

ПАССИВНЫЙ МЕТОД ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И ПЛУТОНИЯ ОРУЖЕЙНОГО КАЧЕСТВА В ЯДЕРНЫХ ВЗРЫВНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Хуан Мэн, Чжу Джаньюй, Ву Джун и Ли Руи

АННОТАЦИЯ

Перед тем, как демонтировать ядерную боеголовку, надо будет отождествить и аутентифицировать специальные ядерные материалы и взрывчатые вещества. В этой статье предлагается пассивный метод детектирования и идентификации деталей из плутония оружейного качества и взрывчатых веществ в ядерных боеголовках, основанный на методе нейтронного анализа. Сначала в статье рассматриваются принципы метода пассивного детектирования, и то, как этот метод может быть применен для обнаружения взрывчатых веществ в боеголовке. Далее рассматривается моделирование плутония оружейного качества с использованием программы JMST. В моделировании предполагается, что элементы, составляющие взрывчатые вещества, активируются при переносе нейтронов из центральной металлической части из плутония оружейного качества, и что производится регистрация гамма-излучения от нуклидов водорода, углерода и азота решеткой детекторов из германия высокой чистоты (HPGe). После одного часа регистрации была проведена реконструкция отношений количества ядер элементов и определено точное соответствие этих отношений составу взрывчатых веществ в боеголовке. Эти результаты позволяют предположить, что пассивный метод может быть использован для идентификации присутствия плутония оружейного качества в боеголовке. Кроме того, моделирование показало, что пассивный метод может также определять различные типы взрывчатых веществ в боеголовках, предоставляя важную физическую информацию для процесса верификации во время демонтажа.

Хуан Мэн работает в Институте прикладной физики и вычислительной математики, Пекин, Китай.

Чжу Джаньюй и Ву Джун работают в Центре стратегических исследований, Китайская академия технической физики, Пекин, Китай.

Ли Руи работает в Центре программного обеспечения для высокоэффективного численного моделирования, Китайская академия технической физики, Пекин, Китай.

Почтовый адрес для корреспонденций: Huang Meng, Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China.

Адрес электронной почты: hm.max@126.com

Статья получена 19 октября 2017 года и принята к публикации 26 июня 2018 года.

ВВЕДЕНИЕ

Будущее глобальное ядерное разоружение может потребовать демонтажа ядерных боеголовок. Разоружение и демонтаж ядерной боеголовки потребует разделения специального ядерного материала и взрывчатого вещества¹. Всегда существует риск того, что проверяемая сторона может применять обманные методы для того, чтобы избежать выполнения обязательств по ядерному разоружению и подменить реальные боеголовки фальшивыми. Из-за сложности и трудности формования взрывчатых веществ для подгонки к корпусу боеголовки в этих фальшивых боеголовках может не находиться взрывчатое вещество. Поэтому присутствие специального ядерного материала и взрывчатого вещества должно быть подтверждено инспекторами для того, чтобы убедиться в том, что в ядерной боеголовке перед демонтажем находятся оба этих компонента.

Существует два метода обнаружения взрывчатых веществ в боеголовке при помощи нейтронного анализа: «активный метод» и «пассивный метод». В обоих методах элементы во взрывчатом веществе облучаются нейтронами и подсчитываются образующиеся гамма-лучи от этих элементов². Источники нейтронов в этих двух методах различны. В активном методе для облучения взрывчатого вещества в боеголовке используется внешний источник нейтронов. Пассивный метод применяет нейтроны, образующиеся в центральной металлической части из плутония оружейного качества (WGPu). Вероятно, что пассивный метод легче применять в полевых

условиях, потому что в нем используется простое измерительное оборудование и он не требует внешнего источника нейтронов, что увеличивает его приспособляемость.

Пассивный метод можно разделить на три этапа. Во-первых, происходят (n, γ) реакции между образующимися в боеголовке нейтронами и ядрами элементов во взрывчатом веществе, приводящие к появлению характеристических γ -лучей. Во-вторых, с помощью характеристических γ -лучей можно обнаружить и распознать элементы во взрывчатом веществе. И, наконец, анализируя потоки γ -лучей, можно рассчитать элементный состав взрывчатого вещества и определить его тип.

В этой статье представлены принципы пассивного метода, оценка его реализуемости и результаты варианта моделирования.

ПРИНЦИПЫ ПАССИВНОГО МЕТОДА

Расщепляющиеся материалы (такие, как плутоний оружейного качества и обедненный уран) в боеголовке с плутонием спонтанно делятся и образуют нейтроны деления, что приводит к нейтронному облучению боеголовки. Когда нейтроны проходят через взрывчатое вещество, они вступают в реакции (n, γ) с ядрами его элементов с образованием их характеристических гамма-лучей. Регистрация этих гамма-лучей позволит обнаружить и идентифицировать элементы, входящие в состав взрывчатого вещества.

Анализируя интенсивности характеристических гамма-лучей водорода, углерода, азота и кислорода, можно будет рассчитать отношения содержания элементов (точнее говоря, отношения количества ядер двух различных элементов), таких, как отношение водорода к азоту ($[H]/[N]$), углерода к азоту ($[C]/[N]$), и кислорода к азоту ($[O]/[N]$). Следует отметить, что поскольку распространенности изотопов водорода-1, углерода-12, азота-14 и кислорода-16 во взрывчатом веществе постоянны (и соответственно равны 99.99%, 98.93%, 99.63%, и 99.76%), отношения количеств ядер водорода, углерода, азота и кислорода можно будет рассчитать, как отношения количеств ядер изотопов водорода-1, углерода-12, азота-14 и кислорода-16. В моделировании предполагается, что на изотопы водорода-1, углерода-12, азота-14 и кислорода-16 приходится 100% ядер каждого элемента. Поскольку поперечное сечение реакции (n, γ) для кислорода-16 очень мало и намного меньше, чем сечения для изотопов водорода-1, углерода-12 и азота-14, обнаружение кислорода-16 здесь не рассматривается. В таблице 1 показаны энергии и коэффициенты ветвления для характеристических гамма-лучей водорода-1, углерода-12 и азота-14, для расчета $[H]/[N]$ и $[C]/[N]$ ³. Далее будет представлен метод расчета $[H]/[N]$ и $[C]/[N]$.

Таблица 1. Характеристические гамма-лучи в реакциях (n, γ) для водорода-1, углерода-12 и азота-14.

Изотоп	Энергия гамма-лучей (МэВ)	Коэффициент ветвления (%)
Водород-1	2,22	100
Углерод-12	4,95	68
Азот-14	1,88	18,78
Азот-14	3,68	14,53
Азот-14	4,51	16,72
Азот-14	5,27	29,88
Азот-14	6,32	18,24
Азот-14	10,83	14,33

Количество характеристических гамма-лучей с энергией E_γ , образованных в реакциях (n, γ) между нуклидом А из взрывчатого вещества в боеголовке и нейтроном за единицу времени ($S_A(E_\gamma)$) связано с поперечным сечением реакции (n, γ) , коэффициентом ветвления характеристических гамма-лучей с энергией E_γ , плотностью потока нейтронов и концентрацией нуклидов А. Оно может быть выражено в виде

$$S_A(E_\gamma) = \int_V n_A(\vec{r}) \cdot f_A(E_\gamma) \cdot dV \quad (1)$$

$$n_A(\vec{r}) = \int N_A \cdot \sigma_A(E_n) \cdot \phi(\vec{r}, E_n) \cdot dE_n$$

где $n_A(r)$ – пространственная плотность реакций (n, γ) между изотопом А и нейтронами за единицу времени в точке r , $f_A(E_\gamma)$ – коэффициент ветвления характеристических гамма-лучей с энергией E_γ , N_A – концентрация

ядер изотопа А, E_n – энергия нейтрона, $\sigma_A(E_n)$ – поперечное сечение реакции (n, γ) между нейтроном с энергией E_n и изотопом А, $\phi(r, E_n)$ – плотность потока нейтронов в точке r .

После образования характеристического гамма-кванта на изотопе А, этот квант с некоторой вероятностью может вылететь из боеголовки. Количество характеристических гамма-квантов с энергией E_γ , вышедших из боеголовки за единицу времени ($K_A(E_\gamma)$), может быть выражено как:

$$K_A(E_\gamma) = \int_V n_A(\vec{r}) \cdot f_A(E_\gamma) \cdot P(\vec{r}, E_\gamma) \cdot dV \quad (2)$$

где $P(r, E_\gamma)$ – средняя вероятность того, что характеристические гамма-лучи с энергией E_γ , рожденные в точке r , выйдут из боеголовки.

При моделировании было обнаружено, что, поскольку поперечные сечения реакции (n, γ) между нейтронами малых энергий (менее 1 эВ) и ядрами водорода-1, углерода-12 и азота-14 намного больше, чем сечения для нейтронов промежуточных энергий и быстрыми нейтронами, и на нейтроны малых энергий приходится более 20% нейтронов, падающих на взрывчатое вещество боеголовки, при расчете принимались во внимание только (n, γ) реакции между нейтронами малых энергий и ядрами взрывчатого вещества. Например, для водорода-1 поперечное сечение реакции (n, γ) для тепловых нейтронов с энергией 0,025 эВ на два порядка величины больше, чем для нейтрона с энергией 1 кэВ, и на четыре порядка величины больше, чем для нейтрона с энергией 1 МэВ. Согласно базе данных ENDF/B-VI⁴, поперечное сечение реакции (n, γ) на ядрах водорода-1, углерода-12 и азота-14 в диапазоне энергий от 0 до 1 эВ примерно пропорционально $1/v$ (v – скорость нейтрона), а отношения сечений водорода к азоту $\sigma_{H-1}(E_n)/\sigma_{N-14}(E_n)$ и углерода к азоту $\sigma_{C-12}(E_n)/\sigma_{N-14}(E_n)$ ниже 1 эВ почти постоянны и соответственно равны 4,43 и 0,0453 (эти значения обозначаются как $[\sigma_{H-1}(E_n)/\sigma_{N-14}(E_n)]_T$ и $[\sigma_{C-12}(E_n)/\sigma_{N-14}(E_n)]_T$); относительное стандартное отклонение каждого члена значительно ниже 1% (смотрите рисунок 1). На основании этого анализа формулу $n_A(r)$ для водорода-1 и углерода-12 можно будет упростить. Например, для водорода-1 формулу для $n_{H-1}(r)$ можно переписать в виде:

$$n_{H-1}(\vec{r}) = \frac{N_{H-1}}{N_{N-14}} \cdot \left[\frac{\sigma_{H-1}(E_n)}{\sigma_{N-14}(E_n)} \right]_T \cdot n_{N-14}(\vec{r}) \quad (3)$$

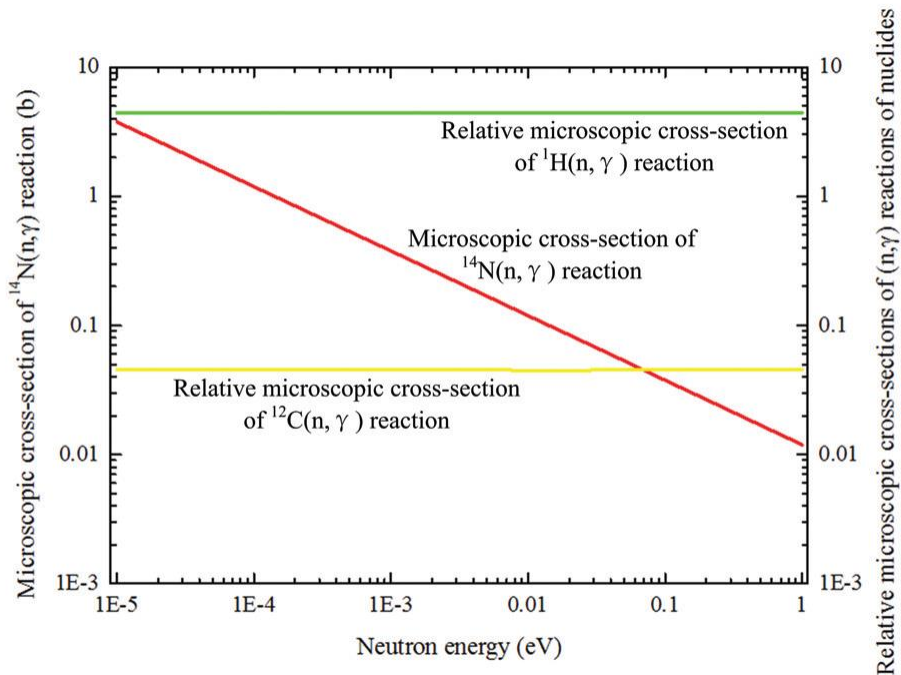


Рисунок 1. Поперечные сечения реакций (n, γ) для водорода-1, углерода-12 и азота-14. По горизонтальной оси отложена энергия нейтрона в эВ. На левой вертикальной оси отложено поперечное сечение реакции $^{14}\text{N}(n, \gamma)$ в барнах. На правой вертикальной оси отложены значения отношений поперечных сечений реакций (n, γ) . Красная линия – это поперечное сечение реакции $^{14}\text{N}(n, \gamma)$. Желтая линия – это относительное поперечное сечение реакции $^{12}\text{C}(n, \gamma)$. Зеленая линия – это относительное поперечное сечение реакции $^1\text{H}(n, \gamma)$.

Кроме того, формула для отношения интенсивностей характеристических гамма-линий водорода-1 и азота-14 ($K_{H-1}(E_{\gamma 1})/K_{N-14}(E_{\gamma 2})$) может быть переписана в виде:

$$\frac{K_{H-1}(E_{\gamma 1})}{K_{N-14}(E_{\gamma 2})} = \frac{N_{H-1}}{N_{N-14}} \cdot \left[\frac{\sigma_{H-1}(E_n)}{\sigma_{N-14}(E_n)} \right]_T \cdot \frac{f_{H-1}(E_{\gamma 1})}{f_{N-14}(E_{\gamma 2})} \cdot \frac{\int_V n_{N-14}(\vec{r}) \cdot P(\vec{r}, E_{\gamma 1}) \cdot dV}{\int_V n_{N-14}(\vec{r}) \cdot P(\vec{r}, E_{\gamma 2}) \cdot dV} \quad (4)$$

где $E_{\gamma 1}$ и $E_{\gamma 2}$ – энергии характеристических гамма-линий водорода-1 и азота-14 соответственно. Затем может быть рассчитано отношение концентраций водорода и азота ($[H]/[N]$) во взрывчатом веществе:

$$[H]/[N] = \frac{N_{H-1}}{N_{N-14}} \cdot \frac{A_{N-14}}{A_{H-1}} = \frac{\frac{K_{H-1}(E_{\gamma 1})}{K_{N-14}(E_{\gamma 2})} \cdot \frac{A_{N-14}}{A_{H-1}}}{\left[\frac{\sigma_{H-1}(E_n)}{\sigma_{N-14}(E_n)} \right]_T \cdot \frac{f_{H-1}(E_{\gamma 1})}{f_{N-14}(E_{\gamma 2})} \cdot \frac{\int_V n_{N-14}(\vec{r}) \cdot P(\vec{r}, E_{\gamma 1}) \cdot dV}{\int_V n_{N-14}(\vec{r}) \cdot P(\vec{r}, E_{\gamma 2}) \cdot dV}} \quad (5)$$

где A_{H-1} и A_{N-14} соответственно равны распространенностям водорода-1 и азота-14. Также аналогично могут быть рассчитаны отношения $[C]/[N]$ и $[O]/[N]$.

В уравнении (5) $\int_V n_{N-14}(\vec{r}) \cdot P(\vec{r}, E_{\gamma}) \cdot dV$ – это эффективность выхода гамма-кванта из боеголовки. Если радиальные профили гамма-излучения различных ядер одинаковы, что обосновано идентичной энергетической зависимостью поперечных сечений (n, γ) для различных ядер, то эффективность выхода будет зависеть только от энергии гамма-кванта. Обозначая эффективность выхода как $C(E_{\gamma})$, из уравнения (2) можно будет получить следующее выражение:

$$C(E_{\gamma}) = \int_V n_{N-14}(\vec{r}) \cdot P(\vec{r}, E_{\gamma}) \cdot dV = \frac{K_{N-14}(E_{\gamma})}{f_{N-14}(E_{\gamma})} \quad (6)$$

Следовательно, измерив интенсивности излученных из боеголовки различных характеристических гамма-лучей азота-14 и рассчитав отношения между интенсивностями и коэффициентами ветвления, можно будет прокалибровать эффективности выхода. После этого могут быть рассчитаны эффективности выхода характеристических гамма-лучей других нуклидов с помощью интерполяции по энергии в уравнении (7):

$$C(E_{\gamma 0}) = C(E_{\gamma 1}) + [C(E_{\gamma 1}) - C(E_{\gamma 2})] \cdot \frac{E_{\gamma 0} - E_{\gamma 1}}{E_{\gamma 1} - E_{\gamma 2}} \quad (7)$$

где $E_{\gamma 0}$ – энергия требуемого характеристического гамма-кванта, а $E_{\gamma 1}$ и $E_{\gamma 2}$ – энергии характеристических гамма-квантов азота-14, ближайших к $E_{\gamma 0}$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАССИВНОГО МЕТОДА

Моделирование в программе JMCT

JMCT – это пакет программного обеспечения для моделирования переноса частиц по методу Монте-Карло, разработанный в Пекинском институте прикладной физики и вычислительной математики и Центре программного обеспечения⁵. Пакет JMCT моделирует перенос нейтронов и фотонов вместе с нейтрон-фотонной связью, работает с трехмерными моделями с высокой скоростью за счет использования параллельной обработки данных⁶. Пакет JMCT широко используется для моделирования детектирования радиации, физического проектирования реакторов, и методов верификации контроля над вооружениями.

Модель ядерной боеголовки

Используемая в моделировании модель боеголовки с плутонием оружейного качества была предложена Стивом Феттером в 1990 году⁷. Она считается классической моделью для исследования физических свойств боеголовки. Модель боеголовки с плутонием оружейного качества состоит из пяти концентрических сфер: центральной металлической части с расщепляющимся материалом, рефлектора, оболочки, взрывчатого вещества и внешнего корпуса (смотрите рисунок 2). В моделировании используются два варианта, отличающихся материалом оболочки: в первом варианте оболочка изготовлена из обедненного урана, а во втором – из природного вольфрама (смотрите таблицу 2).

Нейтроны в боеголовки с плутонием оружейного качества возникают в результате двух процессов. Первый процесс – это спонтанное деление расщепляющихся материалов с образованием нейтронов деления, спектр которых приближенно аппроксимируется функцией распределения Уатта:

$$f(E) = C \cdot \exp(-E/a) \cdot \sinh \sqrt{bE}$$

$$C = 2 \cdot \exp(ab/4) / (a\sqrt{ab\pi}) \quad (8)$$

где E – энергия нейтрона, $f(E)$ – функция распределения энергетического спектра нейтронов, a и b – параметры функции распределения Уатта. Второй механизм связан с альфа-частицами, образующимися при альфа-распаде расщепляющихся материалов. Они генерируют нейтроны в результате (α, n) реакций с легкими ядрами (такими, как кислород-18). Выход нейтронов в этих механизмах приведен в таблице 3.

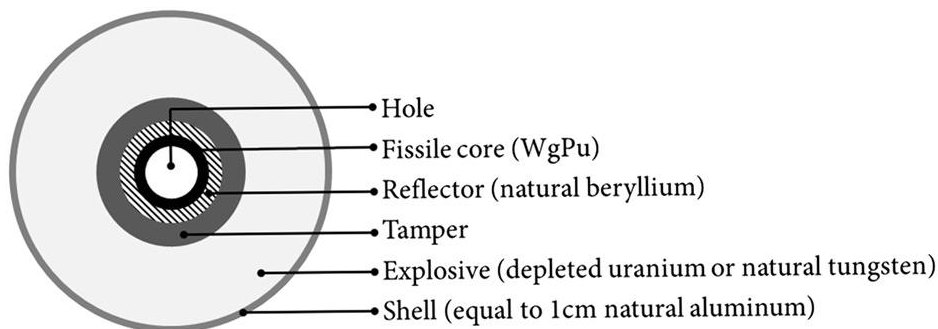


Рисунок 2. Модель боеголовки с плутонием оружейного качества. Надписи на рисунке (сверху вниз): 1 – пустое пространство; 2 – центральная металлическая часть с расщепляющимся материалом (WgPu); 3 – отражатель (природный бериллий); 4 – оболочка (обедненный уран или природный вольфрам); 5 – взрывчатое вещество; 6 – корпус (толщиной 1 см природного алюминия).

Таблица 2. Масса и параметры материалов конструкции в модели боеголовки с плутонием оружейного качества.

Конструкция	Внешний радиус (см)	Масса (кг)	Материал (параметры)
Пустое пространство	4,25	0,0	Вакуум
Расщепляющийся материал	5,0	4,0	Плутоний оружейного качества (²³⁸ Pu (0,005%), ²³⁹ Pu (93,3%), ²⁴⁰ Pu (6%), ²⁴¹ Pu (0,44%), ²⁴² Pu (0,015%), O (0,22%))
Отражатель	7,0	2,0	Природный бериллий
Оболочка	10,0	52,0	Модель 1: обедненный уран Модель 2: природный вольфрам
Взрывчатое вещество	20,0	56,0	Взрывчатое вещество (отношение числа атомов H:C:N:O = 2:1:2:2)
Корпус	21,0	14,0	Природный алюминий

Результаты моделирования

При моделировании в обеих моделях боеголовки рождалось по 10^7 начальных нейтронов (эквивалент длительности измерения 44,60 секунд для модели 1 и 44,80 для модели 2 соответственно). Был промоделирован

перенос этих нейтронов в боеголовке и был рассчитан энергетический спектр гамма-лучей, выходящих из боеголовки. На рисунке 3 показаны результаты расчетов по модели 1. На рисунке 3 отмечены положения пиков характеристических гамма-лучей от реакций (n, γ) с водородом-1, углеродом-12, и азотом-14 (ширина каждого канала в энергетическом спектре равна 1 кэВ).

Таблица 3. Выход нейтронов от расщепляющегося материала в расчете на 1 кг.

Материал	Нуклид	Выход нейтронов (н/сек)		Доля (%)	Полный выход нейтронов (н/сек)
		Реакция (α, n)	Спонтанное деление		
Плутоний оружейного качества	Плутоний-238	$2,2 \cdot 10^5$	$2,5887 \cdot 10^6$	0,005	140,4
	Плутоний-239	630	21,83	93,30	608,2
	Плутоний-240	2300	$9,095 \cdot 10^5$	6,0	54708
	Плутоний-241	22	49,43	0,44	0,314
	Плутоний-242	33	$1,779 \cdot 10^6$	0,015	266,9
Обедненный уран	Кислород	0	0	0,22	0
	Уран-235	0	0,299	0,3	0,001
	Уран-238	0	13,57	99,7	13,52

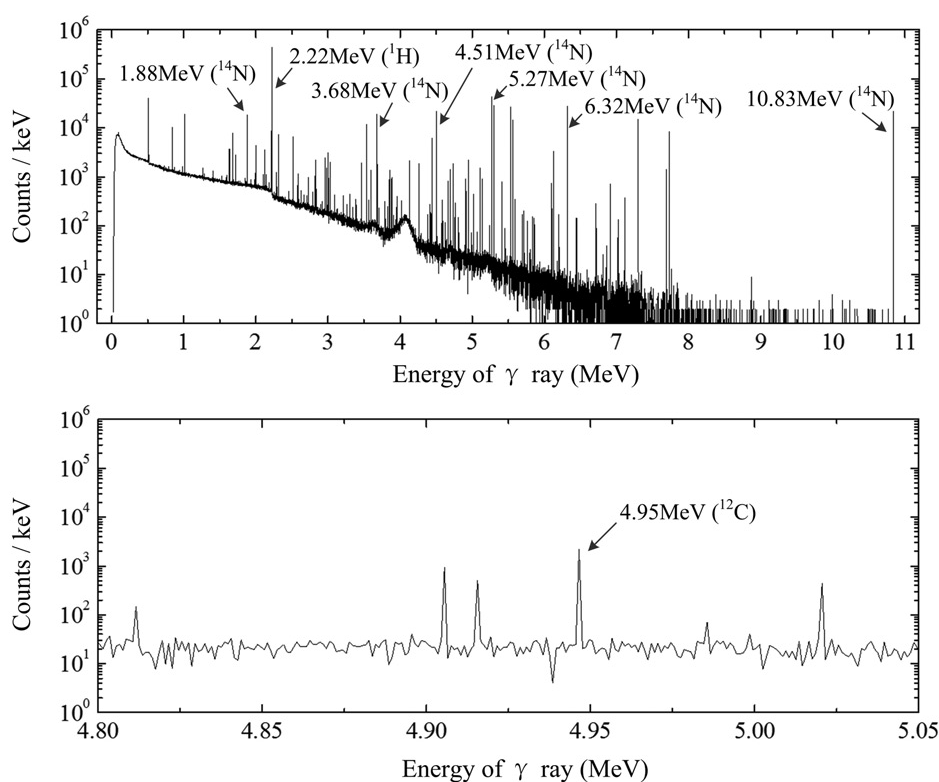


Рисунок 3. Энергетический спектр гамма-квантов, излучаемых боеголовкой с плутонием оружейного качества (модель 1). По вертикальной оси отложено число отчетов на 1 кэВ, по горизонтальной – энергия гамма-кванта в кэВ.

Также было проведено моделирование скоростей счета событий регистрации характеристических гамма-лучей водорода-1, углерода-12 и азота-14, выходящих из боеголовки (смотрите таблицу 4). Принималось, что распределение выходящих из боеголовки характеристических гамма-лучей изотропно, и что использовался детектор из германии высокой чистоты (HPGe) диаметром 65 мм и толщиной 60 мм (с энергетическим разрешением 1,80 кэВ при энергии 1,33 МэВ)⁸, расположенный на расстоянии 1 м от центра боеголовки. Длительность измерений, необходимая для достижения точности измерения числа событий регистрации характеристических гамма-квантов в пике в 5%, приведена в таблице 4⁹. Из таблицы 4 видно, что скорость счета событий регистрации характеристических гамма-лучей минимальна для углерода-12 (минимальная среди всех характеристических гамма-лучей, показанных в таблице 1), а время, необходимое для достижения точности измерения числа событий регистрации в пике в 5%, для этой линии будет самым долгим. Поэтому, если сигналы от характери-

стических гамма-лучей углерода-12 будут адекватными, то и сигналы от других характеристических гамма-лучей, приведенных в таблице 1, также будут адекватными. Решетка из детекторов HPGe, установленных рядом с боеголовкой, позволит улучшить эффективность регистрации измерительного устройства. На основании предварительных оценок, решетка из 29 детекторов HPGe, размещенная на сферической поверхности на расстоянии 1 м от центра боеголовки, позволит удовлетворить требованиям.

Таблица 4. Скорости счета событий и результаты детектирования характеристических гамма-квантов, излучаемых боеголовками с плутонием оружейного качества.

	Энергии характеристических гамма-квантов (МэВ)	2,22 (водород-1)	4,95 (углерод-12)	10,83 (азот-14)
Модель 1	Число гамма-лучей, выходящих из оболочки (событий в секунду)	$9,83 \cdot 10^3$	48,6	491
	Скорость счета событий в пике на одном детекторе HPGe на расстоянии 1 метр (событий в секунду)	2,10	$5,45 \cdot 10^{-3}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$
	Время измерений для достижения точности в 5% (в секундах)	190	$7,33 \cdot 10^4$	$1,82 \cdot 10^4$
Модель 2	Число гамма-лучей, выходящих из оболочки (событий в секунду)	$7,54 \cdot 10^3$	35,2	372
	Скорость счета событий в пике на одном детекторе HPGe на расстоянии 1 метр (событий в секунду)	1,61	$3,94 \cdot 10^{-3}$	$1,67 \cdot 10^{-2}$
	Время измерений для достижения точности в 5% (в секундах)	248	$1,01 \cdot 10^5$	$2,40 \cdot 10^4$

Помехи от фона могут осложнить детектирование. Предположив, что боеголовка расположена в большом здании с бетонным полом, можно посчитать, что источником помех будут характеристические гамма-лучи, образующиеся в бетоне под боеголовкой. Было проведено моделирование для расчета такого влияния пола. В этом моделировании боеголовка с плутонием оружейного качества и детектор HPGe были размещены над полом на расстоянии в 1 м; расстояние между центром боеголовки и детектором также равнялось 1 м; толщина пола равнялась 1 м и в его состав входили водород, кислород, натрий, алюминий, кремний и железо (их концентрации в атомных процентах соответственно составляли 14.30%, 78.60%, 1.90%, 4.50%, 0.30%, и 0.40%). Результаты показали, что интенсивность характеристических гамма-лучей водорода-1, приходящих от пола к детектору, равнялась примерно 0,3 отсчета в секунду, а от боеголовки с плутонием оружейного качества – около 10,3 отсчета в секунду. Следовательно, влияние фона на сигнал в характеристической линии водорода-1 составляет около 3%. Принимая во внимание эту величину в 3%, для достижения ошибки измерений в 5% потребуется измерить 412 событий регистрации характеристических гамма-квантов с энергией 2,22 МэВ от водорода-1 вместо 400 без влияния фона. Свинцовая защита между детектором и полом эффективно подавит фон.

Подсчитав отсчеты в пиках последовательности характеристических гамма-лучей азота-14 (таблица 1), вылетающих из боеголовки, и рассчитав отношения между отсчетами в пиках и коэффициентами ветвления характеристических гамма-лучей, можно будет прокалибровать эффективности поглощения гамма-лучей в боеголовке (нормированные к гамма-лучам с энергией 10,83 МэВ) (смотрите рисунок 4).

Далее, подсчитав отсчеты в пиках характеристических гамма-лучей водорода-1, углерода-12, азота-14 (таблица 1), вылетающих из боеголовки, и комбинируя результаты вычислений, можно будет рассчитать отношения количеств элементов взрывчатого вещества в боеголовке, таких, как [H]/[N] и [C]/[N] (таблица 5). Из таблицы 5 также видно, что ошибки реконструированных значений [H]/[N] и [C]/[N] не превышают 5%.

Таблица 5. Результаты реконструкции отношений количеств элементов взрывчатого вещества в боеголовке.

Отношение количеств элементов	Величина	Реконструированные значения	
		Модель 1	Модель 2
[H]/[N]	1,00	1,01	1,02
[C]/[N]	0,5	0,525	0,495

Поскольку предложенный в этой статье пассивный метод обеспечивает высокую точность реконструкции отношений количества атомов элементов (включая [H]/[N] и [C]/[N]) во взрывчатом веществе боеголовки (смотрите таблицу 5), этот метод позволяет идентифицировать наличие взрывчатого вещества в боеголовке до ее разборки, анализируя соответствие отношений [H]/[N] и [C]/[N] в материалах боеголовки элементному составу взрывчатого вещества. В таблице 6 показаны реконструированные с помощью пассивного метода отношения количеств атомов элементов в трех различных типах взрывчатых веществ в боеголовках (тротил, тэн, и тетрил; для примера в модели 1). Было показано, что тротил, тэн, и тетрил могут быть идентифицированы на основании результатов реконструкции их отношений [H]/[N] и [C]/[N] (смотрите рисунок 5). Следовательно, в верификации

разоружения этот метод позволяет решить, подпадает ли неразобранная боеголовка под условия договора.

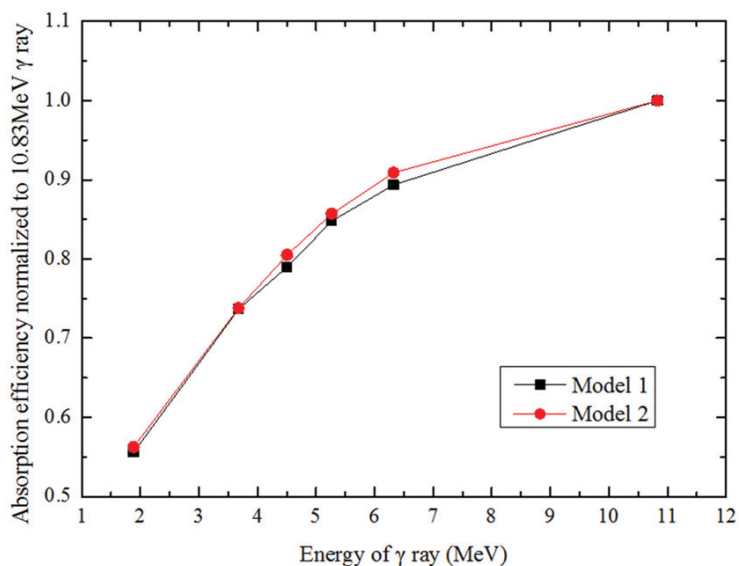


Рисунок 4. Эффективность выхода гамма-лучей из боеголовок с плутонием оружейного качества, нормированная на линию с энергией 10,83 МэВ (по вертикальной оси) в зависимости от энергии (по горизонтальной оси). Черными маркерами отмечены данные по модели 1, красными – по модели 2.

Таблица 6. Результаты реконструкции отношений числа атомов элементов в тротиле, тэне, и тетриле в боеголовках с плутонием оружейного качества согласно модели 1.

Взрывчатое вещество	Молекулярная формула	[H/N]		[C/N]	
		Реальное	Реконструкция	Реальное	Реконструкция
Тротил	$C_7H_5N_3O_6$	1,67	1,68	2,33	2,37
Тэн	$C_5H_8N_4O_{12}$	2,00	2,02	1,25	1,27
Тетрил	$C_7H_5N_5O_8$	1,00	0,988	1,40	1,44

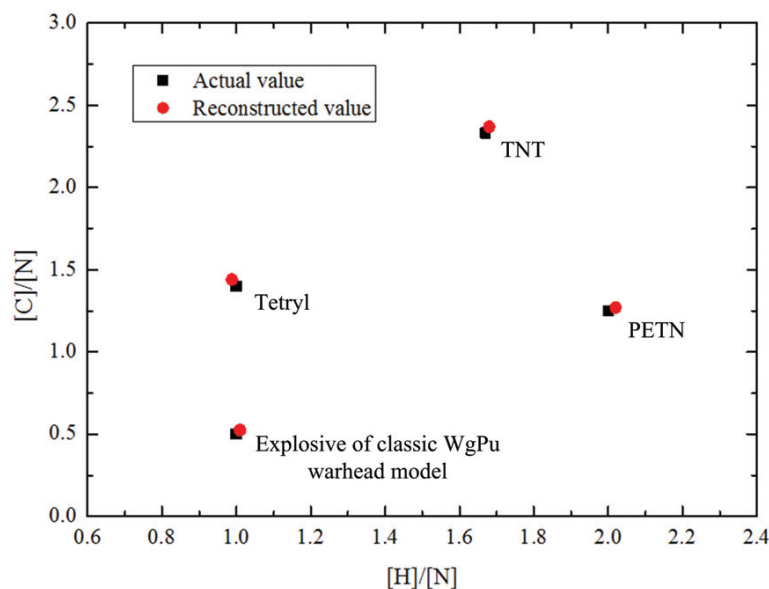


Рисунок 5. Результаты реконструкции отношений чисел атомов элементов нескольких различных взрывчатых веществ в боеголовках с плутонием оружейного качества (с моделью 1 в качестве примера). Черными маркерами отмечены реальные значения, красными – реконструированные.

Для подтверждения того, что результаты моделирования приведенного выше элементного анализа взрывчатого вещества не являются специфичными для конфигурации, было проведено моделирование измененной

модели боеголовки с плутонием оружейного качества. В измененной модели боеголовки не было бериллиевого отражателя, а алюминиевый корпус был заменен на железный. В результате моделирования реконструированные отношения $[H]/[N]$ и $[C]/[N]$ оказались равными 1,010 и 0,543 соответственно. Эти результаты согласуются с реальными значениями, что подтверждает, что приведенные выше результаты моделирования не являются специфическими для конфигурации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предлагается метод пассивного обнаружения взрывчатого вещества в боеголовке, основанного на методике нейтронного анализа. Моделирование с помощью программного пакета JMCT показало, что с помощью решетки германиевых детекторов JMCT могут быть определены отношения концентраций атомов элементов (водорода, углерода и азота) с точностью до 5%. Полученные в результате моделирования реконструируемые отношения числа атомов элементов во взрывчатом веществе боеголовки находятся в соответствии с реальными значениями. С полученными уровнями точности пассивный метод может определить присутствие взрывчатого вещества в боеголовке и отличить настоящую боеголовку с плутонием оружейного качества от имитатора боеголовки без взрывчатого вещества. Кроме того, пассивный метод может различать типы взрывчатого вещества в боеголовках с плутонием оружейного качества. Эта способность может улучшить надежность и эффективность верификации ядерного разоружения для предотвращения обхода процесса верификации проверяемой стороной.

ПРИМЕЧАНИЯ И ССЫЛКИ

1. C. T. Olinger, W. D. Stanbro, R. G. Johnstan et al., "Technical Challenges for Dismantlement Verification," LA-UR-97-2812, Los Alamos National Laboratory (1997); D. W. Macathur, D. K. Hauck, M. Smith, "Confirmation of Nuclear Treaty Limited Items – Pre-Dismantlement vs. Post-Dismantlement," LA-UR-13-23004, Los Alamos National Laboratory (2013); C. T. Olinger, M. Frankle, M. W. Honson et al., "Measurement Approaches to Support Future Warhead Arms Control Transparency," LA-UR-98-3115, Los Alamos National Laboratory (1998); D. K. Hauck, D. W. Macathur, "Benefits of a 'Presence of Fissile Material' Attribute for Warhead Confirmation in Treaty Verification," LA-UR-13-25330, Los Alamos National Laboratory (2013); M. Kutt, S. Philippe, B. Barak et al., "Authenticating Nuclear Warheads with High Confidence," Institute of Nuclear Materials Management, 55th Annual Meeting of the Institute of Nuclear Materials Management, Atlanta, Georgia, USA, 20–24 July 2014, Vol. 1. (Curran: Red Hook, NY, 2014); R. Voznyuk, M. Charles, A. Renlund et al., "High Explosive Detection and Destruction Technology Applications for Warhead Dismantlement Transparency," Sand 2000-1533C, Sandia National Laboratory (2000).
2. Z. D. Whetstone, K. J. Kearfott, "A review of conventional explosives detection using active neutron interrogation," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 301 (2014): 629–639. doi: 10.1007/s10967-014-3260-3265; Wen Ding, Yuling Dou, Guobao Wang et al., "Review on detection technology for explosives," *Explosive Materials* 40, 5, 33–37: (2011). (in Chinese); S. K. Sharma, S. Jakhar, R. Shukla et al., "Explosive detection system using pulsed 14MeV neutron source," *Fusion Engineering and Design* 85 (2010): 1562–1564. doi: 10.1016/j.fusengdes.2010.04.044; P. Shea, T. Gozani, H. Bozorgmanesh, "A TNA explosives-detection system in airline baggage," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A*, (1990): 299, 444–448. doi: 10.1016/0168-9002(90)90822-N.
3. ENDF: Evaluated Nuclear Data File [EB/OL]. [2016-11-09]. <https://www-nds.iaea.org/exfor/endl.htm>.
4. Там же.
5. Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics and Software Center, High Performance Numerical Simulation, China Academy of Engineering Physics, <http://www.iapcm.ac.cn/website/js/index.html?siteid=8a8a83c941edc0330141edc74b450014>
6. Gang LI, Baoyin Zhang, Li Deng et al., "Development of Monte Carlo particle transport code JMCT," *High Power Laser and Particle Beams* 25 (2013): 158–162. (in Chinese); Li Deng, Gang LI, Baoyin Zhang et al., "Simulation of Full-core pin-by-pin Model by JMCT Monte Carlo Neutron-photon Transport Code," *Atomic Energy Science and Technology* 48 (2014): 1061–1066. (in Chinese)
7. S. Fetter, "Detecting Nuclear Warheads," *Science & Global Security* 1 (1990): 225–302. doi: 10.1080/08929889008426333; Jun Wu, "Numerical Simulation Study of Nuclear Warhead Detection Techniques," Mianyang: China Academy of Engineering Physics (2003). (in Chinese)
8. Изготовлено в ORTEC Advanced Measurement Technology, <https://www.ortec-online.com/products/radiation-detectors/germanium-hpge-radiation-detectors>
9. Эффективности регистрации детектором полного пика для характеристических гамма-лучей с энергиями

2,22 МэВ, 4,95 МэВ и 10,83 МэВ соответственно равны 20,3%, 10,6% и 4,25%.