

СТАЦИОНАРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ НА ОСНОВЕ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ НЕЙТРОНОВ

*В. М. Быстрицкий^а, Н. И. Замятин^а, Е. В. Зубарев^а, В. Л. Рапацкий^а,
Ю. Н. Рогов^а, И. В. Романов^б, А. Б. Садовский^а, А. В. Саламатин^а,
М. Г. Сапожников^а, М. В. Сафонов^б, В. М. Слепнев^а, А. В. Филиппов^б*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Федеральная служба безопасности РФ

Обсуждаются результаты эксплуатации стационарной установки по обнаружению и идентификации взрывчатых веществ по методу меченых нейтронов. Источником потока меченых нейтронов с энергией 14,1 МэВ является портативный нейтронный генератор ИНГ-27 производства ВНИИА (Москва) со встроенным 64-пиксельным кремниевым α -детектором с двухсторонним стриповым съемом, разработанным в ОИЯИ. Созданная установка была протестирована на идентификацию более 30 взрывчатых веществ.

The results of exploitation of the stationary setup for detection and identification of explosives using tagged neutrons method (API method) have been presented. The source of tagged neutron beams with 14.1 MeV energy is the portable neutron generator ING-27, made by VNIIA (Moscow). It contains embedded 64-pixels silicon α -detector with double-sided strip readout, developed by JINR. The setup was tested for identification of more than 30 explosives.

PACS: 28.20.-v; 25.40.-h

ВВЕДЕНИЕ

Детекторы взрывчатых веществ (ВВ), использующие технологию метода меченых нейтронов (ММН), получили в последнее время широкое распространение [1–5]. Главное преимущество ММН состоит в том, что он позволяет определять элементный состав вещества, а не контраст плотности, как это происходит в обычных рентгеновских сканерах.

В ММН используются быстрые нейтроны с энергией 14 МэВ, которые возникают в бинарной ядерной реакции $d + t \rightarrow \alpha + n$. Каждый нейтрон метится путем регистрации сопутствующей α -частицы специальным α -детектором, что обеспечивает определение направления вылета нейтрона. Меченые нейтроны облучают объект досмотра и индуцируют реакции неупругого рассеяния $A(n, n'\gamma)A$, в результате которых испускаются γ -кванты с энергетическим спектром, характерным для каждого химического элемента, составляющего объект досмотра. Характеристические γ -кванты регистрируются в совпадениях с сигналом от α -частицы. Измерение временного интервала между сигналами с α - и

γ -детекторов дает возможность измерить расстояние до точки, из которой был выпущен γ -квант, поскольку скорость нейтрона постоянна и равна 5 см/нс. Таким образом, ММН позволяет определить все три координаты области, из которой произошло γ -излучение.

Мечение нейтронов позволяет получить информацию о времени пролета, которая может быть использована для того, чтобы выбрать события только из определенного временного интервала. Это приводит к резкому уменьшению фона. Показано [6–9], что использование (α – γ)-совпадений уменьшает отношение сигнал–фон более чем в 200 раз, что существенно улучшает условия обнаружения скрытых веществ.

Важно, что идентификация происходит автоматически, без участия оператора.

Стационарная установка для обнаружения ВВ на основе технологии ММН была разработана в ОИЯИ (Дубна) по заказу ФСБ РФ. Стационарная установка размещена и испытана в Межрегиональном центре по исследованию и обезвреживанию взрывных устройств ФСБ РФ [10]. Установка включает в себя портативный нейтронный генератор со встроенным 9-канальным α -детектором. Позже она была улучшена путем использования нейтронного генератора, позволяющего создать 64 пучка меченых нейтронов, а также была разработана новая программа принятия решений. В данной работе приводятся результаты эксплуатации модифицированной стационарной установки.

1. ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Стационарная установка расположена в специализированном боксе лаборатории Межрегионального центра по исследованию и обезвреживанию взрывных устройств ФСБ РФ. Общий вид установки показан на рис. 1.



Рис. 1. Общий вид стационарной установки для идентификации ВВ

Гамма-кванты, возникающие при облучении объекта досмотра мечеными нейтронами, регистрируются двумя γ -детекторами на основе кристаллов ВГО. Сигналы с α - и γ -детекторов в совпадениях анализируются системой сбора и обработки информации (СОИ) и направляются в основной компьютер обработки данных, где программа принятия решений (ППР) производит анализ вещества объекта досмотра. Результаты обработки отображаются на интерфейсе пользователя.

Нейтронный генератор ИНГ-27 разработан Всероссийским научно-исследовательским институтом автоматики им. Н. Л. Духова (Москва). Он имеет следующие характеристики:

Максимальная интенсивность нейтронов, с^{-1}	$1 \cdot 10^8$
Энергия нейтронов, МэВ	14,1
Режим нейтронного излучения	Постоянный
Питание, В	200 ± 5
Максимальная мощность, Вт	40
Размер нейтронного генератора, мм	$130 \times 279 \times 227$
Вес, кг	8
Ресурс работы, ч	800

В ОИЯИ разработан и сконструирован кремниевый α -детектор, встраиваемый в нейтронный генератор. Двухсторонний стриповый детектор содержит 8 взаимно перпендикулярных стрипов на каждой стороне, которые образуют матрицу 8×8 с размером каждого элемента 4×4 мм. Полный размер чувствительной области 64-элементного α -детектора составляет 32×32 мм. Альфа-детектор расположен на расстоянии 80 мм от тритиевой мишени. На рис. 2 показан общий вид α -детектора.

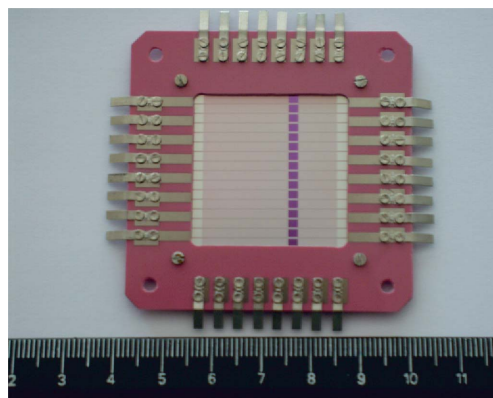


Рис. 2. Общий вид 64-элементного α -детектора

Предусилители сигналов α -детектора монтируются в задней части НГ.

Для измерения пространственных характеристик меченых пучков сконструирован специальный стенд (рис. 3). Он состоит из двух пластиковых стриповых скintилляторов с ортогональной ориентацией стриповых полосок. Каждый детектор состоит из 16 стрипов с фибрами, включенными в скintиллятор. Размер стрипа $7,5 \times 15$ мм,

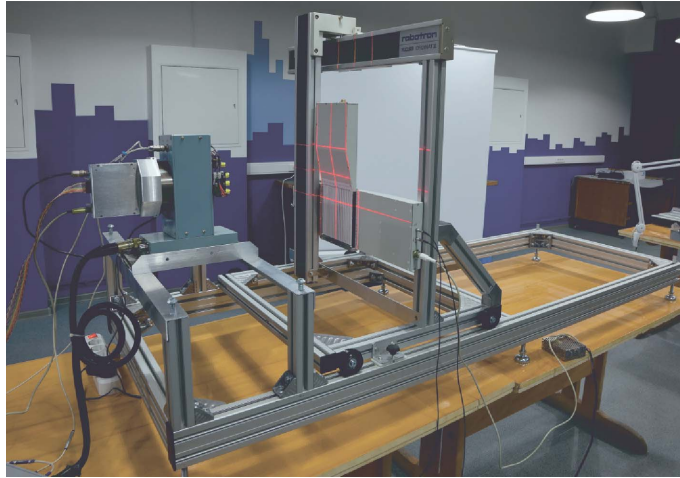


Рис. 3. Стенд для измерения пространственных характеристик меченых пучков

толщина стрипа — 5 мм. Файберы просматриваются 16-канальным ФЭУ, считывание осуществляется специальной платой электроники с изменяемым порогом в каждом канале. Эта установка существенно облегчает измерения пространственных характеристик меченых пучков, поскольку позволяет одновременно определять обе пространственные координаты в плоскости, перпендикулярной направлению нейтронного пучка.

На рис. 4 показано пространственное распределение меченых пучков, образованных при совпадении сигналов от 8 вертикальных стрипов с одним горизонтальным стрипом. На расстоянии 300 мм от НГ ширина меченых пучков составляет $\Gamma_X = (14,6 \pm 0,9)$ мм

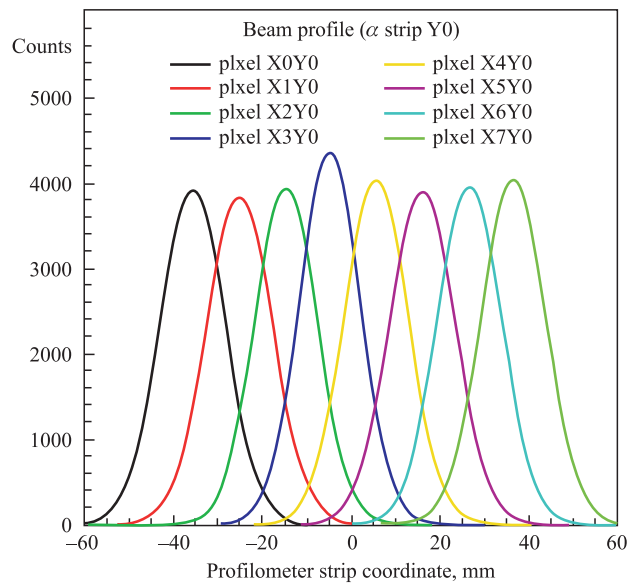


Рис. 4. Пространственное распределение 8 меченых пучков

и $\Gamma_Y = (14,8 \pm 1,1)$ мм соответственно. Это хорошо совпадает со значениями, ожидаемыми от точечного дейтронного пучка на мишени.

Для регистрации γ -квантов от облучения объектов досмотра мы использовали два γ -детектора на основе кристаллов BGO. Кристаллы были поставлены Институтом неорганической химии Сибирского отделения РАН. Каждый кристалл имеет диаметр 100 мм и толщину 70 мм. Энергетическое разрешение на линии углерода $E_\gamma = 4,43$ МэВ составляет $\Gamma = (5,4 \pm 0,2)$ %.

Система сбора и обработки информации (СОИ) была разработана на основе электронной платы сбора информации на 32 канала. В ее состав входило также соответствующее программное обеспечение, которое включало основной модуль (драйвер), программу управления и программу реконструкции. Плата сбора информации обеспечивает прямое цифровое преобразование импульсов сигналов, приходящих от α - и γ -детекторов. Она имеет встроенные триггерные схемы для работы в трех режимах: временном, энергетическом одноканальном и в режиме $(\alpha - \gamma)$ -совпадений. Используя программное обеспечение, можно точно восстановить амплитудные и временные характеристики сигнала.

Разработанная система электропитания для γ -детекторов, выходной электроники α -детекторов и нейтронного генератора вместе с ПК и СОИ занимает крейт, расположенный в нижней части установки (см. рис. 1).

Общий вид интерфейса пользователя показан на рис. 5. Зона досмотра делится на 64 элементарных объема — вокселя. Размер вокселя в плоскости, перпендикулярной направлению нейтронного пучка, определяется размером соответствующего меченого пучка. Зона досмотра в глубину делится на 7 областей, которые схематично показаны на полосе слева на рис. 5.



Рис. 5. Общий вид интерфейса пользователя

Если подозрительное вещество находится в каком-либо из вокселей, соответствующая ячейка интерфейса пользователя окрашивается в красный цвет. В дополнительном окне интерфейса можно посмотреть энергетический спектр γ -квантов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Стационарная установка эксплуатируется в течение двух лет. За это время было выполнено большое число тестов с различными ВВ и обычными веществами. Список ВВ, на которых были проверены алгоритмы принятия решений, приведен в таблице.

Список ВВ, обнаруживаемых стационарной установкой

№	Вещество	№	Вещество
1	Тетрил	16	А-IX-3Т
2	Окфол	17	ГЛД-24
3	Гексоген	18	Изопропилнитрат
4	Тринитробензол	19	Окфал-20
5	ТНТ	20	ОЛА-8Т
6	ТЭН	21	Сейсмон
7	Октоген	22	Пентолит
8	ЛД-70	23	ПВВ-85
9	Гексанитростильбен	24	ТГА-16
10	Дазин	25	ТМ
11	ТАТБ	26	Токаф
12	ПВВ-5А	27	Селитра
13	ТС	28	ТА-23
14	Окфол-3.5	29	Аммонит-19
15	ТГ-50	30	ПВВ-7

Анализ спектров γ -квантов велся в двух режимах: обнаружения и идентификации ВВ. В режиме обнаружения программа принятия решений (ППР) должна определить, является ли вещество опасным или нет. Типичное время обнаружения составляет 4 мин. В режиме идентификации происходит классификация опасного вещества к той или иной группе ВВ. Для идентификации требуется набирать статистику в течение 16–20 мин.

Стандартный подход состоит в идентификации ВВ по определению относительных выходов углерода, азота и кислорода (CNO-метод). Однако некоторые ВВ имеют абсолютно одинаковые соотношения выходов C : N : O. Например, в CNO-методе невозможно отличить октоген ($C_4H_8O_8N_8$) от гексогена ($C_3H_3O_6N_6$). Поэтому для целей идентификации ВВ из таблицы были разбиты на 9 классов, объединяющих вещества с похожими соотношениями C : O : N.

Отдельные смесевые ВВ содержат помимо основного ВВ различные добавки, факт наличия которых можно использовать при идентификации. Например, токаф на 60 % состоит из октогена, а остальное составляют различные добавки, в том числе алюминия (17 %). Эти добавки меняют энергетический спектр токафа и дают принципиальную возможность его идентификации. На рис. 6 спектр токафа сравнивается со спектром гексогена.

Видно, что спектры токафа и гексогена практически совпадают в области линий углерода (4,43 МэВ), азота (5,1 МэВ) и кислорода (6,13 МэВ). Однако наличие алюминия в токафе проявляется в пиках при низкой энергии γ -квантов в районе 2,2 МэВ.

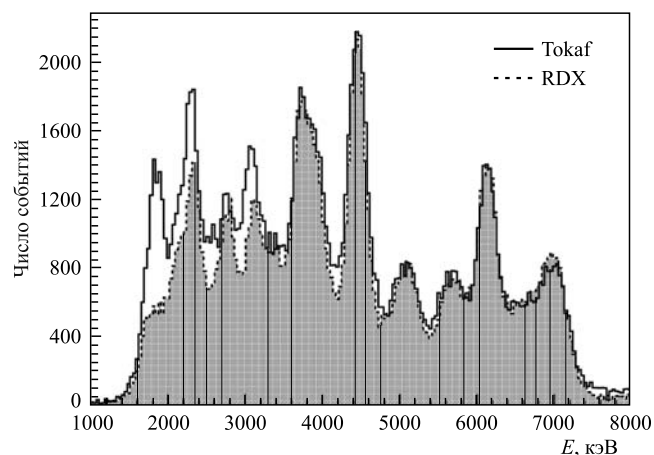


Рис. 6. Энергетические спектры γ -квантов от токафа (сплошная линия) и гексогена (пунктирная)

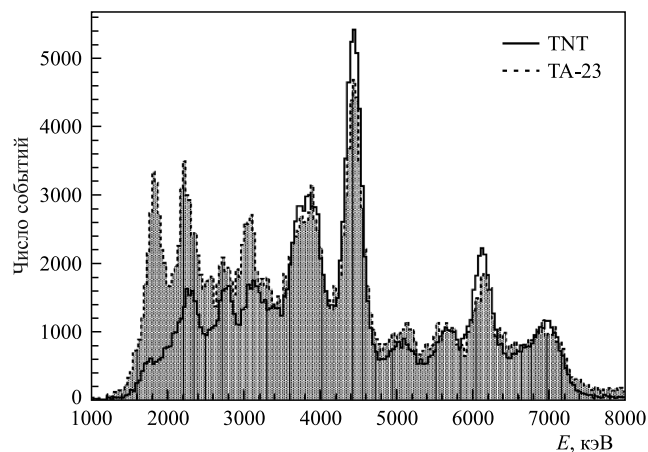


Рис. 7. Энергетические спектры γ -квантов от ТНТ (сплошная линия) и ТА-23 (пунктирная)

Аналогичная картина наблюдается при сравнении спектров ТНТ и ТА-23, который на 77 % состоит из ТНТ и на 17 % из алюминия. Спектры ТА-23 и ТНТ сравниваются на рис. 7.

В разработанной ППР для идентификации ВВ используется 9 областей сравнения спектров γ -квантов.

Другой отличительной особенностью созданной стационарной установки является большая гранулярность — зона досмотра делится на большое число элементарных объемов — вокселей, в которых производится элементный анализ. Общее число вокселей составляет $64 \times 7 = 448$.

Малый размер пикселя α -детектора и большое расстояние от α -детектора до тритиевой мишени приводят к малому размеру отдельного меченого пучка. Это облегчает иден-

тификацию малых масс вещества. Так, 25 г ТНТ было обнаружено за 393 с, 50 г ТНТ — за 250 с при интенсивности НГ $I = 4 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$.

Всего на стационарной установке было выполнено 64 измерения в 2011 г. и 83 в 2012 г. Измерения проводились для различных ВВ из таблицы, а также для 10 различных бытовых веществ. Верное обнаружение ВВ произошло в 97 % случаев. Процент ложных обнаружений, когда бытовое вещество принималось за ВВ, составил 2 % случаев.

Для идентификации ВВ была разработана итерационная процедура изменения критериев отбора в процессе измерений. Она состояла в том, что критерии отбора уточнялись с каждым измерением нового опасного вещества. Если в начале измерений вероятность правильной идентификации составляла 65 %, то в настоящее время, по мере накопления большой статистики, по всей накопленной базе данных вероятность правильной идентификации ВВ составляет 95 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана и создана стационарная установка по обнаружению и идентификации взрывчатых веществ по методу меченых нейтронов. Главное отличие настоящей установки от комплекса [10] состоит в увеличении числа меченых пучков, которыми облучается объект досмотра, с 9 до 64, а также в разработке новой программы обработки данных и принятия решений.

Повышенная гранулярность установки позволила проводить обнаружение в четыре раза меньших масс вещества, чем на комплексе [10].

Эксплуатация установки в течение двух лет проводилась в Межрегиональном центре по исследованию и обезвреживанию взрывных устройств ФСБ РФ. По результатам 147 измерений вероятность обнаружения составила 97 %, вероятность идентификации 95 %, при вероятности ложных тревог в 2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hawkins P. O., Sutton R. W. // *Rev. Sci. Instr.* 1960. V. 31. P. 241.
2. Ussery L. I. et al. Los Alamos Nat. Lab. Report LA12847-MS. 1994.
3. Rhodes E. et al. // *SPIE*. 1993. V. 2092. P. 288;
Rhodes E. et al. // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 1992. V. 39. P. 1041–1045.
4. Beyerle A., Hurley J. P., Tunnell L. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 1990. V. 299. P. 458.
5. Pesenti S. et al. // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2004. V. 531. P. 657.
6. Bystritsky V. M. et al. // *Proc. of the 4th Intern. Symp. on Technology and Mine Problem*, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA, March 13–16, 2000.
7. Bystritsky V. M. et al. // *Proc. of the Intern. Conf. on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO*, EUDEM2-SCOT-2003, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Sept. 15–18, 2003. V. 1, 2.
8. Bystritsky V. M. et al. // *Proc. of the Conf. on Portable Neutron Generators and Technologies on Their Basis*. M., 2004. P. 283.
9. Bystritsky V. M. et al. *JINR Commun.* E13-2006-36. Dubna, 2006.
10. Bystritsky V. M. et al. // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2008. V. 5. P. 441.

Получено 10 декабря 2012 г.