реакторного качества в плутоний оружейного качества, понижая концентрацию плутония-240 в 2-3 раза, а концентрации других изотопов плутония в 2-6 раз.

Если постоянный трехкратный коэффициент уменьшения концентрации плутония-240 может быть достигнут для каждого прохода через секцию AVLIS, то 6 или 8 последовательных проходов через одиночную секцию, или один проход через серию из 6 или 8 идентичных секций, должен будет понизить концентрацию в 400-4000 раз. Предполагая, что стоимость одного прохода через разделительную секцию будет пропорциональна ее производительности, стоимость плутония высокой чистоты будет примерно в шесть или восемь раз больше, чем стоимость плутония оружейного качества, производимого на установке SIS. Согласно текущим оценкам, последняя равна примерно 200 тысячам долларов за килограмм<sup>14</sup>. Очистка четырех килограммов высокочистого плутония-239 для боеголовки будет поэтому стоить около пяти миллионов долларов. Поскольку в настоящее время стоимость изготовления "доставляемой" боеголовки примерно равна этой величине, стоимость дополнительной очистки не может рассматриваться как серьезное препятствие<sup>15</sup>.

Указанная стоимость может уменьшиться, если относительно уменьшение концентрации изотопа с малой распространенностью за один проход ступени разделения может быть увеличено, так что можно будет использовать меньшее число проходов. Это может быть достигнуто даже без качественного изменения существующей технологии метода AVLIS<sup>16</sup>.

### 1.3. Обедненный уран

Предполагается, что обедненный уран, являющийся "отходом" процесса разделения изотопов, может использоваться в ядерных боеприпасах в качестве материала "поршня" или корпуса. Поскольку этот материал радиоактивен, и может испытывать деление под действием нейтронов или фотонов высоких энергий, он может быть обнаружен активными или пассивными методами. Мы будем предполагать, что в обедненном уране содержится 99,8 процента урана-238 и 0,2 процента урана-235.

### 2. Модели ядерных боеприпасов

При более или менее надежной оценке возможности обнаружения расщепляющихся материалов необходимо принимать во внимание поглощение и рассеяние нейтронов и фотонов. Несмотря на то, что конкретная конструкция ядерного боеприпаса секретна, общие особенности его устройства сейчас хорошо известны. Модели, представленные ниже, не следует рассматривать как приближение к реальным конструкциям советских или американских ядерных боеприпасов. Они предназначены скорее для иллюстрации диапазона возможных пределов изменений (в особенности, нижнего) мощности излучения этих изделий.

Ядерное взрывное устройство на основе деления, или первичный компонент термоядерного взрывного устройства, может быть представлено в виде набора сферических концентрических оболочек. Внутри расположен расщепляющийся материал. Мы предположим, что внешний радиус сферы равен 7 сантиметрам для высокообогащенного урана и 5 сантиметрам для плутония, и что соответствующие массы расщепляющихся материалов равны 12 и 4 кг<sup>17</sup>. Расщепляющийся материал окружен отражателем нейтронов, в качестве которого мы рассматриваем оболочку из бериллия толщиной в два сантиметра (между этими оболочками должен быть размещен тонкий защитный слой другого вещества, предотвращающий попадание альфа-частиц из расщепляющегося материала в бериллий, сопровождающееся генерацией нейтронов). Следующая оболочка - это "поршень" из плотного вещества с предполагаемой толщиной в 3 сантиметра. Мы будем рассматривать два различных материала "поршня": обедненный уран, в котором образуется собственное характеристическое гамма-излучение (его применение позволяет в принципе увеличить мощность ядерного заряда из-за дополнительных делений под

Таблица А-1.

Модели ядерного оружия, используемые в нашем анализе.

Материал	Внешний радиус (см)	Масса (кг)	Материал	Внешний радиус (см)	Масса (кг)
"Уран + уран"			"Плутоний + уран"		
Вакуум	5.77	0	Вакуум	4.25	0
Уран	7	12	Плутоний	5	4
Бериллий	9	3	Бериллий	7	2
Уран	12	79	Уран	10	52
ВВ	22	71	ВВ	20	56
Алюминий	23	17	Алюминий	21	14
Всего:		182	Всего:		128
"Уран + вольфрам"			"Плутоний + вольфрам"		
Вакуум	5.77	0	Вакуум	4.25	0
Уран	7	12	Плутоний	5	4
Бериллий	9	3	Бериллий	7	2
Вольфрам	12	81	Вольфрам	10	53
ВВ	22	71	ВВ	20	56
Алюминий	23	17	Алюминий	21	14
Всего:		184			129

действием быстрых нейтронов), и вольфрам, который обеспечивает эффективную защиту от излучения внутренних компонент. Оболочка "поршня" окружена слоем взрывчатого вещества толщиной в десять сантиметров. Мы предполагаем, что взрывчатое вещество состоит из водорода, углерода, азота и кислорода в соотношении 2:1:2:2, и что его плотность равна  $1,9 \text{ г/см}^2$ <sup>18</sup>. Внешняя оболочка имитирует конструкцию и упаковочные материалы слоем алюминия толщиной в один сантиметр.

Характеристики четырех предложенных моделей приведены в табл. А-1. Модели с высокообогащенным ураном характеризуются радиусом в 23 см и массой около 180 кг, модели с плутонием - радиусом в 21 см и массой около 130 кг. Это согласуется с известными данными о современных американ-

ских ядерных боеголовках, радиусы которых составляют от 14 до 24 сантиметров, а массы - от 100 до 200 кг<sup>19</sup>. Существуют боеголовки, значительно меньшие наших моделей по размерам (так, например, снаряд с ядерным боеприпасом для орудия калибром 155 мм имеет радиус меньше 8 см и массу 44 кг). Излучение от таких боеголовок обнаружить проще, поскольку собственное поглощение излучения в этих боеприпасах будет слабее. Есть и более тяжелые боеголовки, однако, радиусы этих сигарообразных устройств примерно совпадают с радиусами наших моделей и степень защиты от излучения в направлениях, перпендикулярных оси устройства, примерно совпадает со степенью защиты в моделях<sup>20</sup>.

При сравнении наших моделей с реальными термоядерными устройствами следует

учитывать, что вторичная компонента, которая физически разделена от первичной, составляет значительную часть массы всего устройства. Поэтому ослабление излучения первичной компоненты в направлении вторичной может быть больше. Имеются предположения о том, что в центре вторичной компоненты может находиться заметное количество расщепляющегося материала, или о том, что корпус вторичной компоненты изготовлен из обедненного или из высокообогащенного урана<sup>21</sup>. В этом случае термоядерное взрывное устройство можно будет обнаружить более просто, чем это следует из наших модельных оценок.

#### ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. Frank von Hippel, David H. Albright, B.G.Levi, Quantities of Fissile Materials in U.S. and Soviet Nuclear Weapons Arsenals, PU/CEES 168 (Princeton, NJ: Princeton University, July 1986). Thomas B. Cochran, William B. Arkin, Robert S. Norris, and Milton M. Hoenig, Nuclear Weapons Databook, vol II: U.S. Nuclear Warhead Production (Cambridge, Mass.: Ballinger, 1987) p. 191.
2. Критическая масса изолированной сферы из урана-235 примерно равна 50 килограммам. Если бы химический взрыв способен был увеличить плотность урана вдвое, то критическая масса будет составлять около 12 килограмм. Окружение урана рефлектором, отражающим около половины вылетающих нейтронов обратно в расщепляющийся материал должно сделать такую сжатую массу сильно надкритической.
3. Высокообогащенный уран, по общим представлениям, состоит из 93% урана-235, но наличием урана-234 часто пренебрегают. Концентрация урана-234 в природном уране  $\approx 0,0054\%$ . Предполагая, что отходы процесса разделения содержат 0,2% урана-235 и что почти весь уран-234 идет на обогащение продукта, тогда высокообогащенный уран должен содержать около 1% урана-234.
4. Период полураспада урана-232 равен 70 годам. Через один год 1 грамм урана-232 (и его радиоактивных "дочерних" продуктов) испускает  $2 \cdot 10^{11}$  фотонов/сек, и только около 4 фотонов/сек с энергиями выше, чем 1 МэВ. Поэтому, при концентрации урана-232 равной всего лишь 0,005 ppb, фотоны высоких энергий должны испускаться почти с той же скоростью, что от всех других изотопов в высокообогащенном уране.
5. По-видимому, Министерство энергетики США признает, что исходный продукт для обогащения может быть загрязнен переработанным ураном из реакторного топлива. Действующие требования к коммерческому "естественному" шестифтористому урану допускают концентрацию урана-232 не выше, чем  $2 \cdot 10^{-11}$  (James C. Hall, "Revision to the Uranium Hexafluoride Feed Specification", AE-97-126, U.S. Department of energy, 6 April 1987). Произведенный из такого исходного продукта высокообогащенный уран будет содержать уран-232 в количестве 4 частей на миллиард (4 ppb).
6. Согласно работе Cochran et al., U.S. Nuclear Warhead Production, p. 184, средний возраст высокообогащенного урана в американском арсенале равен 29 годам.
7. Von Hippel, et al., Quantities of Fissile Material, and Cochran et al., U.S. Nuclear Warhead Production, p. 75.
8. Критическая масса плутония-239 приблизительно в три раза меньше, чем критическая масса урана-235 при сходных условиях. В устройстве "Толстяк" (бомбе, сброшенной на Нагасаки) использовалось 6,1 кг плутония. В современном оружии, несомненно, плутоний используется более эффективно.
9. Согласно Cochran, et al., U.S. Nuclear Warhead Production, pp. 63-65, средний возраст американского плутония оружейного качества равен 24 годам.
10. Изотопные концентрации в весовых процентах взяты из данных (M.J.Halsall, "Graphs and tables of the isotopic composition of plutonium produced in Candian D<sup>2</sup>O-Moderate Reactors," AECL-2631, January 1967, L.J.clegy and I.R.coady," Radioactive Decay Properties of CANDU Fuel," AECL-4436/1 (January 1977), and in M.S.Milgram and K.N. Sly, "Tables of the Isotopic composition of Transuranium Elements Produced in Candian D<sup>2</sup>O-Moderated Reactors," AECL-5904 (August 1977)). Для реактора CANDU типа Пикеринга при выдержке примерно в 1200 МВТ-дней/тонну. Изотопные концентрации для американского промышленного реактора должны быть близки к этим значениям при концентрации плутония-239 в 93,5%.
11. Период полураспада плутония-236 - 2,8 года. После года распада 1 грамм плутония-236 (и его радиоактивных "доче-

- рних" продуктов) испускает  $\approx 2 \cdot 10^{10}$  фотон/сек с энергией более 1 МэВ. Для сравнения, 1 грамм плутония оружейного качества без плутония-236 испускает только 150 фотонов/сек с энергией больше чем 1 МэВ. После 5 лет распада, скорость образования фотонов в плутонии-236 должна стать в 12 раз выше.
12. После экспозиции в 7,5 Гвт-дней/тонну содержание плутония-236 в плутонии из реактора CANDU с топливом из природного урана было равно 0,77 ppb (Scott Ludwig Oak Ridge National Laboratory, частное сообщение, 6 июня 1988). В плутонии из промышленного реактора плутония-236 должно быть еще меньше, поскольку его экспозиция в 6 раз меньше.
  13. Ralph Condit and Mel Coops, Lawrence Livermore National Laboratory, частное сообщение.
  14. На установке SIS предполагается перерабатывать от шести до семи тонн плутония топливного качества в год в течение шести-восьми лет. Проектная стоимость установки составляет около одного миллиарда долларов. Учитывая процентную ставку на капиталовложения в десять процентов в год, и стоимость эксплуатации установки в 60 миллионов долларов в год, можно рассчитать, что стоимость получения одного килограмма плутония оружейного качества составит примерно 200 тысяч долларов в год (см. Dan W. Reicher and Jason Salzman, "High-tech Protest Against Plutonium Plant", Bulletin of Atomic Scientists, vol.44, No.9 (November 1988), p.27).
  15. Стоимость одной крылатой ракеты морского базирования составляет около пяти миллионов долларов, а стоимость ракеты MX (при развертывании 200 штук) и бомбардировщика B-1B (при загрузке двадцати боеголовок на самолет) будет составлять около 15 миллионов долларов.
  16. Для представляющих интерес концентраций плутония соотношение между эффективностью очистки  $\epsilon$ , определяемой как доля атомов изотопов с малой концентрацией, отделяемая за один проход разделительной ступени, и величиной  $\delta$ , соответствующей относительному уменьшению концентрации этого изотопа, может быть аппроксимировано как  $\delta^1 = (1 - \epsilon)$ . Эффективность очистки, в свою очередь, может быть представлена как произведение трех множителей  $\epsilon = f_a f_b f_c$ , где  $f_a$  - доля атомов в состояниях, которые могут взаимодействовать с лазерным излучением,  $f_b$  - вероятность ионизации атомов и  $f_c$  - собранная доля ионизированных атомов. Как отмечалось в работе Richard W. Solarz, "A Physics Overview of AVLIS", UCID-20343 (Livermore, CA: Lawrence Livermore National Laboratory, February 1985), два последних коэффициента могут быть увеличены при повышении мощности лазера и уменьшении производительности разделительной ступени, что, соответственно, приводит к увеличению  $f_b$  и  $f_c$ . Повышение стоимости в расчете на одну ступень компенсируется в этом случае меньшим числом требуемых ступеней.
  17. Эти значения на 1,4 - 1,7 сантиметра превышают радиусы сплошных сфер. Размеры выбирались таким образом, чтобы на каждое спонтанное деление в расщепляющемся материале приходилось одно вынужденное деление. При этом расчете учитывалось влияние отражателя и "поршня", описанных в тексте ниже. Этот выбор произволен, однако, следует отметить, что при меньших радиусах значительно увеличится вынужденное излучение нейтронов с соответствующим понижением ядерной безопасности, а при больших радиусах размеры устройства будут неоправданно увеличены.
  18. См. работу Clifford Conn, "Synthesis of Energetic Materials", Energy and Technology Review, January-February 1988, p.21. Грубые вычисления показывают, что такого количества взрывчатого вещества вполне достаточно для сжатия расщепляющегося материала до сильно сверхкритического состояния, однако, для сжатия урана требуется больше взрывчатого вещества, чем для сжатия плутония.
  19. В справочнике Thomas B. Cochran, William M. Arkin, Milton M7 Hoenig, Nuclear Weapons Databook, vol.I: U.S. Nuclear Forces and Capabilities (Cambridge, Mass.: Ballinger, 1984) на стр. 76 и стр. 126 приведены размеры боеголовок для ракет "Минитмен" и MX, допускающие максимальный радиус в 24 см, и на стр. 297 - размеры боеголовки для ракеты "Першинг-2", допускающей максимальный радиус в 14 см. В статье Robert S. Norris, "Counterforce at Sea", Arms Control Today, p.9, приведены массы боеголовок для ракет "Трайдент-1" и "Трайдент-2", соответственно равные 100 и 200 кг. В указанном справочнике приведена масса боеголовки крылатой ракеты воздушного базирования, равной 130 кг.

20. В справочнике по ядерному оружию (см. предыдущую сноску) на стр.199 сказано, что массы ядерных бомб В28, В43 и В83 примерно равны 1000 кг. Там же, на стр. 42 и стр. 49, приведены радиусы бомб В28 и В43, равные 25 и 23 см.

21. См., например, Howard Morland, "The H-bomb Secret (To Know How Is to Ask Why)", *The Progressive* (November 1979), Robert Del Tredici, *At Work in the Fields of the Bomb* (New York: Harper and Row, 1987), pp. 130-131.