

На правах рукописи

Фиалковский Андрей Михайлович

**ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ МЕТОД
ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ И ДЕЛЯЩИХСЯ ВЕЩЕСТВ
НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ
НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург – 2002

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии “Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова”

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук

Гавриш Юрий Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Павлов Александр Викторович

кандидат физико-математических наук

Серебряков Александр Сергеевич

Ведущая организация:

Санкт-Петербургский Государственный Университет.

Защита состоится “___” _____ 2002г. в ___ на заседании диссертационного совета Д212.229.05 при Санкт-Петербургском государственном политехническом университете (195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д.29).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан “___” _____ 2002 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета _____ д. ф.-м.н., проф. Титовец Ю.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Актуальность проблемы обнаружения взрывчатых (ВВ) и делящихся (ДВ) веществ в настоящее время обусловлена резким ростом количества и разнообразием форм террористических актов, охвативших многие страны мира, в том числе и Россию. Борьба с этими преступлениями невозможна без оснащения соответствующих служб эффективными техническими средствами обнаружения замаскированных ВВ.

Если ранее задача обнаружения ВВ заключалась в поиске металлических оболочек гранат или мин из традиционных взрывчатых материалов типа динамит, тротил и т.д., то в настоящее время эта задача существенно усложнилась из-за применения пластиковых безоболочечных ВВ. Данные материалы по разрушительной силе значительно превосходят ранее известные и могут производиться в виде пластин толщиной ~5 мм ("листовые" ВВ), которым можно придать любую форму.

К настоящему времени предложено большое количество различных методов и технических средств обнаружения ВВ и ДВ, однако не существует метода, способного обеспечить 100% вероятность их обнаружения. Вследствие этого, разрабатываются новые методы, в том числе и ядерно-физические, способные повысить эффективность обнаружения ВВ. Важно подчеркнуть, что только ядерно-физические методы позволяют выявлять присутствие замаскированных ВВ.

На предотвращение распространения ядерных оружейных материалов и технологий направлено действие ряда международных договоров и соглашений. Это подчеркивает актуальность задачи разработки методов и создания аппаратных средств обнаружения и контроля несанкционированного перемещения ДВ.

Цель работы

Целью настоящей работы являются:

- разработка ядерно-физического метода обнаружения ВВ и ДВ с использованием импульсного периодического источника нейтронного излучения;
- разработка теоретических методов, алгоритмов и вычислительных программ оптимизации временных и энергетических параметров импульсного периодического источника быстрых нейтронов для обнаружения ВВ и ДВ;
- разработка физической модели комплекса обнаружения ВВ и ДВ с использованием импульсного периодического источника нейтронного излучения и системы детектирования, сбора и обработки спектрометрической информации для идентификации искоемых материалов.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в разработке нового ядерно-физического метода обнаружения ВВ и ДВ, основанного на применении импульсного периодического источника быстрых нейтронов и анализе спектров вторичных излучений из ядерных реакций.

Конкретные теоретические и экспериментальные исследования позволили получить ряд новых результатов:

- Предложен ядерно-физический метод обнаружения ВВ и ДВ с использованием импульсного периодического источника нейтронов, позволяющий повысить вероятность и достоверность идентификации по сравнению с существующими методами. Получено экспериментальное подтверждение метода;
- Разработаны теоретические методы и пакет вычислительных программ моделирования ядерно-физических процессов взаимодействия протонов, нейтронов и дейтронов с веществом в широком диапазоне энергий. В частности, предложены методы расчета двойных дифференциальных сечений (p,n) , (d,n) реакций и реакций под действием нейтронов в области до 20 МэВ, а также алгоритм расчета дифференциальных распределений нейтронов, образующихся при взаимодействии протонов и дейтронов с толстой мишенью;
- Проведена оптимизация временных и энергетических параметров периодического источника нейтронного излучения предложенного ядерно-физического метода с целью получения максимальной вероятности, достоверности и экспрессности обнаружения ВВ и ДВ;
- Предложена физическая модель комплекса обнаружения ВВ и ДВ на базе импульсного периодического источника нейтронов.

Практическая ценность работы

Предложенный ядерно-физический метод обнаружения ВВ и ДВ защищен патентом РФ.

На основе предложенного ядерно-физического метода в НПК ЛУЦ ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова создается комплекс обнаружения ВВ и ДВ с использованием линейного высокочастотного ускорителя ионов.

Данный ядерно-физический метод позволяет, кроме обнаружения ВВ и ДВ, также проводить обнаружение драгоценных металлов.

Разработано, изготовлено и испытано ядерно-физическое оборудование детектирования, сбора и обработки спектрометрической информации для комплекса обнаружения ВВ и ДВ.

Теоретические и экспериментальные результаты, полученные в работе, использовались при выполнении хоздоговорных и госбюджетных работ в НПК ЛУЦ ФГУП НИИЭФА им. Д.В. Ефремова в период с 1995 по 2002 годы.

На защиту выносятся:

1. Ядерно-физический метод обнаружения ВВ и ДВ с использованием импульсного периодического источника нейтронов, позволяющий повысить вероятность и достоверность обнаружения ВВ и ДВ;
2. Методы, алгоритмы и вычислительные программы оптимизации энергетических и временных параметров импульсного периодического источника нейтронного излучения для обнаружения ВВ и ДВ, включающие в себя программы расчетов ядерно-физических характеристик вторичного ионизирующего излучения из ядерных реакций под действием протонов, нейтронов и дейтронов с веществом в широком энергетическом диапазоне;
3. Физическая модель комплекса обнаружения ВВ и ДВ на базе высокочастотных сильноточных линейных ускорителей ионов водорода.

Апробация результатов работы

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на следующих семинарах и конференциях: Восьмом, Девятом и Десятом совещании по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине (Санкт-Петербург, 1995, 1998, 2001); XV и XVII совещаниях по ускорителям заряженных частиц (Протвино, 1994 и 2000 годы); Международном совещании BDO (Beam dynamic optimization)-94, BDO-96 и BDO-99 (Санкт-Петербург, 1994, 1996 и Саратов, 1999); XVI международном семинаре по линейным ускорителям заряженных частиц (Алушта, 1999); II, III и V всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» (Санкт-Петербург, 1999, 2000 и 2002); XX международной конференции LINAC-2000 (Монтерей, США, 2000); 11 конференции по радиационной физике и химии конденсированных веществ (Томск, 2002), XVIII конференции RUPAC-2002 (Обнинск, 2002).

Публикации. По материалам диссертационной работы опубликовано 19 печатных работ. Материал диссертации опубликован в 1 статье, 12 докладах конференций, 5 препринтах, 1 патенте РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, содержит 136 страниц машинописного текста, 54 рисунка, 11 таблиц и список литературы, включающий 80 наименований.

Содержание диссертации

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы, научная новизна, положения, выносимые на защиту, и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе предложен и рассмотрен новый ядерно-физический метод обнаружения ВВ. Сравнительный анализ ядерно-физических методов обнаружения взрывчатых веществ показал, что перспективность обнаружения ВВ с использованием ядерно-физических методов обусловлена тем, что большинство ВВ имеют уникальное сочетание высоких концентраций атомов углерода, азота и кислорода. Высокое содержание азота в исследуемом объекте служит сигналом вероятного присутствия ВВ, а высокие концентрации углерода, азота и кислорода практически однозначно указывают на его наличие. Только с использованием ядерно-физических методов возможно обнаружение пластиковых безоболочечных и замаскированных ВВ. Практическую реализацию получил только нейтронно-радиационный анализ по обнаружению высокой концентрации азота, однако опыт эксплуатации показал недопустимо высокий уровень ложных тревог. Наиболее перспективными являются ядерно-физические методы, основанные на применении в качестве зондирующего излучения быстрых нейтронов. Максимальную чувствительность обнаружения ВВ обеспечивает метод PFNA (Pulsed Fast Neutron Analysis).

Анализируя и обобщая опыт, накопленный при разработке и создании средств обнаружения ВВ, и учитывая, что современная спектрометрическая аппаратура позволяет надежно измерять энергетические распределения фотонного излучения в условиях высокого фона, предлагается новый ядерно-физический метод обнаружения ВВ. Суть метода сводится к следующему. Информация о наличии ВВ может быть получена из анализа энергетических спектров гамма-излучения, образуемых в результате ядерных реакций взаимодействия импульсного периодического нейтронного излучения с ядрами характерных элементов, входящих в состав ВВ. При этом, в моменты импульсов нейтронного излучения, измеряется энергетический спектр гамма-излучения из реакций неупругого рассеяния быстрых нейтронов на ядрах азота, кислорода и углерода, а в промежутках – энергетические характеристики гамма-излучения из реакций радиационного захвата нейтронов ядрами азота ($^{14}N(n, \gamma)^{15}N$) и энергетические спектры гамма-излучения распада короткоживущих радионуклидов, образующихся при взаимодействии нейтронов с ядрами кислорода ($^{16}O(n, p)^{16}N(\beta^-, \gamma)$, $T_{1/2} = 7,13$ с) и хлора

(который является примесью при изготовлении новых ВВ, $^{37}\text{Cl}(n, \alpha)^{34}\text{P}(\beta^-, \gamma)$ $T_{1/2} = 12,4$ с и $^{37}\text{Cl}(n, \gamma)^{38\text{m}}\text{Cl}$ $T_{1/2} = 0,71$ с).

Рассмотрены принципы построения системы обнаружения ВВ, учитывая особенности предложенного ядерно-физического метода их обнаружения. В качестве признаков, характеризующих обнаружение ВВ, выбрано отношение концентраций характерных элементов ВВ к суммарной концентрации углерода, азота и кислорода ($C/(C+N+O)$, $N/(C+N+O)$, $O/(C+N+O)$). Показано, что ВВ образуют ограниченную область в пространстве этих признаков, в которую обычные вещества не попадают. Обнаружение ВВ в исследуемом объекте может быть выполнено следующим образом: если вектор, координатами которого являются отношение концентраций $C/(C+N+O)$, $N/(C+N+O)$ и $O/(C+N+O)$, попадает в эту область, то в исследуемом объекте находится ВВ. Рассмотрены алгоритмы распознавания ВВ с использованием разделяющих функций и с использованием функций расстояния.

Дополнительно показано, что с использованием предложенного ядерно-физического метода обнаружения ВВ могут быть обнаружены драгоценные металлы и другие вещества.

Вторая глава посвящена оптимизации временных и энергетических параметров импульсных источников нейтронов для обнаружения ВВ.

Критерии оптимизации временных и энергетических параметров импульсных источников нейтронного излучения обусловлены основными требованиями к анализу, которые предполагают достижение заданных значений точности, предела обнаружения, чувствительности и экспрессности анализа. При выборе разных вариантов обнаружения ВВ следует минимизировать одну из основных величин χ_j (характеризующаяся относительной погрешностью определения контролируемого ВВ) или T_j (общее время анализа характеризующую экспрессность метода обнаружения ВВ). В зависимости от условий решаемой задачи в качестве функционала минимизации выбирается один из вышеуказанных функционалов:

$$\begin{cases} \min\{\chi_j\} \\ T_j \leq T_{j0} \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \min\{T_j\} \\ \chi_j \leq \chi_{j0} \end{cases},$$

где значения χ_j и T_{j0} – фиксированные заданные значения предела обнаружения и времени анализа.

В общем случае целевой функционал задачи оптимизации зависит от потока нейтронов $\hat{O}(E_n, t)$, который связан с двойным дифференциальным распределением вторичных нейтронов из мишени соотношением:

$$\Phi(E_n, t) = I(t) \int_{\Omega_1} \frac{d^2 N}{dE_n d\Omega} d\Omega,$$

где $I(t)$ - ток ускоренных заряженных частиц ускорителя; $d^2 N/dE_n d\Omega$ - число нейтронов, вылетающих из мишени с энергиями от E_n до $E_n + dE_n$ под углом в интервале от Ω до $\Omega + d\Omega$, нормированное на одну ускоренную частицу; Ω_1 - телесный угол под которым виден исследуемый образец относительно центра мишени.

Расчет дифференциальных спектров нейтронов из толстых мишеней различных материалов в широком диапазоне энергий налетающих протонов или дейтронов основан на следующем соотношении:

$$\frac{d^2 N}{dE_n d\Omega_n} = \int_{E_m}^{E_0} \frac{Nd^2\sigma}{dE_n d\Omega_n} \frac{1}{f(E)} j_p(E) dE,$$

где $f(E) = -dE/dz$ - ионизационные потери энергии протонов в мишени, вычисляется по формуле Бете-Блоха; $j_p(E) = \exp(-N\sigma(E)z(E))$ - число нуклонов на глубине z мишени; $\sigma(E)$ - полное сечение реакции; а глубина z связана с энергией тормозящегося внутри мишени протона или дейтрона соотношением $z(E) = \int_E^{E_0} dE/f(E)$; $E_m = E_{out}$, если $E_{nop} > E_{out}$ и $E_m = E_{nop}$, если $E_{nop} < E_{out}$; E_{nop} - энергия порога (p,n) реакции; E_{out} - корень уравнения $z(E) = z_0$.

Для вещества со сложным элементным составом распределение дифференциальных спектров нейтронов вычисляется как:

$$\frac{d^2 N}{dE_n d\Omega_n} = \frac{\sum_{k=1}^{k_0} \sigma_k(E) C_k A_k^{-1} \frac{d^2 N_k}{dE_n d\Omega_n}}{\sum_{k=1}^{k_0} \sigma_k(E) C_k A_k^{-1}},$$

где A_k - массовые числа элементов, входящих в состав мишени; C_k - их весовые доли.

Таким образом, для корректного решения задачи оптимизации необходимо знать двойные дифференциальные распределения вторичных частиц из ядерных реакций. Для этого разработана программа, позволяющая рассчитывать энергетические характеристики вторичного излучения из ядерных реакций под действием протонов, нейтронов и дейтронов. Расчет двойных дифференциальных распределений основан на некоторых модельных представлениях о ядерных реакциях. В области энергий выше 20 МэВ основой расчета является модель внутриядерного каскада с применением аппроксимационных

формул, предложенных в работах Сычева Б. С. и др.¹ При начальных энергиях ниже 20 МэВ аналогичных методов расчета не существовало, поэтому предложена и реализована методика основанная на аппроксимации известных экспериментальных данных по двойным дифференциальным сечениям для разных элементов. В области энергий ниже 10 МэВ механизм рассматриваемых реакций в основном равновесный, статистический, поэтому для описания дифференциальных сечений использованы основные соотношения статистической модели ядерных реакций с включением в алгоритм расчета ряда безмодельных зависимостей и параметров. В области энергий 10-20 МэВ использовался простой вариант экситонной модели предравновесного распада возбужденного ядра, образующегося в начальной стадии реакции. Для расчета сечений под действием нейтронов $(n, n' X)$, (n, pX) разработан метод аппроксимации полных сечений, двойных дифференциальных сечений упругого и неупругого рассеяния нейтронов, реакций (n, γ) , $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ для энергий налетающего нейтрона 0,1-20 МэВ. Аппроксимация экспериментальных данных проводилась на основе библиотеки «БРОНД». Для описания взаимодействия дейтронов с ядрами в программе использовались модельные представления о дейтрон-ядерных реакциях. Предполагалось, что из-за малой энергии связи при полном проникновении дейтрона в ядро, происходит его развал на протон и нейтрон. Далее инициируется каскад под действием протона и нейтрона. В этом случае вполне применимы методы, использованные ранее для протонов и нейтронов, но с учетом энергетики дейтрон-ядерных реакций.

Для определения оптимальных энергетических параметров источника нейтронного излучения исследовано взаимодействие нейтронов с различными энергиями с ВВ (тротил $C_7H_5O_6N_3$). Расчеты спектров гамма-излучений образуемых в результате неупругого рассеяния нейтронов на ядрах N , C и O показали, что наибольший выход для азота имеют гамма-кванты с энергией $E_\gamma = 1,64, 2,31, 5,11, 7,03$ МэВ, для кислорода – $E_\gamma = 2,74, 6,13, 6,92, 7,12$ МэВ, для углерода – $E_\gamma = 4,44, 9,64$ МэВ. Оптимальная энергия импульсного периодического нейтронного источника для обнаружения ВВ, с использованием реакций (n, n') , рассчитана из условия максимальности сечения образования гамма-излучения для указанных линий и составляет 8-12 МэВ. Сечение реакции $^{16}O(n, p)^{16}N$ имеет максимум при энергии нейтронов 12 МэВ. Таким образом получаем, что оптимальной энергией импульсного периодического источника

¹ Сычев Б.С., Серов А.Я., Манько Б.В. Аналитическая аппроксимация дифференциальных сечений образования вторичных частиц в неупругих нуклон-ядерных взаимодействиях при энергиях выше 20 МэВ. М., 1979 (Препринт / РТИ АН СССР N799).

нейтронного излучения для обнаружения ВВ по предложенному методу составляет 10-12 МэВ.

Временные параметры импульсного периодического источника нейтронов получены путем минимизации времени анализа ВВ при заданном пределе обнаружения ВВ 10 г тротила. Моделирование процессов взаимодействия нейтронов с ВВ показало, что оптимальным временным параметрам в случае обнаружения ВВ по гамма-излучению, образуемому в результате неупругого рассеяния нейтронов на ядрах N, O и C, соответствуют: длительность импульса $\tau \sim 1$ мкс (определяется из условия, что детектирующая система должна регистрировать не более одного кванта, так как в противном случае информация об амплитуде будет искажена, вследствие наложения двух или более событий); интервал между импульсами $\sim 3-5$ мкс - это время, необходимое для формирования спектрометрического сигнала при регистрации гамма-излучения сцинтилляционным детектором на основе CsI(Tl) с постоянной высвечивания 1 мкс.

Для достижения максимальной чувствительности нейтронно-активационного анализа по короткоживущим изотопам исследована зависимость числа отсчетов от временных параметров длительности нейтронного импульса и периода повторения импульсов. Показано, что оптимальному режиму нейтронно-активационного анализа по короткоживущим изотопам для целей обнаружения ВВ, соответствует длительность токового импульса ускорителя $t_r \sim 100$ мкс при частоте их следования $\nu \sim 1000$ Гц.

Учитывая тот факт, что оптимальным режимам анализа по неупругому рассеянию быстрых нейтронов и нейтронно-активационного анализа короткоживущих изотопов соответствуют разные временные параметры, предложен пакетно-импульсный режим импульсного источника нейтронного излучения (рис.1).

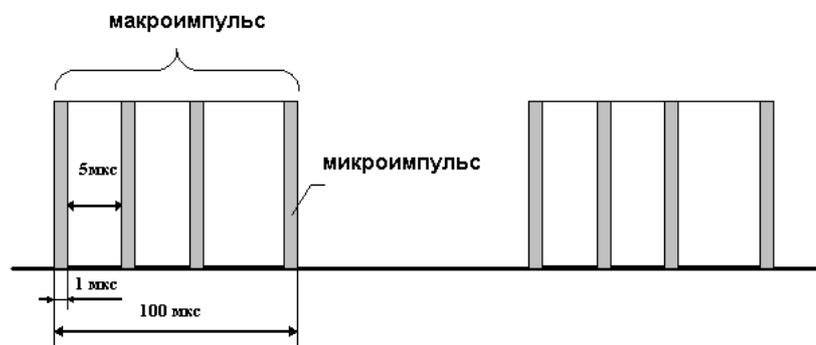


Рис 1. Временная диаграмма работы источника нейтронного излучения для оптимального обнаружения ВВ.

Измерение гамма-излучения образуемого в результате неупругого рассеяния нейтронов на ядрах характерных элементов происходит в моменты микроимпульсов

нейтронного излучения, а гамма-излучения из реакций радиационного захвата нейтронов и распада короткоживущих изотопов происходит в промежутки между макроимпульсами.

В третьей главе рассмотрены вопросы, связанные с обнаружением ДВ. Ранее в работах [2, 3], показана возможность обнаружения ДВ на удаленных объектах по регистрации временного распределения нейтронного излучения, образуемого при взаимодействии нейтронного излучения с исследуемым объектом. Показано, что основной задачей корректного определения наличия ДВ на удаленной мишени является определение выхода нейтронного потока во времени. Первый признак содержания в исследуемом объекте ДВ – увеличение выхода нейтронов за счет вклада мгновенных нейтронов деления, второй – наличие запаздывающих нейтронов.

Рассмотрен предельный случай расстояние мишень - исследуемый объект - детектор - 0,3-1 м. Для расчета временных распределений мгновенного нейтронного излучения используются соотношения времени пролетной методики. По известному энергетическому спектру нейтронов $F(E)$ получаем временное распределение на расстоянии R из соотношения $F(E)|dE| = Y(t)|dt|$, откуда

$$Y(t) = F(E) \left| \frac{dE}{dt} \right| = F \left(\frac{m_n R^2}{2t^2} \right) \frac{m_n R}{t^3}$$

где m_n - масса нейтрона.

Для учета вклада запаздывающих нейтронов деления, в пределах шести группового приближения, временное распределение запаздывающих нейтронов представлено в виде:

$$Y(E, t) = \sum_{j=1}^6 \frac{\beta_j}{\beta} \lambda_j e^{-\lambda_j t} x_j(E),$$

где β_j - выход запаздывающих нейтронов j группы; $\beta = \sum_{j=1}^6 \beta_j$ - суммарный выход запаздывающих нейтронов; λ_j - константа радиоактивного распада j группы; $x_j(E)$ - энергетический спектр j группы запаздывающих нейтронов.

Временное распределение потока нейтронов в камере взаимодействия равно: $n(t) = n_0 \exp(-t/\tau)$, где n_0 - начальная интенсивность потока нейтронов; $\tau \approx R/(a \cdot v)$ -

² Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Идентификация делящихся веществ с использованием ускоренного пучка дейтронов на удаленных объектах. // Труды XV совещания по ускорителям заряженных частиц, ИФВЭ Протвино, 22-24 октября 1996, т.2, с. 407-410.

³ Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Просвиркин А.Г., Фиалковский А.М. К вопросу дистанционного определения делящихся веществ с использованием линейного ускорителя ионов водорода. // Препринт П-0946. М.: ЦНИИАтоминформ, 1996.

постоянная спада нейтронного потока, R , a - наименьший линейный размер и альbedo стенок камеры взаимодействия, v - скорость тепловых нейтронов (2200 м/с).

Результаты расчета временных спектров нейтронного излучения представлены на рис. 2.

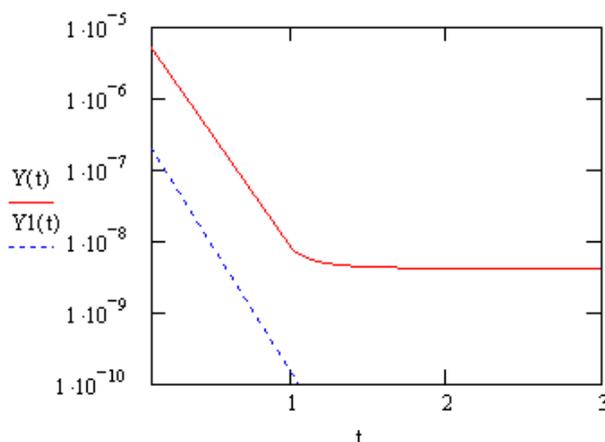


Рис. 2. Временные спектры нейтронов. Энергия протонов 15 МэВ, мишень Ве, сплошная линия – тестовый объект, содержащий ДВ, пунктирная линия – без ДВ, расчет проведен с учетом вклада запаздывающих нейтронов и замедления нейтронного потока в камере взаимодействия размером $1 \times 1 \times 1$ м (расчет на один протон, падающий на мишень) t в мс.

Анализ проведенных расчетов показал, что идентификация ДВ, возможна по временным спектрам нейтронного излучения.

Показана возможность обнаружения ДВ в составе комплекса обнаружения ВВ с источником нейтронного излучения, оптимизированным для целей обнаружения ВВ.

В четвертой главе представлены экспериментальная проверка основных положений ядерно-физического метода обнаружения ВВ и ДВ. В связи с невозможностью проведения полномасштабного эксперимента проведен ряд модельных измерений, которые позволили подтвердить правильность основных положений рассматриваемого метода. С этой целью проведены соответствующие измерения с пучком нейтронов, полученных при бомбардировке бериллиевой мишени дейтронами. Источником дейтронов с энергией 10 МэВ служил циклотрон, работающий в квазинепрерывном режиме. Для уменьшения фонового излучения мишень находилась в защитном канале из 10 см свинца и 16 см борированного полиэтилена. На оси пучка на расстоянии 1,5 м от бериллиевой мишени размещался исследуемый образец. Под образцом, на расстоянии 1 м от него, находился окруженный защитой детектор. В качестве детектора гамма излучения, генерируемого в исследуемом образце, использовался сцинтилляционный детектор CsI. В качестве эталонов, генерирующих гамма излучение различных элементов (С, О, Н) использовались образцы из графита и оргстекла. На рис. 3 представлены энергетические спектры гамма-

излучения, полученные вычитанием фонового спектра из спектров, генерируемых при облучении образцов.

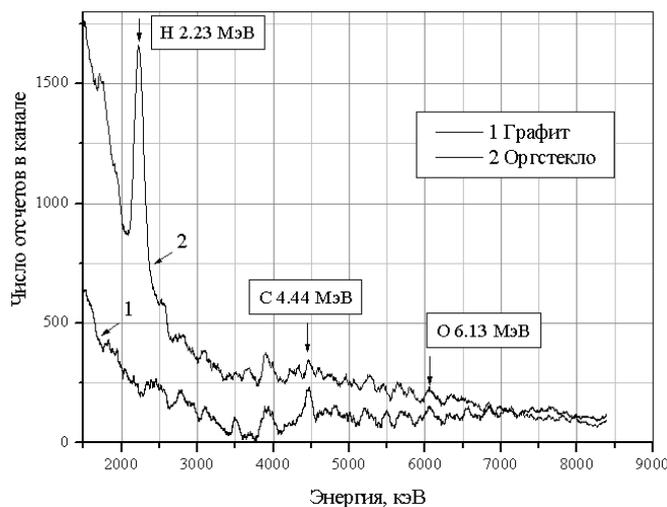


Рис. 3. Энергетические спектры гамма излучения, полученные вычитанием фонового спектра из спектров, генерируемых при облучении графита-1 и оргстекла-2 нейтронами.

Анализ приведенных на рис. 3. результатов показывает, что даже в случае неоптимизированного нейтронного источника можно идентифицировать линии излучения, обусловленные элементами, входящими в состав исследованных образцов. В реальных условиях снижение фона гамма излучения произойдет за счет использования импульсного режима работы ускорителя и применения метода синхронного детектора. Данный метод предусматривает поканальное сложение идентичных энергетических спектров, измеренных за несколько промежутков времени (в идентичные временные интервалы). Используя эту методику можно добиться условия, при котором полезный сигнал при поканальном суммировании увеличивается в n раз (n - число циклов), а фон возрастает как корень из n . Это позволяет надежно определять достаточно малые измеряемые величины даже в условиях высокого фона. Измерения гамма-излучения распада короткоживущего изотопа ^{16}N образуемого при взаимодействии нейтронов с ядрами кислорода $^{16}O(n, p)^{16}N$ показали, что обнаружение кислорода входящего в состав ВВ возможно путем регистрации гамма-излучения $E_\gamma = 6,13$ МэВ из реакции $^{16}N(\beta^-, \gamma)$.

Подобная же серия измерений была выполнена и для обнаружения ДВ на линейном ускорителе протонов при энергии 6 и 12 МэВ. В качестве делящегося вещества использовались малогабаритные ТВЭЛы. Аналогично были выполнены фоновые измерения, а затем измерены временные спектры нейтронов в присутствии делящегося вещества. Режим работы ускорителя был следующий: энергия 6 и 12 МэВ, длительность

токового импульса 150 мкс, ток 1 мА. Ускоренные протоны принимались медной мишенью полного поглощения, размещенной на дне цилиндра Фарадея, используемого для мониторинга пучка. ДВ расположено на расстоянии 11 м от мишени, детектирующая система (кассета гелиевых счетчиков) - 6 м от облучаемого образца. Примеры измерения временных спектров нейтронного излучения, при энергии ускоренных протонов 6 МэВ представлены на рис. 4.

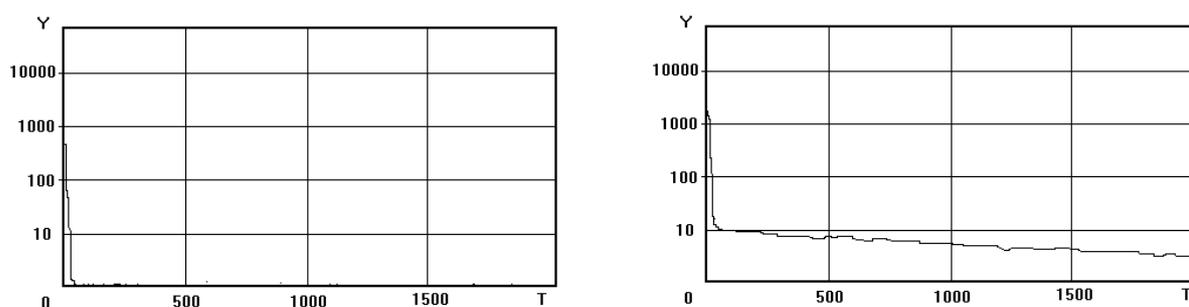


Рис. 4. Временные спектры нейтронного излучения, измеренные на линейном протонном ускорителе при энергии ускоренных протонов 6 МэВ без ДВ (левый рисунок) и с ДВ (правый рисунок). Цена деления канала 0.50 мс.

Анализируя экспериментальные данные можно сделать следующие выводы: 1 – при облучении ВВ быстрыми нейтронами образуется спектр гамма-излучения имеющий характерные особенности (характерные гамма-линии) по которым можно сделать вывод о наличии в исследуемом объекте ВВ; 2 – при облучении ДВ существенно растет интенсивность нейтронного потока (за счет мгновенных нейтронов деления) и появляется вклад запаздывающих нейтронов. Эти выводы подтверждают справедливость теоретических предпосылок о возможности обнаружения ВВ и ДВ с использованием ядрено-физического метода предложенного в главе 1.

В пятой главе описана физическая модель комплекса обнаружения ДВ и ВВ с использованием импульсного периодического источника нейтронного излучения на базе разработанного в НПК ЛУЦ ФГУП НИИЭФА им. Д. В. Ефремова высокочастотного линейного ускорителя ионов водорода. В состав комплекса входят: линейный ускоритель дейтронов, мишенный узел, детектирующая система и камера взаимодействия (рис. 5).

Нейтронное излучение образуется в результате взаимодействия ускоренных дейтронов с бериллиевой мишенью. Временные и энергетические параметры ускорителя выбраны в соответствии с результатами оптимизации импульсного периодического источника нейтронного излучения (см. глава. 2).

Разработана и испытана спектрометрическая система обнаружения ВВ, которая состоит из 32 сцинтилляционных блоков детектирования (CsI(Tl) размером 63x100 мм), 32 каналов независимых аналого-цифровых преобразователей (АЦП), выполненных в

стандарте «КАМАК», персонального компьютера и связанного с ним параллельным интерфейсом крейта «КАМАК», а также программно-управляемого 40-канального источника питания фотоэлектронных умножителей. Задание режимов работы электронных устройств, сбор, накопление и первичная обработка информации обеспечивается разработанной программой. Система детектирования нейтронного излучения ДВ состоит из двух детекторов большой эффективности на основе «быстрой» пластмассы.

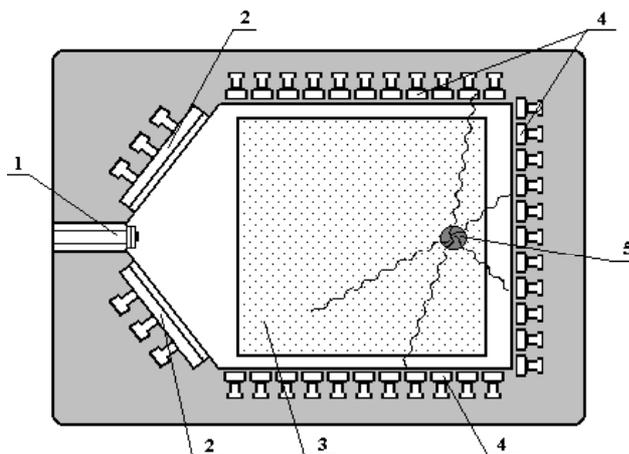


Рис. 5. Общий вид системы детектирования: 1 - мишенное устройство; 2- система детектирования для идентификации ДВ; 3- исследуемый объект; 4 - система детектирования для идентификации ВВ; 5- место локализации ВВ или ДВ.

Камера взаимодействия предназначена для уменьшения фона и, как следствие, загрузки спектрометрического тракта и представляет собой куб со стенками из борированного полиэтилена и свинцовыми пластинами. Толщины стенок камеры взаимодействия и блоков детектирования найдены путем расчетов на основе моделирования процессов взаимодействия нейтронов с веществом методом Монте-Карло.

Разработана программа обработки гамма-спектров.

В заключении обсуждаются основные результаты диссертации.

Основные результаты работы

1. Разработан ядерно-физический метод обнаружения ВВ, основанный на регистрации характеристического гамма излучения из реакций неупругого рассеяния нейтронов, захвата нейтронов, распада короткоживущих радиоизотопов, образованных при взаимодействии нейтронов с характерными элементами ВВ, позволяющий повысить вероятность и достоверность обнаружения ВВ по сравнению с существующими.

2. Разработаны теоретические методы и вычислительные программы для расчетов ядерно-физических процессов взаимодействия протонов, нейтронов и дейтронов с веществом в энергетическом диапазоне от 0,1 до 100 МэВ. Использование различных модельных представлений о ядерных реакциях, а также современных библиотек оцененных ядерных данных позволило создать вычислительную программу для расчета основных характеристик вторичного излучения из ядерных реакций под действием протонов, нейтронов и дейтронов с достаточно высокой точностью (10-15%) и сравнительно небольшим временем счета.
3. Разработаны вычислительные программы оптимизации временных и энергетических параметров импульсного периодического нейтронного источника для реализации методики определения взрывчатых веществ. Показано, что для получения максимальной достоверности обнаружения ВВ импульсный источник нейтронного излучения должен обладать следующими характеристиками: энергия нейтронного излучения 10-12 МэВ, длительность макроимпульса - 100 мкс, частота их повторения ~ 1000 Гц, длительность микроимпульсов в течении макроимпульса ~ 1 мкс, интервал между микроимпульсами – 3-5 мкс.
4. Показана возможность совмещения в одном комплексе ядерно-физических методов обнаружения ДВ и ВВ с использованием в качестве зондирующего излучения оптимизированный по энергии и временным параметрам источник импульсного нейтронного излучения обнаружения ВВ.
5. Предложена физическая модель комплекса обнаружения взрывчатых и делящихся веществ на базе линейного ускорителя ионов водорода. Разработана и изготовлена ядерно-физическая аппаратура для регистрации энергетических и временных характеристик нейтронного и гамма-излучений, включающая в себя систему регистрации, систему сбора и обработки спектрометрической информации.
6. Проведена экспериментальная апробация предложенного метода определения ВВ и ДВ с использованием разработанной аппаратуры. Доказана принципиальная возможность реализации предложенных методик для целей обнаружения ВВ и ДВ на базе импульсного периодического источника нейтронного излучения.

Основное содержание работы изложено в публикациях:

1. Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Способ обнаружения делящихся и взрывчатых веществ. Патент № 2150105, приоритет от 26.05.1999.

2. Fialkovsky A.M., Gavrisch Yu.N., Prosvirkin A.G., Sidorov A.V., Svistunov Yu.A. New Code for Description of Nucleon and Electron Interactions with Material. // Proc. of the First International Workshop Beam Dynamics and Optimization, July 4-8. St.-Petersburg, 1994.
3. Fialkovsky A.M., Gavrisch Yu.N., Sidorov A.V., Svistunov Yu.A., Prosvirkin A.G. Modernization of calculation program SONIC of secondary ionizing radiation characteristics for middle energies. // Proc. of the Third International Workshop Beam Dynamics and Optimization, July 1-5. St.-Petersburg, 1996.
4. Гавриш Ю.Н., Огородников С.А., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Программа расчета характеристик вторичного излучения ядерных реакций под действием заряженных частиц средних энергий. // Препринт П-0955. М.: ЦНИИАтоминформ, 1997.
5. Гавриш Ю. Н., Огородников С. А., Сидоров А. В., Фиалковский А. М. Метод расчета полного и дифференциальных сечений (p,n) реакций для ядер легких и средних элементов вблизи порога. // Препринт П-0953. М.: ЦНИИАтоминформ, 1997.
6. Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Пучковые технологии в задачах обнаружения взрывчатых веществ. // Труды XVII совещания по ускорителям заряженных частиц. ИФВЭ Протвино, 17-20 октября 2000, т.2, с.361.
7. Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Обнаружение взрывчатых веществ с использованием импульсного источника нейтронов. // Вопросы Атомной науки и техники сер. Электрофизическая аппаратура. 2002, вып. 1 (27),с.35.
8. Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Просвиркин А.Г., Фиалковский А.М. Нейтронно-активационный анализ по короткоживущим радионуклидам на базе линейного ионного ускорителя. // Препринт П-0936. М.: ЦНИИАтоминформ, 1995.
9. Fialkovsky A.M., Gavrisch Yu.N., Sidorov A.V. Parametric optimization of hydrogen ion accelerator for detection of explosive substances. // Proc. of the Sixth International Workshop Beam Dynamics and Optimization, September 6-10, 1999, Saratov, Russia, p.171.
10. Гавриш Ю.Н., Гребенщиков В.В., Козловский С.С., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Экспериментальные исследования системы регистрации гамма-излучения комплекса обнаружения взрывчатых веществ. // Труды X Международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине. Санкт-Петербург, 1-4 октября 2001, - М.: ЦНИИАтоминформ, 2001, с.170.
11. Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Обнаружение взрывчатых веществ с использованием импульсного источника нейтронов. // Труды V Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты безопасности». Санкт-Петербург, 2.04 - 5.04.2002, с.550.

12. Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Идентификация делящихся веществ с использованием ускоренного пучка дейтронов на удаленных объектах. // Труды XV совещания по ускорителям заряженных частиц, ИФВЭ Протвино, 22-24 октября 1996, т.2, с. 407.
13. Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Просвиркин А.Г., Фиалковский А.М. К вопросу дистанционного определения делящихся веществ с использованием линейного ускорителя ионов водорода. // Препринт П-0946. М.: ЦНИИАтоминформ, 1996.
14. Гавриш Ю.Н., Грачев Б.Д., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Экспериментальная отработка метода определения делящихся веществ с использованием ускоренного пучка заряженных частиц. // Препринт П-0954. М.: ЦНИИАтоминформ, 1997.
15. Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Измерение временных спектров вторичного ионизирующего излучения импульсных ускорителей ионов и электронов с энергией 3-30 МэВ. // Труды XV совещания по ускорителям заряженных частиц, ИФВЭ Протвино, 22-24 октября 1996, т.2, с. 283.
16. Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Комплекс обнаружения взрывчатых и делящихся веществ. // Сборник трудов III всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности», Санкт-Петербург 4.04-6.04.2000, т.2, с.7.
17. Ворогушин М.Ф., Гавриш Ю.Н., Сидоров А.В., Фиалковский А.М. Комплекс обнаружения взрывчатых и делящихся веществ на базе высокочастотного малогабаритного линейного ускорителя ионов водорода. // Труды XVII совещания по ускорителям заряженных частиц. ИФВЭ Протвино, 17-20 октября 2000, т.2, с.308-312.
18. Fialkovsky A.M., Gavrisch Yu.N., Sidorov A.V., Svistunov Yu.A., Vorogushin M.F. NPK LUTS project of contraband detection system. // Proc. of the XX International Linac Conference, Monterey USA, August 21-25, 2000, vol. I, p.633.
19. Fialkovsky A.M., Gavrisch Yu.N., Sidorov A.V., Vorogushin M.F. Complex for Detection of Explosive and Fissionable Substances Based on RFQ Linear Accelerator of Hydrogen Ions. // Proc. 11th International Conference on Radiation Physics and Chemistry of Condensed Matter, Tomsk, Russia, 24-29 September 2000, p.83.