

УДК 539.1.06

**НЕЙТРОННЫЕ МЕТОДЫ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И
ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВЗРЫВООПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ
КОДИРОВАННЫХ АПЕРТУР**

Плахотник В.Ю., с.н.с, Поляков Г.А., н.с.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Искра",

г. Луганск

91033, Луганск, ул. Звейнека, 145с

E-mail: official@iskra.lugansk.ua

Розглядається придатність різних методів нейтронного аналізу для виявлення вибухових речовин в умовах гуманітарного розмінування. Проведені оцінки виходу з 1 cm^3 тринітротолуолу гамма-випромінювання, що виникає в результаті нейтронно-активаційних і нейтронний-радіаційних реакцій. Показана перевага використання нейтронний-радіаційного аналізу в завданнях детектування TNR. Обґрунтовано застосування систем візуалізації полий гамма-випромінювання на основі кодованих апертур для локалізації вибухонебезпечних об'єктів.

Ключові слова: вибухові речовини, нейтрони, нейтронні методи аналізу, візуалізація гамма-випромінювання, кодовані апертури

Using of the different neutron analysis methods for the explosive detection in the condition of the humanitarian demining is considered in this paper. The estimations of gamma-radiation output from 1 cm^3 of TNT arisen at neutron activation reactions and neutron scattering reactions are carried out. Preference of the Pulsed Fast Neutron Analysis (PFNA) using in the tasks of explosive detection is shown. Application of the coded aperture gamma-ray imaging systems for localization of the dangerously explosive objects is founded.

Key words: explosive material, neutrons, neutron analysis methods, gamma-ray imaging, coded apertures.

Введение. Задача обнаружения скрытой по разным причинам взрывчатки стала в настоящее время актуальной в различных областях нашей повседневной деятельности. Особенно важными среди них являются такие как антитеррористические операции, контроль безопасности всех видов транспорта, гуманитарное разминирование, ликвидация последствий таких инцидентов, как взрывы армейских арсеналов и заводов по производству вооружений. Общий подход к поиску скрытых взрывчатых веществ (ВВ) в настоящее время состоит в использовании рентгеновского излучения, электромагнитного излучения и собак. Однако все эти методы при их вполне определенных достоинствах имеют и известные недостатки, которые ограничивают их применимость в ряде практических приложений.

Сейчас уже выработаны требования к технологиям, которые могли бы обеспечить успешное решение задачи поиска и идентификации ВВ. Такие требования включают:

– **проницаемость:** метод детектирования должен обеспечивать детектирование и идентификацию ВВ на большом расстоянии от поверхности объекта или за толстыми преградами, например, для обнаружения ВВ в объеме большегрузных контейнеров;

– **чувствительность:** необходимо обеспечить минимальный объем и массу обнаруживаемых ВВ, поскольку современные ВВ могут быть опасны и в небольших количествах;

– **избирательность (специфичность):** зачастую скрытые ВВ находятся в большом объеме безопас-

ных предметов и веществ;

– **надежность:** уровень ложных срабатываний не должен быть высоким, так как в противном случае преимущества метода и технологии детектирования станут сомнительными из-за частого использования личного досмотра объекта.

Цель работы. Анализ возможностей использования методов нейронного анализа детектирования и локализации взрывчатых веществ.

Материал и результаты исследования. Суть методов нейтронного анализа состоит в зондировании области интереса пучком нейтронов, которые вследствие своей нейтральности проникают достаточно глубоко в объем вещества, и измерении величины отклика, возникающего в веществе вследствие взаимодействия нейтронов с ядрами его атомов. Варианты нейтронного анализа (рис. 1) различаются по энергии нейтронов зондирующего пучка (тепловые или быстрые нейтроны, моноэнергетические нейтроны или нейтроны с непрерывным спектром), по типу отклика (рассеянные нейтроны, гамма-излучение из ядерных реакций, гамма-излучение от неупругого рассеяния). В настоящее время различными исследовательскими группами в мире разрабатываются такие варианты методов нейтронного анализа как нейтронно-активационный анализ (НАА), называемый в зарубежной литературе Prompt Gamma-Neutron Analysis (PGNA), нейтронно-радиационный анализ (НРА, Pulsed Fast Neutron Analysis - PFNA), нейтронная спектроскопия (Pulsed Fast Neutron Transmission Spectroscopy – PFNTS), а

также некоторые комбинированные методы, сочетающие измерение γ -излучения от взаимодействия ядер вещества объекта с быстрыми и тепловыми нейтронами (Pulsed Fast-Thermal Neutron Analysis – PFTNA). Разрабатываются также методы анализа поля рассеянных в особых направлениях нейтронов, например, анализ рассеяния нейтронов под малыми углами, анализ обратнорассеянных нейтронов и т.д.

Нейтронные методы анализа

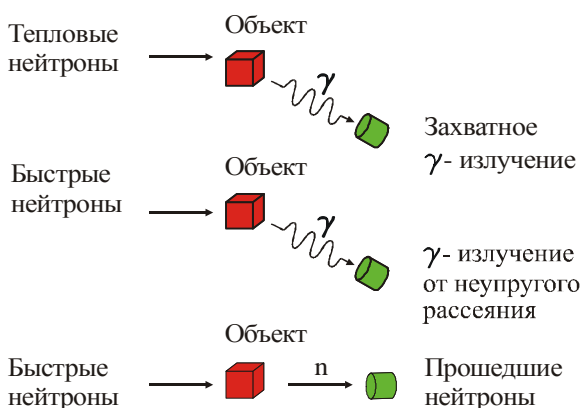


Рисунок 1 – Варианты нейтронного анализа

Важная особенность нейтронных методов анализа состоит в возможности идентификации типа ВВ, т.к. нейтроны взаимодействуют с ядром и особенности отклика материала на нейтронное зондирование зависят от состава и структуры ядра.

Отметим некоторые особенности материальных характеристик ВВ.

Прежде всего, ВВ имеют более высокую плотность, чем многие органические материалы, т.к. повышение плотности ВВ приводит к улучшению взрываемости. Другая особенность связана с элементным составом ВВ. Типовой элементный состав ВВ включает в себя такие химические элементы, как водород (H), углерод (C), азот (N) и кислород (O), типичные также и для всех органических веществ. Однако ВВ отличаются повышенным содержанием кислорода и азота. Кроме того, соотношение концентраций O/N для ВВ занимает вполне ограниченную область (рис. 2) [1, 2].

Обычно ВВ имеют специфическую молекулярную, химическую или кристаллическую структуру (например, тринитротолуол – ТНТ). Диэлектрические свойства ВВ также предоставляют определенные возможности их детектирования и идентификации с помощью электромагнитных излучений в ТГц-диапазоне.

В настоящее время наиболее оптимальным, по нашему мнению, для получения зондирующего пучка нейтронов является применение нейтронных генераторов. Эти генераторы представляют собой импульсные низковольтные ускорители дейтронов, нейтроны в них получают из реакции $T(D,n)^4He$. Преимущества генераторов состоят в их достаточно простом управлении потоком нейтронов и безопасности в нерабочем состоянии. Энергия нейтронов, выходящих под углом 90° к пучку дейтронов, составляет 14,1 МэВ, а для любых других углов отличается не более, чем на $\pm 7\%$. Современные генераторы нейтронов позволяют получить поток нейтронов более 10^{11} c^{-1} .

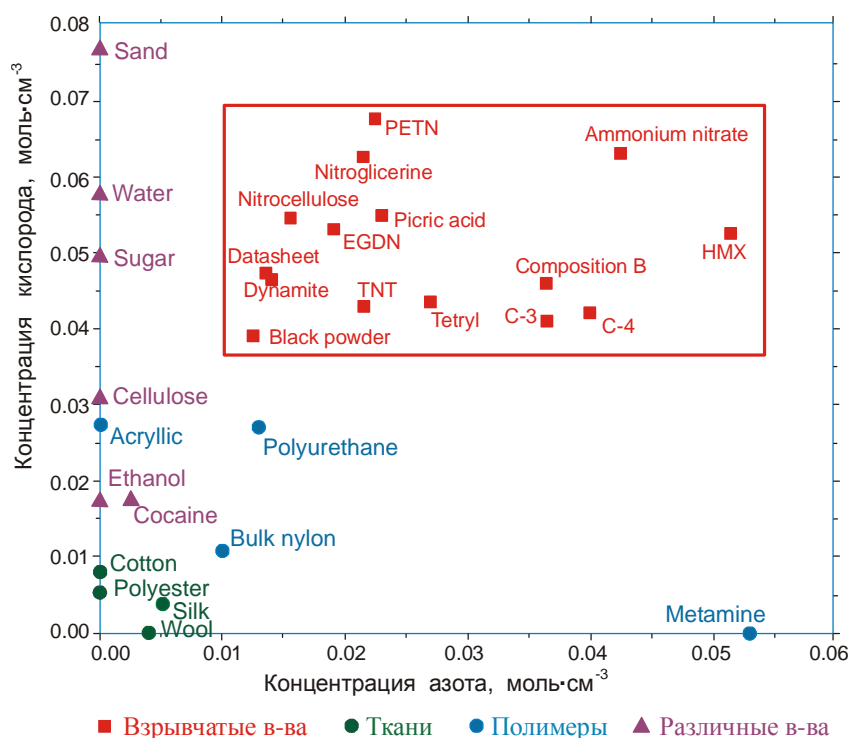


Рисунок 2 – Соотношение концентраций O/N для некоторых веществ

Производя зондирование контролируемого объекта или объема с помощью пучка быстрых нейтронов, обладающих высокой проникающей способностью, мы вызываем испускание гамма-излучения, характерного для атомов, входящих в состав содержимого объекта. Это гамма-излучение испускается в результате некоторых реакций ядер с быстрыми нейтронами. К таким реакциям относятся реакция радиационного захвата, неупругое рассеяние нейтронов, реакции активации.

Один из возможных вариантов обнаружения ВВ состоит в применении метода нейтронно-активационного анализа (НАА). Взаимодействие нейтронов с ядрами атомов ВВ приводит к образованию искусственных радиоактивных ядер, которые при распаде излучают гамма-кванты с характеристическими энергиями. Перечень возможных реакций на ядрах основных элементов ВВ приведен в табл. 1 [3].

Для получения активности насыщения (макси-

мально возможного уровня активности анализируемого вещества) время облучения области интереса должно быть не менее 3 - 4 периодов полураспада.

Следует заметить, что период полураспада основного анализируемого вещества ^{13}N составляет почти 10 мин., поэтому получить его высокую активность не представляется возможным. Кроме того не вызывают оптимизма и сравнительно небольшие сечения взаимодействия кислорода и азота с нейтронами.

Другой метод обнаружения ВВ путем нейтронного зондирования состоит в анализе гамма-излучения, возникающего в процессах неупругого рассеяния нейтронов. При неупругом рассеянии нейтронов с энергией, превышающей значение порога, ядро атома переходит в возбужденное состояние. Возбуждение ядра снимается путем излучения гамма-квантов с энергией, соответствующей энергии уровня.

Таблица 1 – Сведения о нейтронно-активационных реакция на атомах, входящих в состав ВВ

№ п/п	Реакция	Период полураспада продуктов реакции	Энергия гамма-квантов, кэВ	Выход гамма-квантов на распад, %	Сечение реакции для нейтронов с $E_n = 14$ МэВ, мбарн
1.	$^{16}\text{O}(n,p)^{16}\text{N}$	7,13 сек	6129,2 7115,2	68,8 5,0	39,1
2.	$^{14}\text{N}(n,2n)^{13}\text{N}$	9,56 мин	511	200	6,93
3.	$^{12}\text{C}(n,p)^{12}\text{B}$	20 мсек	3220 4430	1,3 2,6	$\approx 0,2$
4.	$^{37}\text{Cl}(n,p)^{37}\text{S}$	5,06 мин	3103,3	94,3	29,6

Так как схема уровней ядра каждого нуклида индивидуальна, то гамма-излучение из реакций неупругого рассеяния может быть использовано для анализа химического состава вещества. Такой вид анализа называют нейтронно-радиационным, т.к. периоды полураспадов возбужденных состояний очень малы ($10^{-9} - 10^{-15}$ с), и гамма-кванты излучаются практически мгновенно после акта рассеяния. В таблице 2 приведены сведения о реакциях неупругого рассеяния на ядрах атомов, входящих в состав ВВ [4].

Таблица 2 – Сечения реакций неупругого рассеяния нейтронов ($E_n = 14$ МэВ) с возбуждением первого уровня на ядрах элементов, входящих в состав ВВ

№ п/п	Реакция	Сечение, мбарн	Энергия испускаемых гамма-квантов, кэВ	Период полураспада
1.	$^{14}\text{N}(n,n')^{14}\text{N}$	70	2312,59	68 фсек
2.	$^{16}\text{O}(n,n')^{16}\text{O}$	140	6129	18,4 псек
3.	$^{12}\text{C}(n,n')^{12}\text{C}$	174	4438	61 фсек

Нейтроны, получающиеся в реакции $T(D,n)^4\text{He}$, имеют энергию около 14 МэВ. Использование пучка зондирующих нейтронов с меньшими энергиями для

НРА нецелесообразно, т.к. для обнаружения ВВ необходимо определение концентраций таких элементов, как кислород, азот и углерод по гамма-излучению от неупругого рассеяния нейтронов. Реакции неупругого рассеяния являются пороговыми, т.е. они могут происходить только с нейтронами, энергия которых превышает пороговый уровень. Максимальное значение порога имеет углерод ($\approx 5,0$ МэВ). Максимальные значения сечений реакций неупругого рассеяния для всех элементов достигаются при энергии нейтронов около 10 МэВ.

В процессе зондирования объекта досмотра будут происходить одновременно процессы активации, неупругого рассеяния. Спектр гамма-излучения из объекта окажется достаточно сложным, усложненным интерференцией линий, поэтому для анализа потребуется применение детектирующей аппаратуры с высоким энергетическим разрешением и математических методов деконволюции спектров.

Задача гуманитарного разминирования накладывает определенные ограничения на использование нейтронных методов детектирования ВВ.

В подавляющем большинстве случаев геометрия задачи предполагает односторонний доступ к области интереса. В этом случае методы, основанные на геометрии "на просвет", оказываются неприменимыми. Например, нейтронная спектроскопия может дать надежные результаты только при использовании данных о рассеянии нейтронов как вперед, так и

назад [5]. Таким образом, только нейтрон-гамма-методы (НАА, НРА) предоставляют возможность детектирования ВВ в геометрии с односторонним доступом.

Для сравнения эффективности методов НАА и НРА при детектировании ВВ оценим выход гамма-квантов из 1 см³ тринитротолуола (ТНТ), облучаемого потоком быстрых нейтронов от генератора. Пусть расстояние от источника нейтронов до образца ТНТ составляет 1,5 м. Такое (или близкое к нему) расстояние от источника нейтронов может быть обеспечено конструкцией устройства для полевого детектирования ВВ при гуманитарном разминировании. Тогда плотность потока нейтронов в точке локализации образца составит 3.5·10⁵ см⁻²с⁻¹.

Поток гамма-излучения в аналитическую линию из активационной реакции определяем по известной формуле:

$$F = h \cdot \frac{p \cdot S \cdot j \cdot N_A \cdot m}{M_a} \cdot (1 - e^{(-I \cdot T)}) \cdot e^{(-I \cdot t)} \quad (1)$$

где η – квантовый выход гамма-излучения в аналитическую линию;

p – относительное содержание облучаемого изотопа в химическом элементе;

σ – сечение активации нейтронами с данной энергией E , см²/атом;

φ – плотность потока нейтронов, нейтр./(см² с);

N_A – число Авогадро;

M_a – атомная масса облучаемого нуклида;

m – масса облучаемого образца, г;

λ – постоянная распада получаемого радионуклида, с⁻¹;

$\lambda = \ln(2)/T_{hl}$, T_{hl} – период полураспада, с;

T – время облучения, с;

t – время после облучения, с

Для реакций неупругого рассеяния ($\lambda \gg 1$)

$$F = h \cdot S \cdot j \cdot Q_e \quad (2)$$

где Q_e – количество атомов изотопа в 1 см³ ТНТ.

Результаты оценок потоков гамма-квантов из возможных реакций приведены в таблице 3. Из нее очевидно, что информативность реакций неупругого рассеяния на 1–2 порядка выше, чем информативность активационных реакций.

Таблица 3 – Выход гамма-излучения из 1 см³ ТНТ при облучении его быстрыми нейтронами

№ п/п	Реакция	Энергия гамма-квантов, кэВ	Выход из 1 см ³ ТНТ (для 1.-3. – после 5 мин облучения), с ⁻¹
1.	¹⁶ O(n,p) ¹⁶ N	6129	240
		7115	17
2.	¹⁴ N(n,2n) ¹³ N	511	19
3.	¹² C(n,p) ¹² B	3220	0,027
		4430	0,054

4.	¹⁶ O(n,n') ¹⁶ O	6129	1250
5.	¹⁴ N(n,n') ¹⁴ N	2312	310
6.	¹² C(n,n') ¹² C	4438	1800

В задачах детектирования ВВ всегда представляет интерес не только факт наличия его в зоне интереса, но также и локализация опасного объекта.

С целью локализации возникает необходимость визуализации поля гамма-излучения от источников в зоне поиска ВВ. Причем для получения подробной информации о форме размерах опасного объекта изображение области интереса должно быть многоэлементным.

В практике детектирования ВВ предложено несколько методов получения таких изображений. Типичным для них является использование коллимированных детекторов гамма-излучения. Интересный метод был предложен в [6]. Этот метод основан на использовании закрытого дейтерий-третиевые (D-T) нейтронного генератора с детектором сопутствующих частиц (Associated-Particle Sealed-Tube Neutron Generator – APSTNG). Такие генераторы выпускаются, например, фирмой MF Physics Inc, Colorado Springs. Конструкция генератора позволяет регистрировать направление вылета быстрого нейтрона в область интереса и, таким образом, определять направление на точку рождения гамма-кванта интересующей энергии. По множеству таких направлений строится пространственная область с повышенной вероятностью рождения гамма-квантов.

Один из современных методов получения многоэлементных изображений состоит в использовании кодированных апертур. В системах получения изображений с кодированными апертурами кодирующая маска, представляющая собой массив элементов, прозрачных для излучения и поглощающих его полностью или частично, расположена между излучающим объектом и детектором. Элементы кодирующей маски расположены по строгому математическому закону, обеспечивающему уникальность тени маски для каждого положения источника в поле зрения системы. За счет этого имеется возможность получить распределение источников в поле зрения путем математической обработки тенеграммы, зарегистрированной детектором за время наблюдения. Чтобы зарегистрировать тенеграмму детектор системы получения изображений должен быть позиционно-чувствительным.

Главное преимущество систем с кодированными апертурами состоит в реализации мультиплексной логики измерений. Суть такой логики состоит в том, что при регистрации тенеграммы в процессе сбора данных позиционно-чувствительный детектор наблюдает не отдельный элемент поля зрения (pixel), а одновременно, по крайней мере, половину всего поля зрения. За счет этого отношение сигнал/шум у

системы с кодированной апертурой в $0,5 \cdot \sqrt{N}$ раз выше, чем у простого сканирующего коллиматора или однопинхольной камеры. Здесь N – количество элементов, разрешаемых в поле зрения. Очевидно, что мультиплексный выигрыш тем выше, чем боль-

шее количество элементов поля зрения необходимо получить. Следует заметить, что полностью мультиплексный выигрыш систем получения изображений с кодированными апертурами реализуется только в условиях преобладания фонового счета событий над счетом событий сигнала. В таких условиях оптимальный коэффициент пропускания апертуры $\approx 0,5$. Если флуктуации сигнала преобладают над фоном, то оптимальный коэффициент пропускания апертуры уменьшается, и мультиплексный выигрыш может быть реализован только для наиболее интенсивных компонент вектора измерений. Таким образом, применение системы с кодированной апертурой для получения изображений пространственного распределения источников излучения оправдано при измерениях слабых сигналов (потоков излучения) и/или необходимости детализации пространственного распределения источников излучения.

Одновременно с локализацией источников излучений часто необходима и их идентификация, т.е. определение нуклидного состава излучателей. Эта задача решается путем анализа спектров излучения и обнаружения характеристических линий. В случае множественности источников излучения в области интереса важной задачей является получение раздельных спектров. Для этого часто применяется измерение спектров излучения отдельных источников с помощью коллимированных детекторов. Но этот метод, как известно, требует значительных затрат времени. Использование мультиплексных свойств кодированных апертур для получения спектров пространственно разделенных источников может дать существенный выигрыш в чувствительности и времени измерений.

Выводы. Предлагается концепция архитектуры устройства для детектирования ВВ и локализации взрывоопасных объектов в условиях гуманитарного разминирования. Такая установка должна состоять из:

- средства перемещения (движущейся платформы);
- источника быстрых (14 МэВ) нейтронов, установленного на выносной стреле, и облучающего об-

ласть интереса;

- регистратора гамма-излучения с кодированной апертурой;
- нейтронной защиты регистратора;
- системы визуализации поля гамма-излучения;
- средств обезвреживания.

Несомненные дополнительные преимущества такой системе может обеспечить применение в качестве источника нейтронов генератора с детектором сопутствующих частиц. Применение времяпролетной методики отбора событий в таком случае обеспечит значительное снижение фоновой загрузки регистрирующей аппаратуры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Buffler A. Contraband detection with fast neutrons. 9th International Symposium on Radiation Physics, Cape Town, 26-31 October 2003 www.phy.uct.ac.za/people/buffer/Buffer%20ISRP9%20conference.pdf
2. Steward S. and Forsht D. Use of nuclear techniques to describe the fill of found unexploded ordnance. Applied Radiation and Isotopes, **63** (2005), pp.795-797.
3. Меднис И.В. Сечения ядерных реакций, применяемых в нейтронно-активационном анализе: Справочник. – Рига: Зинатне, 1991. – 119 с.
4. Медведев Ю.А., Степанов В.М., Труханов Г.Я. Ядерно-физические константы взаимодействия нейтронов с элементами, входящими в состав атмосферы и земной коры : Справочник. – М.: Энергоиздат, 1981.
5. A. Buffler, F.D. Brooks, M.S. Allie, K. Bharuth-Ram, M.R. Nchodu. Material classification by fast neutron scattering. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research (B), **173** (2001), pp.483 – 502
6. Rhodes E., Dickerman C.E. Associated-Particle Sealed-Tube Neutron Probe: Detection of Explosives, Contraband and Nuclear Materials. Moscow ICTC Symposium "Nuclear Physics Methods for Detecting Smuggled Explosives and Nuclear Materials", April 8-11, 1996, Obninsk, Russia.

Статья поступила 20.03.07
Рекомендовано к печати д.т.н., проф.
Воробйовым В.В.