

Комплекс обнаружения взрывчатых и делящихся веществ на базе высокочастотного малогабаритного линейного ускорителя ионов водорода

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

Актуальность проблемы обнаружения взрывчатых веществ (ВВ) обусловлена ростом количества и разнообразия форм террористических актов во многих регионах и странах мира. Борьба с этими преступлениями невозможна без оснащения соответствующих служб эффективными техническими средствами поиска замаскированных взрывных устройств (ВУ). На первом этапе задача обнаружения ВУ заключалась в поиске металлических оболочек гранат или мин из традиционных взрывчатых материалов типа динамит, тротил и т.д. В настоящее время эта задача существенно усложнилась из-за применения безоболочечных ВУ, изготовленных, например, на основе пластиковой взрывчатки типа С-4, *Semtex* или *Detasheet*. Данные материалы по разрушительной силе значительно превосходят динамит и тротил, могут производиться в виде пластин толщиной ~0.25 дюйма ("листовые" ВВ), и ВУ на их основе можно придать любую форму.

К настоящему времени предложено большое количество различных методов и технических средств обнаружения ВВ, однако не существует метода, способного обеспечить 100%-ую вероятность обнаружения ВВ. Вследствие этого разрабатываются новые методы, в том числе и ядерно-физические, способные повысить эффективность обнаружения ВВ.

Методы обнаружения ВВ основаны на определении тех или иных свойств (физических или химических) содержимого контролируемого объекта и их последующего сравнения с соответствующими свойствами всех взрывчатых материалов, которые потенциально могут быть размещены в объекте. В результате анализа уровня разработок и практического применения технических средств обнаружения ВВ можно выделить три наиболее перспективных пути их развития:

- разработка «интеллектуальных» рентгенотелевизионных установок, способных производить анализ изображения контролируемых объектов и идентификацию ВВ без участия оператора;
- совершенствование систем обнаружения паров и частиц ВВ с помощью методов химического анализа;
- разработка эффективных систем элементного анализа на основе ядерно-физических методов.

Среди средств обнаружения на основе химического анализа паров применяются детекторы типа EGIS и *SecurScan* американской компании *Thermedics Inc.* и IONSCAN компании *Barringer Instruments Inc.* (США). Достоинствами этих систем является то, что они просты в обращении, не требуют участия оператора в интерпретации данных анализа и относительно низкая стоимость (до \$100,000). Однако эти системы не в состоянии гарантировать обнаружение ВВ из-за возможности полной герметизации взрывного устройства. Кроме того, затруднена калибровка таких установок из-за отсутствия прецизионных источников паров ВВ. Вследствие всего этого системы обнаружения паров ВВ рассматриваются лишь в качестве вспомогательных средств.

Главная причина, затрудняющая использование традиционных рентгеновских методов интроскопии для поиска ВУ без металлической оболочки, заключается в том, что большинство ВВ состоят из элементов с малым атомным номером. Плотность основных типов ВВ примерно в 1.5 раза превышает плотность многих бытовых материалов, таких как полиэтилен, пластмассы, шерсть, кожа и др. Лишь немногие материалы с низким атомным номером (например, меламин) по плотности близки к ВВ, но они редко попадают в багаже. Вследствие этого обнаружительная способность рентгеновских методов определяется их возможностями выявления небольших различий в плотности материалов с близкими атомными номерами, для чего необходимо проводить анализ пространственного распределения плотности и атомного номера материалов в объёме контролируемого объекта. ВВ легко могут быть замаскированы в бытовых предметах: мыле, кожаных изделиях, радио- или фотоаппаратуре и др. Маскировке дополнительно способствуют малый вес и объём самих ВВ, а также таймеров и взрывателей, которые также могут быть замаскированы.

Широко применяются рентгеновские установки американских компаний EG&G Astrophysics Research Corp. (установка E-Scan), American Science & Engineering Inc., Imatron Inc., Vivid Technologies Inc. и Science Applications Intern. Corp., германской фирмы HEIMANN (установка Hi-Mat), французской компании Schlumberger Industries и израильской фирмы Magal Secur. Systems Ltd. Отличительной особен-

ностью этих установок является принцип регистрации рентгеновского излучения в двух областях энергетического спектра, что позволяет выделить по среднему атомному номеру "органические" и "неорганические" материалы в изображении контролируемого объекта. С помощью таких установок с успехом выявляются огнестрельное и холодное оружие, гранаты в металлических корпусах, однако не представляется возможным обнаружить замаскированные пластиковые ВВ.

Перспективность анализа с использованием ядерно-физических методов для поиска взрывных устройств обусловлена тем, что ВВ, в отличие от обычных веществ, имеют уникальное сочетание высоких концентраций атомов азота, углерода, водорода и кислорода (см. табл. 1).

Таблица 1. Элементный состав основных типов ВВ (1–7) и некоторых органических материалов (8–11).

№	Вещество	Формула	Мол. вес	N, %	O, %	Плотность вещества, г·см ⁻³
1	Нитро-глицерин	$C_3H_5O_9N_3$	227	18.50	63.36	1.47
2	Тротил	$C_7H_5O_6N_3$	227	18.50	42.24	1.64
3	Тетрил	$C_7H_5O_8N_5$	287	24.39	44.54	1.73
4	Пикриновая кислота	$C_6H_3O_7N_3$	229	18.34	48.83	1.76
5	Гексоген	$C_3H_6O_6N_6$	222	37.83	43.20	1.81
6	ТЭН	$C_5H_8O_{12}N_4$	316	17.77	60.76	1.77
7	Октоген	$C_4H_8O_8N_8$	296	37.83	43.25	1.96
8	Меламин	$C_3H_6N_6$	126	66.67	-	1.57
9	Полиуретан	полимер	$>10^4$	15.30	37.00	1.17-1.21
10	Полиамидное волокно (нейлон, капрон)	полимер	$>10^4$	12.40	14.20	1.09-1.14
11	Полиакриловое волокно (орлон, ПАН)	полимер	>40000	25.40	-	1.15-1.17

Высокое содержание азота в контролируемом объекте может служить сигналом присутствия ВВ, а высокие концентрации атомов азота, углерода и кислорода однозначно свидетельствуют о его наличии. Важно подчеркнуть, что только ядерно-физические методы позволяют выявлять присутствие замаскированных ВВ.

Для обнаружения ВВ в моменты импульсов источника производится регистрация гамма-излучения, возникающего при неупругом рассеянии быстрых нейтронов на ядрах азота, кислорода и углерода.

Для обнаружения ДВ используется тот факт, что при ядерных взаимодействиях с делящимися материалами будут инициироваться реакции деления, характеризующиеся размножением нейтронов, состоящих из двух групп, мгновенных и запаздывающих, что приведет к некоторому увеличению потока нейтронов, а также "ужесточению" их энергетического спектра.

Из результатов работ [1–3] следует, что даже незначительное количество ДВ существенно повышает поток нейтронов, изменяет их энергетическое и временное распределение. Следовательно, характерными признаками присутствия ДВ в исследуемом объекте, облучаемом импульсным потоком нейтронов, является увеличение общего выхода нейтронов и изменение их энергетического распределения – появление группы высокоэнергетичных нейтронов, соответствующих реакции деления при измерении в момент импульса нейтронного источника, и присутствие группы запаздывающих нейтронов при измерении в промежутках между импульсами. Аналогичная картина наблюдается и при исследовании гамма-излучения от объекта, содержащего ДВ и облучаемого импульсным нейтронным потоком: также увеличивается поток гамма-квантов за счет реакции деления в момент импульса нейтронного потока и появляется группа запаздывающего гамма-излучения, сопутствующего распаду короткоживущих радионуклидов.

Исходя из вышеизложенного, представляется целесообразным построение комплекса, основанного на использовании импульсного нейтронного источника с временной селекцией регистрации вторичного гамма-излучения ядер характерных элементов ВВ и ДВ. В этом случае могут быть достигнуты высокая чувствительность по характерным элементам ВВ и ДВ, производительность анализа и снижение числа ложных тревог. Временная диаграмма токовых импульсов ускорителя представлена на рис. 1.

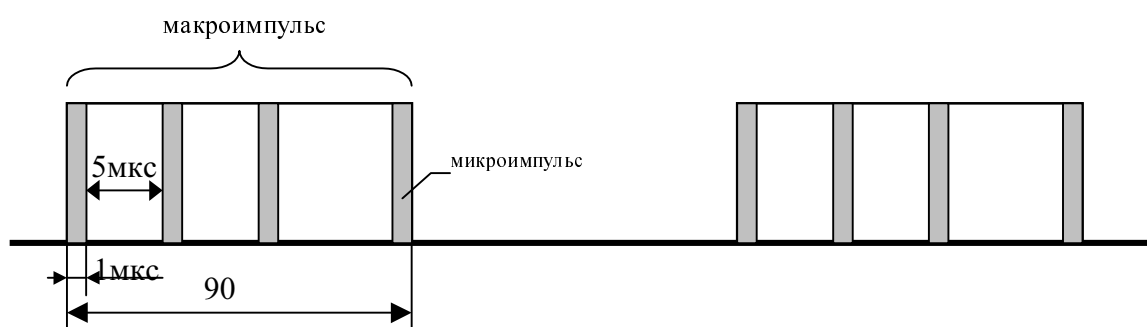


Рис. 1. Временная диаграмма токовых импульсов ускорителя дейтронов.

Концептуальная схема комплекса представлена на рис. 2. В состав комплекса входят: ускорительная система дейтронов с энергией 3.5 МэВ, мишенный узел, матричная детектирующая система и биологическая защита. Ускоряющая система состоит из 1 МэВ линейного малогабаритного высокочастотного 433 МГц ускорителя дейтронов и 433 МГц ИВ-резонатора с трубками дрейфа с переменнo-фазовой фокусировкой, обеспечивающей доускорение дейтронов до 3.5 МэВ.

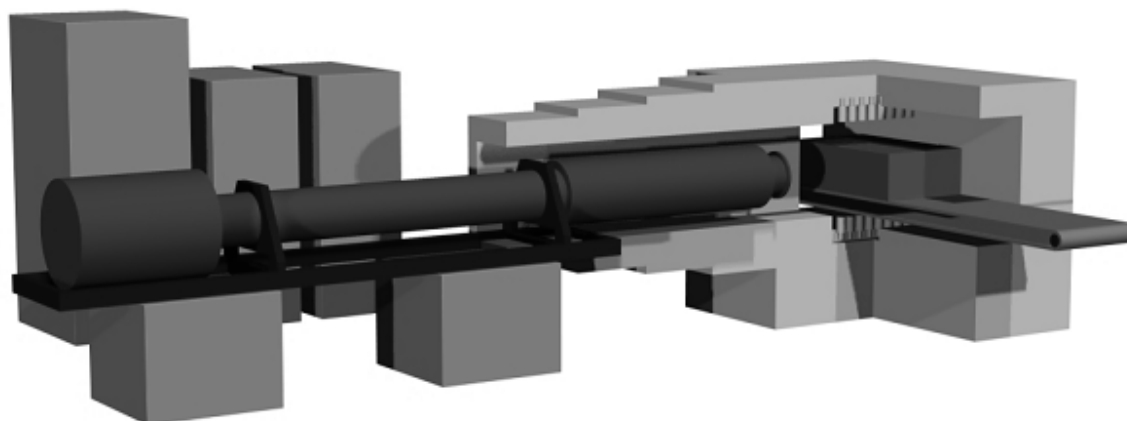


Рис. 2. Концептуальная схема комплекса обнаружения взрывчатых и делящихся веществ.

Достоинством линейного малогабаритного высокочастотного ускорителя дейтронов является возможность получения высоких импульсных потоков нейтронов (10^{14} н/имп.с) при сравнительно небольших массогабаритных характеристиках (размеры – 4 x 2 x 1.5 м. без систем питания, вес – не более 4000 кг). Наличие оптимизированной локальной биологической защиты позволит размещать комплекс в помещениях, не оборудованных дополнительными фундаментами и средствами радиационной защиты. Потребление электроэнергии комплексом от сети не более 35 кВт. Параметры ускорителя дейтронов представлены в табл. 2. Общий вид ВЧ-ускорителя ионов водорода представлен на рис. 3.

Учитывая периодический характер импульсного нейтронного источника, наиболее эффективным методом, позволяющим с наибольшей достоверностью измерять выход и временное распределение нейтронов и гамма-излучения в условиях малой статистики, является метод синхронного детектора.

Реализации предлагаемого метода возможна, если система детектирования для обнаружения ВВ будет представлять собой матрицу сцинтилляционных детекторов, полностью «просматривающих» исследуемый объект, и расположенную непосредственно за ним, а система детектирования для идентификации делящихся веществ – из двух детекторов большой эффективности на основе «быстрой» пластмассы (рис. 4).

Каждая ячейка матрицы состоит из кристалла CsI размером 80×80 в сборке с фотоэлектронным множителем или фотодиодом. Количество ячеек может варьироваться от 32 (8×4) до 256. Увеличение числа детекторов требуется для исследования крупногабаритных объектов.

Таблица 2. Параметры линейного высокочастотного ускорителя дейтронов.

Тип ускоряемых частиц	Дейтрон
Энергия частиц на выходе, МэВ	1
Ток в микроимпульсе, мА	≤ 20
Длительность микроимпульса, мкс	1
Ток в макроимпульсе, мА	$\leq 3,5$
Длительность макроимпульса, мкс	≤ 90
Максимальная частота повторения макроимпульсов, Гц	168
Максимально возможный средний ток, мкА (при предложенной схеме следования импульсов)	53
Относительный разброс частиц по энергиям $\Delta W/W$ (на уровне 0.9), %	± 2
Диаметр пучка на мишени, мм	2,5-5

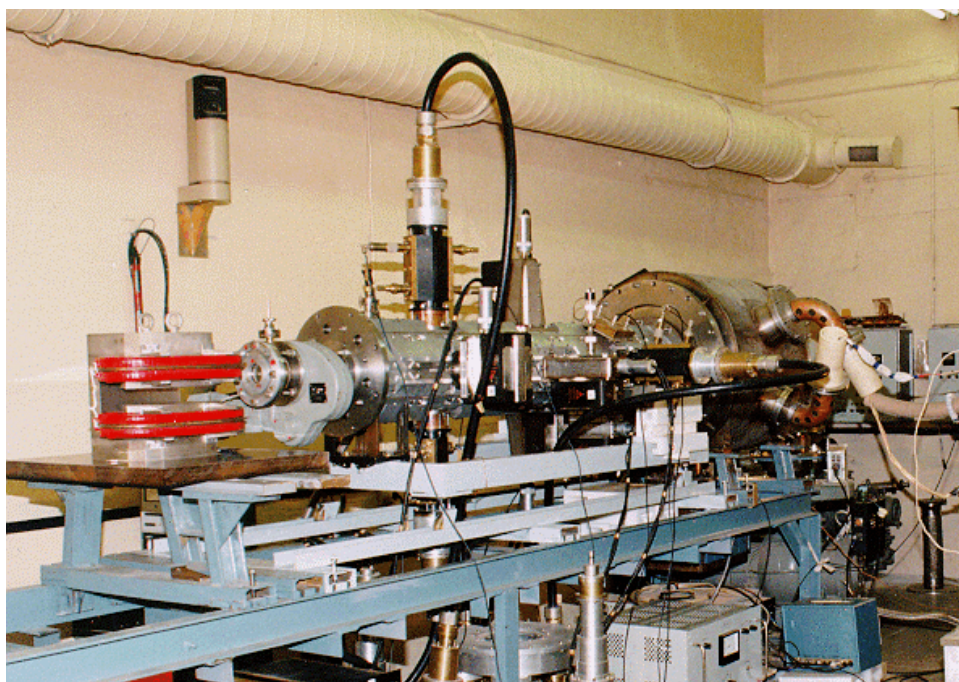


Рис. 3. Общий вид линейного ВЧ-ускорителя ионов водорода.

На рис. 5 представлены результаты расчета возможного варианта обнаружения ВВ в исследуемом объекте. В качестве координат выбраны расчетные отношения концентраций отдельных элементов к суммарной концентрации углерода, азота и кислорода (аналогичные данные получены для всех сочетаний координат $C/C+N+O$, $N/C+N+O$, $O/C+N+O$). Ромбами обозначены ВВ, квадратами – обычные вещества. Из рисунка видно, что вектор, координатами которого являются отношения концентраций, соответствующие ВВ, попадает в некоторую область графика, куда обычные вещества не попадают. Определив границы этой области, обнаружение ВВ в исследуемом объекте может быть выполнено следующим образом: если вектора, соответствующие отношению концентрации углерода, азота и кислорода, попадают в выделенную область, то в исследуемом объекте, возможно, находится ВВ.

Следует отметить, что эффективность обнаружения ВВ будет сильно зависеть от погрешности определения границ этой области. Также большое значение для эффективности обнаружения ВВ будет иметь пространственное разрешение методики. Метод PFNA способен обеспечить высокую эффективность обнаружения при достижении пространственного разрешения порядка сантиметров.

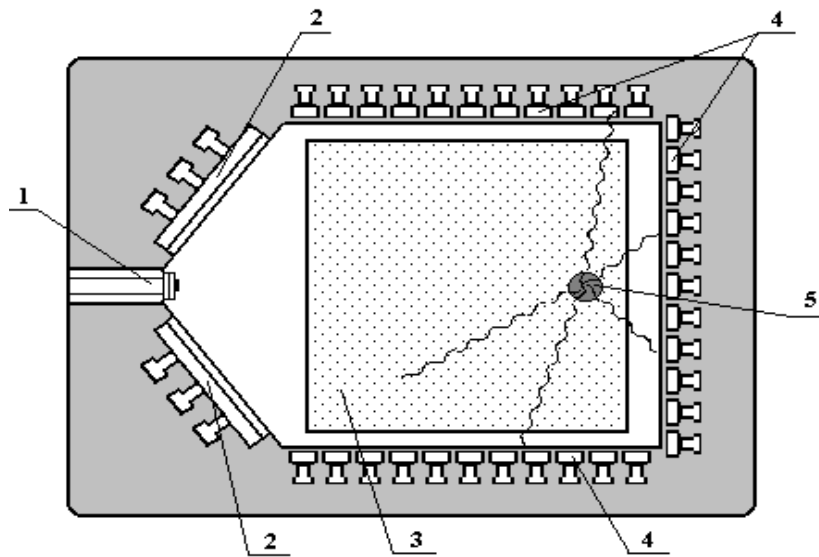


Рис. 4. Общий вид системы детектирования. 1 – мишенное устройство; 2 – система детектирования для идентификации ДВ; 3 – исследуемый объект; 4 – система детектирования для идентификации ВВ; 5 – место локализации ВВ или ДВ.

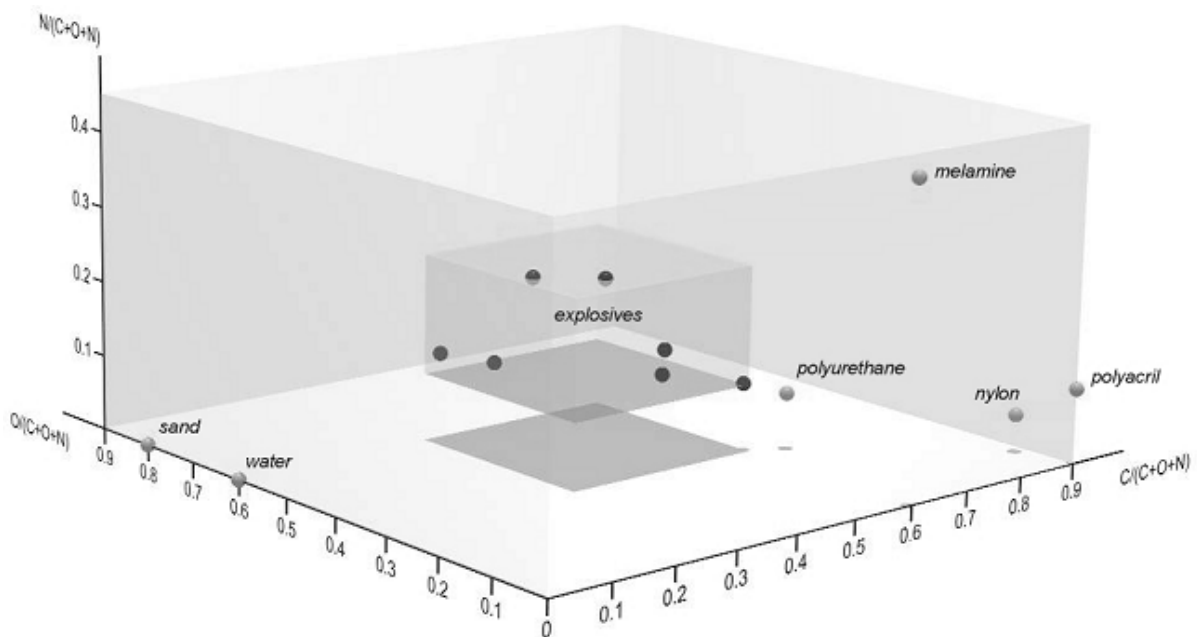


Рис. 5. Относительный сигнал от детекторов при регистрации характеристического гамма-излучения от углерода, азота и кислорода.

Источники информации

1. В.Ф. Ворогушин, Ю.Н. Гавриш, А.В. Сидоров, А.М. Фиалковский. Идентификация делящихся веществ с использованием ускоренного пучка дейтронов на удаленных объектах. – Сб. докладов XV совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1996.
2. В.Ф. Ворогушин, Ю.Н. Гавриш, А.В. Сидоров, А.М. Фиалковский. К вопросу о дистанционном определении делящихся веществ с использованием ускоренного пучка протонов. – Сб. докладов XV совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1996.
3. Ворогушин, Ю.Н. Гавриш. Некоторые аспекты методики идентификации делящихся веществ на удаленных объектах с использованием ускоренного пучка ионов водорода. – Сб. докладов XV совещания по ускорителям заряженных частиц. Протвино, 1996.