

Пучковые технологии в задачах обнаружения взрывчатых веществ

М.Ф. Ворогушин, Ю.Н. Гавриш, А.В. Сидоров, А.М. Фиалковский
Научно-исследовательский институт
электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

Проблемы обнаружения взрывчатых веществ (ВВ) обусловлены ростом количества и разнообразия форм террористических актов во многих регионах и странах. Борьба с этими преступлениями невозможна без оснащения соответствующих служб эффективными техническими средствами поиска замаскированных взрывных устройств (ВУ).

Изучение применимости ядерно-физических методов для поиска ВВ началось в 60-е годы и имело целью определение элементного состава объектов с помощью нейтронов или гамма-квантов. Данные виды излучения обладают большой проникающей способностью, вследствие чего могут эффективно использоваться для зондирования объектов значительных размеров в том числе и для выявления замаскированных ВВ. Перспективность проведения элементного анализа для обнаружения ВВ обусловлена тем, что в отличие от обычных веществ, большинство ВВ имеют уникальное сочетание высоких концентраций атомов азота, углерода и кислорода. Средняя концентрация азота в ВВ составляет (0.026 ± 0.012) моль/см³. Лишь меламина и полиакрил имеют близкое к ВВ содержание азота и могут приводить к ложным тревогам. В связи с этим, высокое содержание азота в контролируемом объекте служит признаком вероятного присутствия ВВ, а высокие концентрации азота и кислорода (средняя концентрация кислорода основных ВВ равна (0.05 ± 0.009) моль/см³), практически однозначно, указывают на его наличие. Плотность распределения интересующих элементов определяется путем измерения спектра рассеянных или прошедших нейтронов или регистрации характеристического излучения (гамма-кванты), образующегося в результате неупругого взаимодействия нейтронов с элементами мишени.

К настоящему времени предложено несколько ядерно-физических методик элементного анализа состава содержимого багажа, основные характеристики которых приведены в табл. 1. Среди рассмотренных методов обнаружения ВВ наибольший интерес представляют такие, в которых может быть получена информация о пространственном распределении O , N , C . К ним относятся ядерно-физические методы обнаружения ВВ, основанными на применении быстрых нейтронов, NES, PFNA и API.

Для сравнения этих методов рассмотрим обнаружительные характеристики методов NES, PFNA и API в случае обнаружения тротила ($C_7H_5O_6N_3$).

Обнаружение ВВ основано на определении локальных плотностей элементов и отношения концентраций атомов углерода, азота и кислорода (C/O , C/N и O/N). Сравнение методов сделано на основе сопоставления максимальной скорости счета и требуемого энергетического разрешения, что определяет чувствительность и эффективность применения метода. Для более полного сравнения необходимо учитывать пространственное разрешение и радиационную безопасность, размер, вес и стоимость оборудования для каждой методики.

При вычислениях сделаны следующие предположения:

- принята следующая идеализация источников: NES – источник изотропно испускает моноэнергетичные нейтроны с энергией 5.5 МэВ; API – источник изотропно испускает нейтроны с энергией 14.1 МэВ; PFNA – нейтроны с энергией 8 МэВ, 1/3 нейтронов попадает в исследуемый объект. Интенсивность источников 10^8 н/сек;
- геометрия, одинаковая для сравниваемых методик: расстояние S между источником и мишенью, расстояние D между мишенью и детектором;
- мишень состоит из чистого материала в форме куба со стороной 10 см;
- детектор имеет площадь A и эффективность обнаружения ε ;
- пренебрегаем уменьшением потока нейтронов и гамма-квантов в воздухе;
- учитывается только однократное рассеяние нейтронов.

Таблица 2. Основные характеристики ядерно-физических методов обнаружения ВВ.

№	Метод обнаружения	Зондирующее излучение	Основная ядерная реакция	Детектируемое излучение	Измеряемый параметр	Источники излучения
1	TNA – анализ на тепловых нейтронах	Тепловые нейтроны	(n, γ)	Гамма-кванты с энергией 10.83 МэВ	2-мерное изображение содержания азота	Изотоп ^{252}Cf , нейтронные генераторы
2	PTNA – импульсный анализ на тепловых нейтронах	Тепловые нейтроны	(n, γ)	Гамма-кванты с энергией 10.83 МэВ	2-мерное изображение содержания азота	Импульсные нейтронные генераторы
3	FNA – анализ на быстрых нейтронах	Нейтроны с энергией выше 8 МэВ	$(n, n' \gamma)$	Гамма-кванты с энергиями от 2 до 7 МэВ	2-мерное изображение содержания азота, углерода, кислорода	Нейтронные генераторы
4	PFNA - импульсный анализ на быстрых нейтронах	Нейтроны с энергией выше 8 МэВ	$(n, n' \gamma)$	Гамма-кванты с энергиями от 2 до 7 МэВ	2- и 3-мерное изображение содержания азота, углерода, кислорода	Импульсные нейтронные генераторы
5	API – анализ на совпадениях альфа частиц и гамма-квантов	Нейтроны с энергией 14 МэВ	$(n, n' \gamma)$	Гамма-кванты с энергиями от 2 до 7 МэВ	3-мерное изображение содержания азота, углерода, кислорода	Нейтронный генератор (d, t)
6	NRA или NES – анализ резонансного ослабления или упругого рассеяния быстрых нейтронов	Нейтроны с энергией до 10 МэВ	(n, n)	Нейтроны с энергией до 10 МэВ	2-мерное изображение содержания азота, углерода, кислорода	Импульсные нейтронные генераторы
7	GRA – анализ резонансного поглощения гамма-квантов	Гамма-кванты с энергией 9.17 МэВ	(γ, γ)	Гамма-кванты с энергией 9.17 МэВ	3-мерное изображение содержания азота	Ускоритель протонов на энергию 2 МэВ
8	РАА – гамма-активационный анализ	Тормозные гамма-кванты с максимальной энергией ~13 МэВ	(γ, n) и (γ, p)	Гамма-кванты с энергией 0.511 МэВ	3-мерное изображение содержания азота	Ускоритель электронов на энергию ~13 МэВ

Число нейтронов и гамма-квантов Y , образовавшихся в результате упругого или неупругого рассеяния и зарегистрированных под углом θ по отношению к направлению начального пучка нейтронов, можно вычислить по формуле

$$Y(\theta) = \Phi \cdot nt \cdot \varepsilon \cdot \sigma(\theta) \cdot d\Omega, \quad (1)$$

где Φ – поток нейтронов через объект, сек⁻¹; nt – толщина мишени, см²; (n – плотность атомов и t – толщина); ε – абсолютная эффективность детектора; $\sigma(\theta)$ – сечение взаимодействия при угле θ , мбн/страд; $d\Omega$ – телесный угол, стянутый детектором относительно образца.

Формула справедлива только для тонких мишеней. Для толстых мишеней было оценено, что 50% нейтронов и 10% гамма-квантов теряются в результате рассеяния в мишени. Ослабление полезного сигнала учитывается введением в формулу (1) коэффициента $k = 0.45$.

Таблица 2. Исходные данные.

	NES	API	PFNA
Энергия нейтронов, МэВ	5.5	14.1	8
I, нейтр/сек	10 ⁸	10 ⁸	10 ⁸
Расстояние до источника, см	100	100;	100;
Расстояние до детектора, см	100	100;	100;
Диаметр детектора, см	12.7 (5 ")	10 (4 ")	10 (4 ")
Эффективность детектора	0.1	0.345;	0.345;
Угол между направлением пучка нейтронов и детектором	145 ⁰	90 ⁰	90 ⁰

В табл. 3 представлена максимальная скорость счета нейтронов или гамма-квантов, образовавшихся в результате взаимодействия нейтронов с атомами углерода, азота и кислорода для мишени, состоящей из тротила, при интенсивности источника 10⁸ нейтр/сек, для различных методик. Для сравнения методик используется только наиболее сильно выраженная линия каждого атома.

Таблица 3. Сравнение максимальной скорости счета для трех методов.

Элемент (энергия гамма-квантов, МэВ)	NES	API	PFNA
Углерод (4.43)	0.144	0.14	295.3
Азот (2.31)	0.369	0.05	42.4
Кислород (6.13)	0.164	0.12	171.6

Из этой таблицы видно, что применение метода PFNA дает наибольшую скорость счета, что обусловлено использованием в качестве источника нейтронов ускорителя. В расчетах это отражено тем, что эффективный поток нейтронов для данного метода во много раз больше эффективного потока других методов, где применяются изотропные источники той же интенсивности.

Подводя итог, можно отметить следующее:

- В настоящее время нет ни одной системы, способной обеспечить близкую к 100% вероятность правильного обнаружения ВВ при достаточно низком уровне ложных тревог (до 10%).
- Системы обнаружения взрывчатых веществ на основе ядерно-физических методов потенциально обладают хорошими характеристиками, однако их практическое применение сдерживается высокой стоимостью аппаратных средств и отсутствием специализированных недорогих ускорителей.
- Среди ядерно-физических методов обнаружения ВВ наиболее перспективными являются методы, основанные на применении быстрых нейтронов в качестве зондирующего излучения.