# Комплекс для досмотра крупногабаритных грузов и транспортных

#### средств с использованием метода меченых нейтронов

Быстрицкий В.М., Замятин Н.И., Зубарев Е.В., Рапацкий В.Л., Рогов Ю.Н., Садовский А.Б., Саламатин А.В., <u>Салмин Р.А.</u>, Сапожников М.Г., Слепнев В.М. Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

> Романов И.В., Сафонов М.В., Седин А.Н. Федеральная служба безопасности РФ

# А.В.Шмелев ООО «Авконт»

### Аннотация

характеристики комплекса Обсуждаются ДЛЯ досмотра крупногабаритных транспортных средств на наличие взрывчатых веществ с помощью метода меченых нейтронов. Комплекс предназначен для автоматического обнаружения и локализации скрытых веществ в объекте досмотра. Обнаружение скрытых веществ основано на анализе спектров характеристического ядерного гамма-излучения, возникающего при облучении объекта досмотра потоком быстрых меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ. Комплекс состоит из портала, двух модулей досмотра и модуля управления. Каждый из модулей досмотра включает ИНГ - 27, производства ВНИИА, со встроенным 64 нейтронный генератор в себя пиксельным кремниевым альфа-детектором, 24 гамма-детектора на основе кристаллов BGO, электронику приема и анализа данных, а также блоки питания детекторов и нейтронного генератора.

В работе приводятся основные характеристики комплекса и проводится сравнение их с имеющимися зарубежными аналогами.

# 1. Введение

В настоящей работе обсуждаются характеристики комплекса для досмотра крупногабаритных транспортных средств на наличие взрывчатых веществ (ВВ) с помощью метода меченых нейтронов (ММН). Комплекс предназначен для автоматического обнаружения и локализации скрытых веществ в объекте досмотра. Обнаружение скрытых веществ основано на анализе спектров характеристического ядерного гамма-излучения, возникающего при облучении объекта досмотра потоком быстрых меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ. Аналогичная установка была создана в рамках проекта «EURITRACK» [1-2].

Метод меченых нейтронов [1-13], основан на регистрации сопутствующего излучения  $\gamma$ частиц из бинарной реакции d+t ---->  $\alpha$  + n в совпадениях с характеристическим  $\gamma$ -излучением, возникающим в результате неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на ядрах веществ облучаемого образца (реакции A(n,'n $\gamma$ )A). Измеряя интенсивности  $\gamma$ -линий углерода, кислорода, азота и других веществ в совпадениях с сигналами от  $\alpha$ -детектора, а также временной интервал между моментами их регистрации, мы имеем возможность не только подавить фон, но и однозначно определить трехмерное положение подозрительного объекта в пространстве, а также его элементный состав.

Более подробное описание данной методики с различными ее модификациями можно найти в работах [3 - 13].

# 2. Конструкция комплекса

На Рис. 1 показан общий вид комплекса. Основными составными элементами установки являются:

- система позиционирования;

- 2 досмотровых модуля, расположенных на портале;

- модуль управления перемещением портала и досмотровых модулей;

– модуль контроля параметров установки, сбора и анализа данных, поступающих с альфа и гамма - детекторов.

Система позиционирования представляет собой подвижную «П»-образную раму-портал, который перемещается вдоль неподвижного объекта досмотра по рельсам на расстояния до 22 м. Скорость перемещения портала по рельсам составляет 50 см/с.

Перемещение модулей досмотра по порталу обеспечивается в двух направлениях: по высоте - до 4 м от пола и в направлении просвечивания пучком меченых нейтронов - до 0,5 м.

Позиционирование портала и модулей досмотра осуществляется автоматически, путем перемещения их в точку целеуказания. Точность позиционирования составляет ±5 мм. В качестве системы целеуказания используется рентгеновский сканер.

Управление перемещением досмотровых модулей осуществляется дистанционно при помощи удаленного персонального компьютера.



Рис. 1 Общий вид комплекса

### 2.1. Модуль досмотра.

Общий вид модуля досмотра показан на Рис.2. Модуль досмотра включает в себя:

а) портативный нейтронный генератор (НГ) со встроенным 64-х пиксельным альфадетектором;

б) 24 гамма-детектора;

в) систему сбора данных с альфа и гамма-детекторов;

г) систему термокоррекции откликов гамма-детекторов;

д) систему электропитания НГ, альфа- и гамма-детекторов;

е) защиту кристаллов гамма – детекторов от прямого попадания в них нейтронов.



Рис. 2 Модуль досмотра

Габаритные размеры модуля досмотра (ВхШхД) составляют 1171х910х1432 мм, масса модуля досмотра ~ 1000 кг.

#### 2.1.1. Нейтронный генератор

Для настоящего проекта Всероссийский научно-исследовательским институт автоматики (Москва) разработал специальный нейтронный генератор ИНГ-27М с повышенной интенсивностью (см. Рис. 3). Интенсивность потока нейтронов, создаваемого НГ в телесный угол  $4\pi$  составляет 2 х $10^8$  н/с. Внутри объема НГ находится 64-пиксельный кремниевый альфадетектор, разработанный сотрудниками Объединенного института ядерных исследований (Дубна).



# Рис. 3 Нейтронный генератор ИНГ-27М

Ресурс ИНГ-27М определяемый как время снижения интенсивности излучения в 2 раза составляет не менее 800 ч.

# 2.1.2. Альфа-детектор

На Рис. 4 показан общий вид двухкоординатного кремниевого альфа-детектора.



Рис. 4 64-х пиксельный кремниевый альфа-детектор

Конструктивно кремниевый альфа-детектор представляет собой 8 вертикальных и 8 горизонтальных стрипов размером 30 х 4 мм, расположенных на противоположных сторонах кремниевого кристалла. 64 пикселя, размером каждый 4х4 мм образуются перекрытием 8 горизонтальных Y0-Y7 (8n+) и 8 вертикальных X0-X7 (8p+) стрипов альфа – детектора, повернутых на 90 градусов друг относительно друга.

Блок детекторной электроники альфа-детектора состоит из 16 независимых усилителей сигналов, поступающих с 16 стрипов альфа-детектора. Блок электроники альфа-детектора крепится непосредственно на фланце нейтронного генератора.

Пространственные характеристики 64 меченых пучков нейтронов были измерены с помощью стрипового сцинтилляционного детектора (профилометра).

Размер каждого стрипа профилометра, выполненного из пластического сцинтиллятора в виде прямоугольного параллелепипеда, составляет 150х7.5 х5 мм (толщина стрипа вдоль направления пучка меченых нейтронов - 5 мм). Все 16 стрипов профилометра светоизолированы друг от друга. Светосбор с них на многоанодный фотоэлектронный умножитель осуществляется с помощью оптоволоконных световодов.

На Рис. 5 приведены пространственные распределения меченых пучков нейтронов в плоскости, перпендикулярной к их направлению. В качестве примера, построены пространственные распределения зарегистрированных событий, соответствующие совпадениям сигнала с одного Y-стрипа с сигналом с из восьми X-стрипов.



Рис. 5 Пространственные распределения нейтронов в меченых пучках.

Важно, что пространственные распределения меченых пучков оказались полностью совпадающими с простым геометрическим распределением для точечного дейтронного пучка на мишени. На расстоянии 2 м от мишени НГ размер меченого пучка составляет 10х10 см.

#### 2.1.3. Гамма-детекторы

Гамма–детекторы выполнены на основе кристаллов BGO с размерами: диаметр - 76 мм, толщина - 65 мм. В качестве фотоумножителей используется «Hamamatsu R6233».

Регистрация гамма-квантов каждым модулем досмотра осуществляется с помощью 24 сцинтилляционных детекторов, расположенных в три ряда по вертикали, по 8 детекторов в каждом ряду (см. рис. 2). Три ряда гамма-детекторов разделены между собой коллиматорами из железа и свинца общей толщиной 30 мм. Детекторы гамма-квантов обладают следующими свойствами:

а) хорошим энергетическим разрешением (8 -2,5%) в диапазоне энергий 1-12 МэВ. Следует отметить, что на линии углерода ( $E_{\gamma} = 4.43$  МэВ) энергетическое разрешение гаммадетекторов, в среднем, составляет  $\Gamma = (4.4 \pm 0.1)$  %;

б) высокой эффективностью регистрации гамма-квантов в указанном интервале энергий;

с) низкой чувствительностью по отношению к регистрации фоновых нейтронов.

Временное разрешение системы αγ–совпадений, усредненное по всей совокупности гамма–детекторов, составляет 3,5 нс.

Следует отметить одно важное обстоятельство, характеризующее работу гаммадетекторов при изменении температуры окружающей среды в широком диапазоне. Известно, что имеется зависимость световыхода кристалла BGO от его температуры на уровне 1,6 % на  $1^{\circ}$ С. Наличие данной зависимости приводит к заметному изменению положения центров тяжести пиков характеристического излучения ядер  $^{12}$ С,  $^{16}$ О,  $^{14}$ N, что, в свою очередь приводит к существенным ошибкам при идентификации скрытых BB.

Так как досмотровые комплексы эксплуатируются в широком температурном интервале от  $-20^{0}$ C до  $+50^{0}$ C, то возникает весьма актуальная задача устранения сдвигов пиков при изменении температуры кристаллов BGO.

Существует два возможных решения данной задачи: стабилизация температуры кристаллов BGO или коррекция амплитудного отклика гамма-детекторов на основании измеренной зависимости световыхода кристаллов BGO от температуры.

На Рис. 6 а, b, в качестве примера, приведены амплитудные распределения, полученные при облучении BGO-детектора потоком гамма-квантов от источников <sup>137</sup>Cs и <sup>60</sup>Co при температурах кристалла BGO 20, 30 и 54 <sup>0</sup>C. Видно, что при повышении температуры кристаллов BGO световыход их по сравнению с аналогичной величиной при комнатной температуре уменьшается и центры тяжести пиков полного поглощения, соответствующие гамма-линиям <sup>137</sup>Cs (0,662 МэВ) и <sup>60</sup>Co (1,17 и 1,33 МэВ) сдвигаются влево в область меньших амплитуд откликов гамма-детекторов.

Нами применен метод коррекции амплитуды сигнала с гамма-детектора на основе измеренной зависимости его отклика от температуры в интервале -20  $^{0}$ C < T < +55  $^{0}$ C. Измерение данной зависимости осуществлялось с помощью термодатчика, установленного непосредственно в тепловом контакте с кристаллом BGO. При этом гамма-детектор помещался в климатическую камеру, с помощью которой осуществлялась вариации температуры кристалла в указанном интервале температур.

На Рис. 6 b приведены амплитудные спектры сигналов с гамма-детектора после введения термокоррекции.



Рис. 6 Амплитудные распределения сигналов с гамма-детектора, полученные в результате облучения его гамма-квантами от источников <sup>137</sup>Cs и <sup>60</sup>Co при температурах 20, 30.7 и 54 <sup>0</sup>C: а) – до введения термокоррекции; b) – после термокоррекции

Как видно из Рис.6 b, максимальные смещения пиков в скорректированных амплитудных спектрах в расчете на полный диапазон изменения температуры (от 20 до 54  $^{0}$ C) не превышает 2%. Указанная точность восстановления первоначальных амплитудных распределений вполне достаточна для корректной обработки экспериментальных данных с целью идентификации BB.

#### 2.1.4. Система сбора данных с альфа и гамма-детекторов

Конструктивно регистрирующая электроника модуля досмотра выполнена в виде одной платы, которая имеет размер стандартной PCI-карты с возможностью установки ее в PCI-Е слот персонального компьютера (ПК). Обмен информацией с ПК осуществляется через PCI-Е шину. В основу системы регистрации сигналов с альфа и гамма-детекторов положен принцип оцифровки их с последующим восстановлением временных и амплитудных характеристик импульсов с альфа и гамма - детекторов.

Для обеспечения требуемой скорости передачи данных по PCI – Е шине интерфейс работает в режиме прямого доступа к памяти ПК.

Все программное обеспечение работает под управлением операционной системы Linux.

На Рис. 7 приведён внешний вид интерфейса оператора, который схематически

изображает проекцию 64 пучков меченых нейтронов на поверхность объекта облучения, перпендикулярную их направлению. Каждый из 64 меченых пучков нейтронов соответствует определенному пикселю альфа-детектора. Как видно из Рис. 7, область облучения исследуемого объекта вдоль направления меченого пучка нейтронов по глубине разбита на слои, толщиной по 10 см. Каждому слою соответствует определенный квадрат в левом вертикальном ряду, изображенном на Рис. 7. Элемент объема объекта, облучаемого одним меченым пучком нейтронов, в дальнейшем будем называть вокселем. Таким образом, в данной постановке, весь объем облучаемого объекта разбит на 448 вокселей. Определение элементного состава происходит независимо в каждом вокселе. Результаты идентификации скрытых веществ отображаются на правой панели интерфейса: выдается информация о типе скрытого вещества и о его трехмерных координатах. Данный рисунок соответствует результатам опыта по облучению образца из тринитротолуола.



Рис. 7 Интерфейс пользователя при облучении образца из тринитротолуола.

### 3. Результаты измерений

Досмотр грузового автомобиля (см. Рис. 1) проводился с использованием имитатора ВВ меламина, который располагался на различных расстояниях от НГ. Закладки меламина были экранированы слоем древесины и текстиля суммарной толщиной 25 см.

На Рис 8. приведена зависимость времени обнаружения имитатора ВВ от расстояния между источником нейтронов и объектом облучения для различных масс меламина.





Как видно из Рис. 8, минимальная детектируемая масса меламина на расстоянии 170 см от НГ составляет 5 кг. Время обнаружения 5 кг меламина составило 13 мин. На расстоянии 120 см от НГ время обнаружения данного количества меламина составило 5 мин.

Сравнение параметров созданного комплекса с основными характеристиками установки, созданной по проекту "EURITRACK" [1,2] отражено в Табл.1.

1 1 1		
	"EURITRACK	Созданный комплекс
Интенсивность нейтронного	$I = 1 * 10^7 c^{-1}$	$I=2*10^8 c^{-1}$
потока		
Число гамма-детекторов	22(NaI(Tl))	48(BGO)
Число меченых пучков	64	64
Размер одного меченого пучка	15 x 15	10 x 10
нейтронов на расстоянии 2 м от НГ, см		
Объем одного вокселя в объекте	3.9	1.7
досмотра на расстоянии 2 м от $H\Gamma$ , $10^3$		
cm <sup>3</sup>		
Минимально детектируемая масса		
взрывчатки, находящейся на расстоянии	70	5
2 м от НГ, кг		

Τŧ	аблица 1	. (	Сравнение па	раметров	созданного	комплекса	И	установки '	'EU	RIT	RA	CK	"[	1,2	1
															_

Из данных, приведенных в Таблице 1, видно, что созданная установка обладает большей светосилой и более высокой чувствительностью по обнаружению BB, чем установка "EURITRACK".

## 4. Заключение

Создан и прошёл испытания комплекс для досмотра крупногабаритных транспортных средств на наличие в них взрывчатых веществ с помощью метода меченых нейтронов. Комплекс предназначен для автоматического обнаружения и определения положения скрытых веществ в объектах досмотра размерами [ДхШхВ] 22х3х4 м. Проведен цикл тестовых испытаний и определены основные параметры комплекса, которые превосходят параметры существующих в мире аналогичных комплексов.

Авторы выражают благодарность Андрееву Е.И. и Тарасову О.Г. за помощь при сборке и проведении тестовых испытаний комплекса.

#### Литература

1. C.Carasco et al., Nucl. Instr. And Meth. 588 a(2008) p.397.

2. S. Pesente et al., Nucl.Instr.Meth. V. 531A(2004) p. 657-667.

3. V.M. Bystritsky et. al., 4-th International Symposium on Technology and the Mine Problem, Naval Postgraduate School, Monterey, California March 13-16, 2000.

4. E.P. Bogolyubov et al., Proceeding of the International Scientific and Technical conference "Portable Neutron Generators and Technologies on Their Basis", May 26-30, 2003, Moscow, p.263-268, 2003.

5. V.M. Bystritsky et. al., Proceeding of the International Scientific and Technical conference "Portable Neutron Generators and Technologies on Their Basis", May 26-30, 2003, Moscow, p.44-56, 2003.

6. V.M. Bystritsky et al., Proceeding of the International Scientific and Technical conference "Portable Neutron Generators and Technologies on Their Basis", October 18-22, 2004, Moscow, p.283-295, 2005.

7.V.M. Bystritsky et al., Preprint JINR, E13-2006-36, Dubna, 2006.

8.V.M. Bystritsky et al., Proceeding of the Intern. Conf. on Requirements and Technologies for the Detection, Identification, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT – 2003, Vrijt Universiteit Brussel, Sept. 15-18,2003, Brussels,2003, V.1,2.

9.V.M. Bystritsky et al., JINR Commun. E18-2007-142, Dubna,2007; Part. Nucl. Lett. 2008, V 5, No.5(147) p.743-751.

10. V.M. Bystritsky et al., Part. Nucl. Lett. 2009, V 5, No.6(155) p.831-840.

11. E. Rhodes et al., SPIE Proceeding 1993, V.2092, p.288 – 300.

12. A.Beyerle et al., Nucl. Instr.Meth. V. 299A(1990) p. 458