

## ОБНАРУЖЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ ИСТОЧНИКОВ В ГРУЗОВЫХ КОНТЕЙНЕРАХ

*Дж.И. Катц*

Мы изучали проблему обнаружения присутствия скрытых источников нейтронов, таких, какие могли бы быть связаны с ядерными боеприпасами, содержащими плутоний, в грузовых контейнерах. Маленькие, простые, и экономичные детекторы с полупроводниковыми фотодиодами, прикрепленные с внешней стороны контейнера, способны произвести статистически надежное обнаружение источников без защиты, если их выход будет интегрироваться на протяжении океанского плавания. Такие источники можно защитить толстым слоем поглощающего нейтроны материала, и можно минимизировать влияние таких поглотителей на внешние потоки природных или искусственных нейтронов, окружая их отражающим нейтроны материалом.

Статья получена 7 сентября 2004 г. и принята к публикации 1 декабря 2005 г.

Автор работает на физическом факультете и в центре космических наук МакДоннелл в университете Вашингтона, Сент-Луис, штат Миссури, США.

Посылать корреспонденцию по адресу: J. I. Katz, Department of Physics and McDonnell Center for the Space Sciences, Washington University, 1 Brookings Dr., St. Louis, MO 63130, USA.

Адрес электронной почты: katz@wuphys.wustl.edu

Ядерные боеприпасы террористов или специальные ядерные материалы могут перевозиться в грузовых контейнерах, и их обнаружение является предметом серьезного беспокойства. Если специальным ядерным материалом будет плутоний, то его компонента  $^{240}\text{Pu}$  является значительным источником нейтронов спонтанного деления, в зависимости от количества плутония и его изотопного состава. Эти нейтроны спонтанного деления могут быть обнаружимыми.

В своем более раннем докладе<sup>1</sup> мы предложили применить нейтронные детекторы с фотодиодами, покрытыми  $^{10}\text{B}$ , расположенные на внешней стороне грузовых контейнеров, для обнаружения любых образующихся внутри нейтронов спонтанного деления. Простые аналитические оценки показывают, что при интегрировании по времени 10-дневного путешествия детектор с площадью  $1\text{ см}^2$  обнаружит с высокой статистической значимостью нейтронный источник спонтанного деления в присутствии фона выбиваемых под действием космических лучей нейтронов. Целью этой статьи является представление результатов количественных расчетов этой задачи переноса нейтронов по методу Монте-Карло, и вытекающих из них следствий, включая влияние защиты и содержимого окружающих контейнеров. В этих расчетах использовалась программа MCNPX<sup>2,3,4</sup>, которая является стандартным средством, используемым для расчета переноса нейтронов.

Во всех этих расчетах предполагаемым источником была сфера из 5 кг  $\delta$ -плутония (радиус 4,22 см). была выбрана интенсивность источника в  $4,5 \cdot 10^5$  н/с (это соответствует 10 процентам  $^{240}\text{Pu}$ , или компромиссу между составами «оружейного качества» и «реакторного качества»). Результаты были нормализованы к интенсивности источника нейтронов спонтанного деления. Плутоний был окружен сферической оболочкой толщиной 50 см номинального «взрывчатого вещества» (ТНТ, состав  $\text{C}_7\text{N}_3\text{O}_6\text{H}_5$  и плотность  $1,52\text{ г/см}^3$ ). Эта конфигурация не означает аналогии с реальной бомбой; скорее, она была сознательно выбрана как любительская интерпретация конструкции «Толстяка» (предмета испытания «Тринити»; такая же бомба была сброшена на Нагасаки).

Толстый слой «взрывчатого вещества» является сравнительно эффективным замедлителем и отражателем, и существенным поглотителем. Сборка близка к критичности по тепловым нейтронам (фактор мультипликации равен 6,0), и для каждого нейтрона из источника будет наблюдаться 20 пересечений нейтронами границы между плутонием и «взрывчатым веществом», хотя внешнюю границу «взрывчатого вещества» пересечет всего 0,24 нейтрона.

<sup>1</sup> R. D. Grober and J. I. Katz, MITRE/JASON JSR-02-340 Radiological Weapons Appendix VI (2002).

<sup>2</sup> H. G. Hughes, et al., LA-CP-02-408, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N. Mex. (2002a).

<sup>3</sup> H. G. Hughes, et al., LA-UR-02-2607, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N. Mex. (2002b).

<sup>4</sup> J. S. Hendricks, et al., LA-UR-04-0570, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, N. Mex. (2004).

Источник находился в центре 40-футового (12 м) транспортного контейнера. Детектор был приставлен к поверхности контейнера (стенки контейнера игнорировались) в точке на половине пути от низа до верха, но смещенного на 3,29 м от центра стороны контейнера вдоль его длины, так что центр детектора находился на расстоянии 3,5 м от центра источника. Это расположение было выбрано потому, что три детектора могут быть прикреплены к контейнеру таким образом, что ни одна точка внутри его объема не будет находиться на расстоянии, большем 3,5 м от любого детектора.

Сам детектор состоял из слоя бора толщиной 2 мкм, обогащенного до 80% изотопом  $^{10}\text{B}$ . Во всех случаях предполагалось, что площадь детектора равна  $1\text{ см}^2$ . Фотодиод из кремния или арсенида галлия, с возможной толщиной 10 мкм, не рассчитывался точно, но предполагалась консервативная оценка эффективности регистрации реакции ( $n, \alpha$ ) в боре, как это обсуждалось Гробером и Катцем<sup>5</sup>. Этот слой был помещен между двумя слоями парафина или полиэтилена толщиной 1,75 см ( $\text{C}_2\text{H}_2$ , с плотностью  $0,92\text{ г/см}^3$ ), задачей которого была термализация нейтронов, излученных «голым» источником. Когда нейтроны источника замедляются в  $\text{C}_2\text{H}_2$ , он действует как отражатель нейтронов (каждый слой имеет оптическую толщину 2,8 для рассеяния тепловых нейтронов при нормальном падении). Толщина этих слоев ограничена высотой гофра стенок транспортных контейнеров, равной 3,75 см. Если не включать слои  $\text{C}_2\text{H}_2$ , то детектор будет нечувствительным к источнику *без замедлителя*. Более сложная система будет включать детекторы со слоями  $\text{C}_2\text{H}_2$ , и без них.

Этот базовый расчет приводит к скорости реакции в  $1,5 \cdot 10^{-5}\text{ см}^{-3}$  (в пленке из бора) на нейтрон из источника. При экспозиции в  $10^6\text{ с}$  (типичной для трансокеанской перевозки) для источника в  $4,5 \cdot 10^5$  нейтрона/с детектор площадью  $1\text{ см}^2$  регистрирует 340 событий, учитывая предполагаемую эффективность. Это может быть сравнено с грубой оценкой в 600 зарегистрированных событий. Результаты не могут быть тесно сравнены из-за того, что в оценках предполагался источник без замедлителя для базовой проблемы.

Было выполнено несколько вариаций базового расчета (табл. 1). Например, окружение контейнера, содержащего источник нейтронов 26 пассивными контейнерами (решетка из  $3 \times 3 \times 3$  контейнеров, с источников нейтронов в центральном контейнере); каждый из пассивных контейнеров был заполнен номинальным однородным грузом плотности  $0,3\text{ г/см}^3$  (известная средняя плотность загрузки контейнера) с составом FeH (3,7% H по массе; для нейтроники существенен только водород, так что состав остатка массы незначителен), увеличивает число зарегистрированных ( $n, \alpha$ ) реакций до 1600. Это является следствием отражения нейтронов водородом в пассивных контейнерах. Это примерно в десять раз меньше грубой оценки<sup>6</sup>, возможно из-за того, что в последнем случае игнорировался эффект отражения в полосах  $\text{C}_2\text{H}_2$  вокруг детектора.

Предположение об однородности груза (за исключением предполагаемого источника угрозы) имеет неопределенную пригодность и может ввести значительные ошибки. Перенос нейтронов в неоднородной среде, со свободным прохождением между областями со сравнительно высокой плотностью водорода, может очень сильно отличаться от переноса нейтронов в однородной среде. Некоторые грузы (например, контейнеры, заполненные одеждой) являются достаточно однородными, в то время как другие (машины, плотные объекты в водородсодержащей упаковке, бочки с химикатами) могут либо не содержать водорода, или концентрировать его в изолированных областях. К сожалению, вероятно невозможно разрешить эту неопределенность расчетными методами из-за того, что трудно характеризовать распределение водорода в грузе. Возможно, для ее разрешения понадобятся прямые эксперименты, в которых в контейнер с приборами между пассивного груза будут помещены реальные источники нейтронов (D-D ускорители, источники ( $\alpha, n$ ), или  $^{252}\text{Cf}$ , но не плутоний!).

Эти скорости счета следует сравнить с теми, которые обусловлены нейтронами, образующимися при взаимодействии космических лучей. Основным источником таких нейтронов являются реакции в грузе (как в источнике угрозы, так и в окружающем пассивном грузе), а не в воздухе, поскольку плотность груза ( $0,3\text{ г/см}^3$ , из которых очень малая часть приходится на водород) в сотни раз больше плотности воздуха. Образование нейтронов в окружающем грузе и на самом корабле известно как «влияние корабля». Солнечных нейтронов пренебрежимо меньше, чем тех, которые образуются в ядерных реакциях.

Здесь снова предполагался состав FeH; скорость образования нейтронов практически не зависит от состава не водородной части материала. Поэтому расчеты по программе MCNPX проводились в тех контейнерах, которые содержат пассивный груз и облучаются космическими лучами, и в них были рассчитаны образование нейтронов, их перенос, и реакции. Спектр космических лучей на уровне моря в области энергий от 100 МэВ до 100 ГэВ

---

<sup>5</sup> Ссылка [1].

<sup>6</sup> Ссылка [1].

брался из работы Пала и др.<sup>7</sup>, и было принято, что вертикально падающие космические лучи однородно распределены по верхней поверхности контейнера с потоком  $2,7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  (приближение, в котором пренебрегается приходящими сбоку космическими лучами, является обоснованным). Предполагалось, что все космические лучи являются протонами, поскольку более распространенные мюоны редко образуют нейтроны.

Результатом облучения одиночного контейнера, заполненного той же самой (FeH плотности  $0,3 \text{ г/см}^3$ ) моделью пассивного груза за интервал времени  $10^6 \text{ с}$  будет 0,6 зарегистрированных реакций. В решетке из 27 одинаковых контейнеров этот результат увеличится до 1,7 зарегистрированных реакций, в результате отражения нейтронов от окружающих контейнеров. Эти результаты очень малы по сравнению с предсказанными сигналами от предполагаемой угрозы, обсуждавшимися ранее, и они указывают на то, что природный нейтронный фон не является значительным препятствием для обнаружения нейтронов спонтанного деления от предполагаемой угрозы. Эти величины примерно на два порядка величины ниже, чем грубые оценки Гробера и Катца<sup>8</sup>, частично потому, что оценки не позволяли отражения тепловых нейтронов окружающими детектор полосами  $\text{CH}_2$ , и частично из-за других предположений о потоке космических лучей (эквивалентно, геомагнитной широте).

К сожалению, любой, способный построить даже импровизированное ядерное устройство на основе плутония, вероятно, будет осведомлен о желательности защиты от нейтронов спонтанного деления, и способен сделать это. Эффективной защитой будет слой борированного полиэтилена или парафина толщиной в 50 см. Была проведена последовательность расчетов с такой защитой в форме сферической оболочки с внутренним радиусом 54,22 см и внешним радиусом 104,22 см, содержащим 5 весовых процента бора. Результатом стало сокращение регистрируемых отсчетов для базового варианта до 0,08 при эффективном факторе защиты около 4 000. Этот результат является очевидно нерегистрируемым. Если источник будет окружен 26 контейнерами с пассивным грузом, то эффективный фактор защиты будет равен 2 000, и источник все еще будет не обнаружимым.

Поглотители тепловых нейтронов создают «дырку» в окружающем распределении тепловых нейтронов. Будет ли возможно обнаружить присутствие такого поглотителя (сравнительно необычного в пассивном грузе), измеряя интенсивность тепловых нейтронов, образуемых космическими лучами? Для проверки этого были проведены два расчета. В первом расчете поглотитель (с пустотой внутри) будет помещен в контейнер, а снаружи контейнер будет заполнен обычно предполагаемым пассивным грузом FeH. Во втором расчете этот контейнер будет окружен 26 контейнерами, каждый из которых наполнен пассивным грузом.

**Табл. 1:** Задачи.

№	Особенности	Отсчеты за $10^6 \text{ с}$
1	Базовая (4,22 см Pu, 50 см ВВ)	340,00
2	Базовая + 26 пассивных контейнеров	1600,00
3	Пассивный контейнер с косм. лучами	0,60
4	27 пассивных контейнеров с косм. лучами	1,70
5	Базовая + защита (50 см $\text{CH}_2$ + В)	0,08
6	Базовая + защита + 26 пасс. контейнеров	0,70
7	№ 3 + защита	0,60
8	№ 4 + защита	1,80

Результаты согласуются, с точностью до нескольких процентов, с результатами для контейнеров, содержащих пассивные грузы без поглотителей нейтронов. Причиной для этого является то, что после термализации нейтронов (детектор не чувствителен к не термализованным нейтронам), из длина свободного пробега по рассеянию в грузе будет равна примерно 7,5 см. Детектор, расположенный примерно на 2,5 метра от поглотителя (33 длины свободного пробега), чувствует нейтронное поле, практически не возмущенное поглотителем. Конечно, кто-то, сознательно скрывающий наличие поглотителя, окружит его веществом с еще большим содержанием водорода (например,  $\text{CH}_2$ , в котором средняя длина пробега около 0,6 см). Поэтому обнаружение тепловых нейтронов вряд ли будет подходящим методом обнаружения поглотителей тепловых нейтронов, даже если будут приняты только самые минимальные меры для его сокрытия внутри рассеивающей нейтроны среды.

Аналогичные выводы применимы к исследованию контейнеров быстрыми нейтронами.

<sup>7</sup> Y. Pal, *Handbook of Physics*, 2nd ed., E. U. Condon and H. Odishaw, eds. (McGraw-Hill, 1967), Fig. 11.22.

<sup>8</sup> Ссылка [1].

Хотя они (аналогично рассчитываемым здесь нейтронам спонтанного деления) являются гораздо более проникающими по сравнению с тепловыми нейтронами, все еще возможно замедлить и поглотить их в пределах контейнера. Даже если деление было инициировано в расщепляющемся материале (проникающим пучком или природным мюонным фоном), этот материал может быть окружен достаточным количеством замедлителя и поглотителя для того, чтобы предотвратить регистрацию нейтронов деления, и достаточным количеством рассеивателя, чтобы предотвратить обнаружение поглотителя нейтронов.

Можно сделать вывод, что борные детекторы нейтронов могут быть эффективным средством обнаружения нейтронных источников без защиты, таких, как килограммовые количества плутония внутри грузовых контейнеров (уран любого изотопного состава является пренебрежимо слабым источником нейтронов). Знающий противник может защитить такие источники, а наличие такой защиты может быть скрыто от обнаружения их влияния на фоновую интенсивность тепловых нейтронов, если они будут окружены отражающим нейтроны материалом.