Детектор для досмотра заминированных автомобилей

Быстрицкий В.М., Замятин Н.И., Зубарев Е.В., Красноперов А.В., Рапацкий В.Л.,

Рогов Ю.Н., <u>Садовский А.Б.</u>, Саламатин А.В., Сапожников М.Г., Слепнев В.М. Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Болдырев В.И., Сапожников А.И., Силантьев С.В., Чернов А.И. Институт криминалистики ФСБ РФ

Приведены конструкция и характеристики детектора для досмотра заминированных автомобилей, основанного на использовании метода меченых нейтронов. Источником меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ, образующихся в реакции $d+t \rightarrow \alpha + n$, является портативный нейтронный генератор ИНГ-27, производства ВНИИА, со встроенным 64-пиксельным кремниевым α- детектором, разработанным в ОИЯИ. Созданный детектор обеспечивает идентификацию взрывчатых веществ, скрытых в автомобиле, и предназначен для работы в полевых условиях. Результаты испытаний в плане идентификации свидетельствуют о высокой эффективности детектора скрытых взрывчатых веществ при достаточно низкой вероятности ложных срабатываний. Время идентификации скрытых веществ в зависимости от их массы и толщины слоя экранирующего материала составляет 2-15 мин при интенсивности нейтронного потока 5.10⁷ н/с.

1. Введение.

В Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия) по заказу ФСБ РФ разработан и создан мобильный вариант досмотрового комплекса для обнаружения взрывчатых веществ (ВВ), скрытых в автомобилях. Комплекс предназначен для обнаружения закладок ВВ в легковых автомобилях и зарядов ВВ в автомобилях-бомбах. Обнаружение ВВ основано на анализе спектров характеристического ядерного гамма-излучения, возникающего при облучении исследуемого объекта потоком быстрых меченых нейтронов.

Комплекс Дейтерий позволяет дистанционным образом обнаружить скрытые BB, а также определять положение опасных объектов в пространстве путем использования метода меченых нейтронов (ММН). Принципиальная схема метода показана на Рис.1.



Рис.1 Метод меченых нейтронов.

В качестве источника нейтронов с энергией 14,1 МэВ используется портативный нейтронный генератор ИНГ-27 с расположенным внутри него 64секционным стриповым кремниевым α-детектором.

В нейтронном генераторе пучок ионов дейтерия ускоряется до энергий порядка 100 кэВ и фокусируется на тритиевую мишень. В результате реакции $d + t \rightarrow \alpha + n$ образуются нейтроны с энергией 14 МэВ и α -частицы с энергией 3,5 МэВ, которые в системе центра масс разлетаются в противоположные стороны. Детектирование α -частиц позволяет метить нейтрон и фиксировать направление его движения.

Меченый нейтрон взаимодействует с веществом изучаемого объекта, в результате неупругого процесса $A(n,n'\gamma)A^*$ образуются γ -кванты с определённой энергией, характерной для каждого химического элемента. Регистрация и анализ спектра γ -квантов позволяет определить элементный состав изучаемого объекта. Измеряя распределение временных интервалов между сигналами с α - и γ -детекторов, можно извлечь информацию о координате взаимодействия нейтрона с ядрами вещества вдоль его траектории и восстановить трехмерное изображение объекта. Отбор событий по временному критерию (α - γ)-совпадений значительно подавляет фон более, чем в 200 раз, обусловленный рассеянными нейтронами, γ квантами и наведённой активностью.

Использование 64-х секционного α-детектора, расположенного внутри нейтронного генератора, позволяет одновременно получать шестьдесят четыре независимых меченых пучка нейтронов, облучающих исследуемый объект.

Совместный анализ энергетических распределений гамма – квантов характеристического ядерного излучения и распределений временных интервалов между сигналами с альфа и гамма – детекторов позволяет не только обнаружить но и идентифицировать тип ВВ в каждой из 64 областей (вокселей) облучаемого объекта, соответствующих 64 сформированным пучкам меченых нейтронов. Обнаружение и идентификация ВВ основаны на использовании метода нейронных сетей и метода соотношений интенсивностей между пиками характеристического ядерного излучения углерода, азота и кислорода.

Более подробно описание метода меченых нейтронов изложено в работах [1-8].

2 Комплекс Дейтерий

Комплекс Дейтерий включает в себя досмотровый модуль и модуль контроля. Досмотровый модуль состоит из следующих элементов:

- 1. Нейтронного генератора ИНГ 27 со встроенным 64 элементным альфа детектором.
- 2. Шести гамма детекторов на основе кристаллов BGO (диаметр 76 мм, толщина 65 мм).
- 3. Электроники сбора и анализа данных.
- 4. Блоков электропитания НГ, альфа- и гамма детекторов.
- 5. Корпуса досмотрового комплекса

Модуль контроля включает в себя:

- 1. Персональный компьютер.
- 2. Интерфейс на базе персонального компьютера с блоком программ обработки данных.
- На рис. 2 приведены внешний вид модуля досмотра комплекса Дейтерий.



Рис 2. Внешний вид модуля досмотра комплекса Дейтерий.

Связь модуля досмотра с модулем контроля осуществляется с помощью кабелей питания 220 В, компьютерной сети и контроля. Комплекс обеспечивает возможность его дистанционного применения с помощью штатного мобильного робота на удалении от поста оператора до 150 м.

3. Нейтронный генератор.

Портативный нейтронный генератор ИНГ-27 (см. Рис. 3) со встроенным 64элементным кремниевым α-детектором разработан во Всероссийском научноисследовательском институте автоматики (ВНИИА, г. Москва).



Рис. 3 - Портативный нейтронный генератор ИНГ-27.

Нейтронный генератор является ускорителем дейтронов, которые образуют быстрые нейтроны 14.1 МэВ в реакции d+t→ α +n. Важной особенностью портативных нейтронных генераторов (НГ) является их полная герметичность по тритию. Это очень существенно для удобства эксплуатации и обеспечения радиационной безопасности. Пользователь получает полностью отпаянную ускорительную трубку со встроенным в нее альфа-детектором. Ему необходимо только запитать ее от обычного источника напряжения. Габаритные размеры ускорительной трубки - 132x204x263.5 мм³, а вес – 8 кг. Габаритные размеры блока питания – 351x276.5x98.5 мм³. Вес блока питания – 4 кг.

Корпус нейтронного генератора изготовлен из нержавеющей стали в виде цилиндра длиной ~230 мм и диаметром 72 мм. Толщина стенок корпуса 1 мм. Тритиевая мишень представляет собой слой из гидридообразующего материала, нанесенного на металлическую подложку. Мишень располагается в центре торцевой части нейтронной трубки под углом 45^0 по отношению к пучку ускоренных ионов, а под углом 90^0 к нему располагается матрица α -детектора.

Нейтронный генератор ИНГ-27, используемый в комплексе Дейтерий, имеет следующие характеристики:

- максимальный поток нейтронов 1.10^8 c^{-1}
- энергия нейтронов 14.1 МэВ
- режим работы непрерывный
- рабочий диапазон температур 10÷45° С
- предельная потребляемая мощность 70 Вт
- габаритные размеры блока питания 351x276.5x98.5 мм
- ресурс работы
 - излучателя нейтронов 800 ч
 - блока питания и управления 5000 ч.
- время подготовки к работе не более 10 мин.

4. Альфа детектор

Кремниевый полупроводниковый детектор предназначен для регистрации альфа-частиц с типичной энергией 3.5 МэВ, возникающих в реакции $d+t \rightarrow \alpha+n$. Преимущество полупроводниковых детекторов заключается в их принципе работы – прямом преобразование потери энергии альфа-частицы в детекторе в электрический импульс на выходе (амплитуда сигнала на выходе детектора пропорциональна потере энергии альфа-частицы в детекторе). Высокая подвижность носителей заряда и малая величина энергии (2÷4 эВ), затрачиваемой на образование одной электронно-дырочной пары, для таких материалов, как Ge, GaAs, CdTe, Si, делают эти материалы основными для создания детекторов с высоким энергетическим разрешением. Для детектирования альфа - излучения самым распространенным и удобным полупроводниковым материалом является кремний. Основными преимуществами кремния являются следующие:

- способность работы при комнатной температуре (Ge-детекторы работают только при охлаждении);

- высокая механическая прочность по сравнению с GaAs, CdTe;

- высокое качество современных монокристаллов кремния (однородность, большое время жизни носителей заряда);

– высокоомный кремний (FZ-float zone Si) стал коммерчески доступен, современные цены не более 2000 \$/кг;

– диаметр пластин современных фирм-производителей (Wacker, Topsil, Siltronix) от 100 до 150 мм, что позволяет изготавливать детекторы большой площади;

– современный уровень детекторной планарной технологии на кремнии позволяет разрабатывать и изготавливать детекторы с тонким входным окном, что обеспечивает высокое энергетическое разрешение (лучше 1% для альфа частиц с энергией 5.5 МэВ);

– высокое временное разрешение 0.5 нс; радиационная стойкость современных планарных кремниевых детекторов позволяет применять их без охлаждения до флюенса быстрых нейтронов и альфа-частиц 10^{13} н/см² и 10^{12} α/см², соответственно.

Внешний вид альфа-детектора на 64 канала производства Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна) показан на Рис. 4.



Рис. 4. - Внешний вид альфа-детектора на 64 канала.

Конструктивно альфа-детектор представляет собой матрицу из 64 элементов, которая образуется пересечением двух плоскостей по 8 стрипов на каждой. Размер общей чувствительной области детектора определяется как произведение размера элемента на число стрипов и равняется 4×8=32 мм. Общая чувствительная площадь 64 элементного детектора равна (32×32) мм². Сигналы с 64-х элементов детектора

выводятся с помощью 16-ти контактов на фланец рубки НГ. Блок усилителей с помощью 16-ти контактного входного разъёма соединяется с выводами на фланце НГ и фиксируется на рубке НГ с помощью кольца.

5. Детектор ү-квантов.

Регистрация характеристического γ-излучения, образующегося в результате реакции неупругого рассеяния (A(n,n'γ)A), осуществляется с помощью шести сцинтилляционных детекторов производства Объединенного института ядерных исследований (г.Дубна) на основе кристаллов BGO.

Детекторы ү-квантов должны обладают следующими свойствами:

1. Хорошим энергетическим разрешением в диапазоне энергий γ -квантов 1-12 МэВ (8-2.5)%, что крайне важно для корректного определения интенсивностей линий характеристического γ -излучения ¹²C, ¹⁴N и ¹⁶O;

2. Высокой эффективностью регистрации у-квантов в указанном энергетическом диапазоне, что позволяет осуществлять набор требуемой статистики для идентификации скрытых веществ за достаточно малые времена (~5-10 мин);

3. Низкой чувствительностью по отношению к регистрации фонового нейтронного излучения.

Временное разрешение системы регистрации характеристического γ-излучения в совпадениях с сигналами от α-детекторов составляет 2.9 нс, что удовлетворяет требованиям, предъявляемым к данной установке.

Гамма-детектор состоит из 8-динодного фотоумножителя Hamamatsu R6233 с диаметром фотокатода 76 мм и кристалла BGO (диаметр 76 мм, толщина 70 мм). Время высвечивания BGO составляет 300 нс, плотность – 7.13 г/см³, а коэффициент преломления света – 2.15.

Климатические испытания проводились с использованием климатической камеры КТК3000. Блок досмотра комплекса Дейтерий помещался внутрь климатической камеры. Сигналы с выхода блока регистрирующей электроники и блока управления нейтронным генератором поступали на персональный компьютер, находящийся на рабочем месте оператора.

Основные результаты, полученные в ходе испытаний:

при вариации температуры в интервале от -20 С до +50С энергетическое разрешение гамма – детектора на линии углерода ($E\gamma = 4.43$ МэВ) и временное разрешение (альфа – гамма) – совпадений не изменялись и составляли в среднем 4.7% и 2.9 нс, соответственно.

6. Регистрирующая электроника.

Конструктивно регистрирующая электроника выполнена в виде одной платы размером стандартной PCI карты, с возможностью установки её в PCI-слот персонального компьютера (ПК) и работать под его управлением, используя для обмена информацией PCI-шину. С помощью ПК производится первичная обработка информации, считанной с альфа- и гамма-детекторов, формирование файлов данных для передачи их с помощью ETHERNET в ПК с целью окончательной обработки и представления результатов.

В основу системы регистрации сигналов с альфа- и гамма-детекторов положен принцип оцифровки формы импульсов с последующим вычислением их временных и амплитудных характеристик. Пакет программ, поддерживающих работу

регистрирующей электроники, включает в себя драйверы для PCI-интерфейса, программу селекции событий и их обработку, программу формирования файла данных, а также программы, необходимые для настройки режимов блока электроники. Для обеспечения требуемой скорости передачи данных по PCI-шине интерфейс работает в режиме канала прямого доступа к памяти. Это основное требование к драйверу, поддерживающему работу данного устройства. По заполнении выделенного буфера данных происходит переключение канала прямого доступа на свободную область памяти, а заполненная часть обрабатывается программой селекции и обработки. Процессы записи и обработки идут параллельно.

Всё программное обеспечение, поддерживающее работу блока электроники, работает под управлением операционной системы LINUX.

7. Интерфейс оператора на базе персонального компьютера с блоком программ обработки данных.

Блок программ приема и обработки данных, а также визуализации результатов анализа временных и энергетических распределений, полученных с помощью альфа- и гамма-детекторов, предназначен для отображения результатов анализа в удобной для пользователя форме. Программное обеспечение работает под управлением операционной системы LINUX и выполняет следующие функции:

- проведение полного цикла измерения. Цикл измерения включает в себя: запуск генератора нейтронов, накопление и анализ данных, принятие решений в автоматическом режиме, визуализацию результатов анализа и принятых решений, выключение генератора нейтронов, протоколирование результатов измерения и архивирование данных, набранных за время измерения;
- диагностику исправности блоков и систем, входящих в комплекс;
- архивирование выполненных измерений.

Программное обеспечение выполнено в виде прикладной программы и набора служебных файлов для хранения настроек и протоколов. Программный код написан на языке C++, с использованием пакета ROOT, созданного на основе ROOT набора классов для работы с нейронными сетями. В качестве базы данных для хранения протоколов используется пакет MySQL, интерфейс к которому встроен в ROOT. Взаимодействие с генератором нейтронов производится по интерфейсу RS 232.

8. Блоки электропитания НГ-27, альфа- и гамма- детекторов

Питание альфа- и гамма –детекторов установлено в общем крейте, конструктив которого выполнен в стандарте «Евромеханика-С19"». В крейте устанавливается 6 блоков питания сцинтилляционных детекторов БВН 2.5*2.5 и общий блок питания 16ти элементных кремниевых детекторов БВН-0.5*0.1. Указанные блоки разработаны и созданы в ОИЯИ. Для обеспечения стабильной работы детекторов в широком диапазоне изменения их загрузки и климатических условий в этот же крейт устанавливаются высокостабильные генераторы реперных сигналов и блок управления выходным напряжением источников питания детекторов. Корректирующие сигналы подаются на разъемы управления блоков. Для задания алгоритма стабилизации, протоколирования режимов работы и связи с основным пультом оператора предусмотрена установка в крейт встраиваемой процессорной платы ICOP6070LV.

9. Пространственное распределение пучков нейтронов

Измерение пространственного распределения нейтронов в 64- х меченых пучках нейтронов производилось с помощью специально разработанного и созданного для этих целей прибора - профилометра. На расстоянии 300 мм от центра тритиевой мишени ширины пиков, соответствующих стрипам X и Y, на полувысоте в направлениях осей X и Y составляют 14.6±0.9 и 14.8±1.1 мм, соответственно.

Отметим, что измеренные пространственные распределения нейтронов совпадают по форме с расчетными распределениями для точечного пучка дейтронов.

При интенсивности нейтронного потока (I = $4.5 \cdot 10^7$ н/с) скорость счета событий, зарегистрированных одним X или Y – стрипом α - детектора, усредненная по всем X и Y – стрипам составляет ~ $6.5 \cdot 10^4$ c⁻¹.

рис. 5a приведено распределение пучков Ha меченых нейтронов, зарегистрированных горизонтальными стрипами профилометра при наличии совпадений сигналов с альфа – детектора со стрипа УЗ поочередно с сигналами ХО-Х7(счет стрипов с 0). Как и следовало ожидать, для данной комбинации сигналов с альфа – детектора центры тяжести пиков должны совпадать между собой, так как данная выборка меченых пучков соответствует одному и тому же стрипу ҮЗ альфа – детектора.

Ha 5b приведено распределение пучков меченых нейтронов, рис. зарегистрированных вертикальными стрипами профилометра при наличии совпадений сигналов с альфа – детектора со стрипа Х5 поочередно с сигналами У1-У6 (счет стрипов с 0). Для данной комбинации сигналов совпадений с альфа – детектора центры тяжести пиков должны быть разнесены между собой по вертикали на расстояние определяемое шириной стрипа Х5(4мм) и соотношением расстояний от тритиевой мишени до альфа-детектора и до облучаемого объекта. Результаты измерений совпадают с результатами расчетов.

На рис 5с приведено двумерное распределение нейтронов соответствующее 64 пучкам меченых нейтронов.





c)

Рис.5 а) Распределение 8 меченых пучков нейтронов по вертикальной оси профилометра, соответствующих совпадениям сигналов с альфа – детектора со стрипа Y3 поочередно с сигналами с X0 – X7; b) Распределение пучков меченых нейтронов, зарегистрированных вертикальными стрипами профилометра при наличии совпадений сигналов с альфа – детектора со стрипа X5 поочередно с сигналами Y1-Y6(счет стрипов с 0); с) Двумерное распределение нейтронов в плоскости XY, перпендикулярной направлению нейтронного потока, соответствующее 64 пучкам меченых нейтронов.

10. Тестирование комплекса Дейтерий

С целью определения вероятности обнаружения ВВ в различных местах легкового автомобиля а также вероятности ложных срабатываний системы идентификации ВВ нами выполнена серия тестов с различного типа ВВ и различного типа экранирующими веществами.

Закладки ВВ производились в багажнике и на заднем сидении автомобиля «Land Cruiser». Облучение проводилось через багажник и боковую дверь автомобиля, соответственно. Интенсивность НГ составляла 4.7 10^7 с⁻¹. Было выполнено 20 тестов с закладками из гексогена и тринитротолуола различной массы в разных местах

автомобиля: в багажнике и на заднем сидении. Кроме этого, с целью определения вероятности ложных срабатываний системы идентификации "подозрительных" объектов проводились тесты с использованием распространенных неопасных веществ: текстиль, бумага, вода, железо и др.

Масса ВВ варьировалась в диапазоне от 200 г до 3.2 кг, а расстояние от НГ до багажника, либо до образца на заднем сидении автомобиля от 10 до 50 см. При этом время идентификации изменялось от 2 до 10 минут, соответственно. Было выполнено 20 тестов и во всех тестах было обнаружено ВВ в багажнике и на заднем сидении автомобиля.

В качестве имитатора ВВ использовался меламин $C_3H_6N_6$. Облучение проводилось через металлическую преграду, полностью перекрывающую источник нейтронов и гамма-детекторы. Интенсивность НГ составляла 4.5 10^7 с⁻¹. Расстояние от НГ до образца меламина составляло 300 мм. Расстояние от НГ до металлической преграды составляло 100 мм. Толщины металлической преграды, массы имитатора ВВ и время обнаружения приведены в Таблице 1.

Номер	Масса ВВ, кг	Толщина	Время
испытания		стали, мм	обнаружения,
			МИН
1	3	6	5.3
2	3	12	5.7
3	3	20	5.5
4	1	20	6.3
5	0.2	6	8.5
6	0.2	12	20.0

Таблица 1

Заключение

В Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) по заказу ФСБ РФ разработан и создан мобильный досмотровый комплекс Дейтерий, предназначенный для обнаружения и идентификации скрытых взрывчатых веществ в заминированных автомобилях. Комплекс обеспечивает возможность его дистанционного применения с помощью штатного мобильного робота на удалении от поста оператора до 150 м.

Минимальная, обнаруживаемая масса ВВ за металлическими преградами толщиной до 20 мм составляет 0,2 кг.

Рабочий интервал температур комплекса Дейтерий от -20 С до +50 С при относительной влажности 80%.

Авторы выражают благодарность: сотруднику ЛФВЭ ОИЯИ А.П. Дергунову за большую практическую помощь в создании комплекса Дейтерий; П.П.Реунову за организацию цикла климатических тестовых испытаний комплекса Дейтерий; сотрудникам ФГУП ВНИИА им. Н.Л.Духова Е.П. Боголюбову, Ю.К. Преснякову, В.И. Рыжкову, Т.О.Хасаеву и Д.И.Юркову за плодотворное сотрудничество на всех этапах создания 64 – х элементного нейтронного генератора.

Литература.

- 1. V.M. Bystritsky et al., Proceedings of the 4th International Symposium on Technology and Mine Problem, Naval Postgraduate School, March 13-16, Monterey, California, 2000.
- 2. V.M. Bystritsky et al., Proceedings of the International Conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT-2003, 15-18 September 2003, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belguim, 2003, v 1,2.
- 3. V.M. Bystritsky et al., Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Portable neutron generators and technologies on their basis", 26-30 May, 2003, Moscow, p. 44.
- 4. V.M. Bystritsky et al., Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Portable neutron generators and technologies on their basis", Moscow, 2004, p.283.
- 5. V.M.Bystritsky et al., JINR Communications, E13-2006-36, 2006.
- 6. V.M.Bystritsky et al., Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters, V.5, No.5(2008)743.
- 7. V.M. Bystritsky et al., Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters, V.6, No.6(2009)831.
- 8. E.P. Bogolyubov et al., Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, October 18-22, 2004, Moscow, p. 299.
- 9. A.V. Kuznetsov et al., Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, October 18-22, 2004, Moscow, p. 265.
- 10. http://root.cern.ch
- 11. http://mysql.org