

СТАЦИОНАРНЫЙ ДОСМОТРОВЫЙ КОМПЛЕКС ДВиН-2

*В.М. Быстрицкий, В.В. Герасимов, Н.И. Замятин, Е.В. Зубарев,
В.Г. Кадышевский, А.П. Кобзев, А.Р. Крылов, А.А. Ноздрин, В.Л. Рапацкий,
Ю.Н. Рогов, А.Б. Садовский, А.В. Саламатин, М.Г. Сапожников,
А.Н. Сисакян, В.М. Слепнев*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

В Объединенном институте ядерных исследований разработан и создан стационарный досмотровый комплекс ДВиН-2 для идентификации скрытых взрывчатых и наркотических веществ (ВВ и НВ). Идентификация скрытых веществ основана на использовании метода меченых нейтронов (ММН). Источником потока меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ, образующихся в реакции $d+t \rightarrow \alpha+n$, является портативный нейтронный генератор со встроенным 9-канальным кремниевым α -детектором. Созданная установка ДВиН-2 обеспечивает идентификацию скрытых ВВ и НВ массой от 100 г до 50 кг в объектах контроля с габаритными размерами от 50 до 400 мм по всем трем измерениям. Результаты 76 тестовых опытов свидетельствуют о высокой эффективности установки ДВиН-2 в плане идентификации скрытых ВВ и НВ при достаточно низкой вероятности ложных срабатываний: вероятность идентификации ВВ и НВ составляет 94%, а ложных срабатываний – 3%. Время идентификации скрытых веществ в зависимости от их массы и толщины слоя экранирующего материала составляет 3-7 мин при средней интенсивности нейтронного потока в $4\pi \approx 2 \cdot 10^7$ н/с.

PACS: 28.20.-v; 25.40.-h

ВВЕДЕНИЕ

В Объединенном институте ядерных исследований (ОИЯИ), по заказу Фельдъегерской службы РФ, разработан и создан стационарный досмотровый комплекс ДВиН-2 для идентификации взрывчатых и наркотических веществ, скрытых в фельдъегерском багаже и почтовых отправлениях.

Идентификация скрытых веществ в комплексе ДВиН-2 основана на методе меченых нейтронов, который состоит в облучении инспектируемого объекта потоком меченых нейтронов с энергией 14.1 МэВ, образующихся в реакции $d+t \rightarrow \alpha+n$. Источником меченых нейтронов является портативный нейтронный генератор со встроенным многоканальным α -детектором.

Регистрация α -частицы в совпадениях с характеристическим ядерным γ -излучением, возникающим в результате неупругого рассеяния $A(n,n'\gamma)A$ меченого нейтрона с ядрами исследуемого вещества, позволяет идентифицировать вещество по композиционному элементному составу. Это достигается путем измерения энергетических распределений характеристического γ -излучения.

Анализ экспериментальных данных с целью идентификации скрытого вещества осуществляется с использованием метода нейронных сетей. Суть данного метода заключается в сравнении измеренных спектров характеристического γ -излучения, соответствующих определенным временным (α - γ)-интервалам, с эталонными спектрами, принадлежащими “опасным” запрещенным веществам.

Более детальное описание метода меченых нейтронов подробно изложено нами в работах [1-6].

1. Установка ДВиН-2

Основными элементами установки ДВиН-2 являются:

1. портативный нейтронный генератор (НГ) со встроенным α -детектором;
2. детекторы γ -квантов на основе кристаллов ВGO;

3. электроника сбора и анализа сигналов, поступающих с α и γ -детекторов;
4. биологическая защита от нейтронного излучения, создаваемого НГ;
5. предметный стол с перемещающейся подставкой для установки исследуемого объекта;
6. блоки электропитания НГ, α и γ -детекторов;
7. интерфейс оператора на базе персонального компьютера с блоком программ обработки данных.

На рис. 1 приведен общий вид установки ДВиН-2 для идентификации скрытых веществ с помощью метода меченых нейтронов.



Рис. 1. Установка для идентификации скрытых веществ с помощью метода меченых нейтронов.



Рис. 2. Портативный нейтронный генератор ИНГ-27.

1.1. Нейтронный генератор. Портативный нейтронный генератор ИНГ-27 (см. рис. 2) со встроенным 9-ти элементным кремниевым α -детектором разработан во Всероссийском научно-исследовательском институте автоматики (ВНИИА, г. Москва) [7]. В отличие от созданных ранее генераторов меченых нейтронов [3-6, 8], у которых тритиевая мишень находилась под высоким потенциалом (~ 120 кВ), в данной конструкции реализован вариант с заземлённой мишенью. В качестве источника ионов используется источник типа Пеннинга.

α -детектор разработан и создан в Объединенном институте ядерных исследований [4]. Матрица α -детекторов, состоящая из 9 пикселей, расположена на расстоянии 62 мм от центра тритиевой мишени. Наличие 9-ти элементного α -детектора внутри НГ позволяет формировать девять меченых пучков нейтронов для облучения инспектируемого объекта.

В состав 9-ти пиксельного α -детектора, установленного в корпусе НГ (см. рис.3), входят: планарный кремниевый детектор (кристалл); керамическая печатная плата-держатель; корпус из нержавеющей стали.

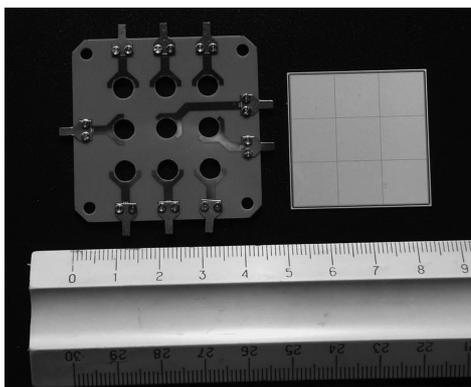


Рис. 3. 9-пиксельный кремниевый α -детектор.

Планарный кремниевый детектор состоит из 9-ти элементов (пикселей), образуя матрицу (3×3) с размерами чувствительной площади (30×30) мм². Размеры одного элемента (10×10×0.3) мм³.

Корпус альфа-детектора изготовлен из нержавеющей стали и предназначен для механической защиты и фиксации положения кремниевого детектора относительно мишени и размещения электрических выводов от каждого элемента альфа-детектора. Керамическая печатная плата-держатель предназначена не только для механической защиты и фиксации кремниевого детектора, но и для обеспечения электрических контактов с девятью элементами альфа-детектора.

Блок детекторной электроники состоит из 9-ти независимых усилителей сигналов, поступающих с 9-ти пикселей альфа-детектора. Плата детекторной электроники смонтирована внутри металлического корпуса – электромагнитного экрана. Блок электроники крепится на фланце нейтронного генератора и соединяется с контактами альфа-детектора через входной разъем.

Нейтронный генератор имеет следующие характеристики:

- максимальный поток нейтронов – $5 \cdot 10^7$ с⁻¹
- энергия нейтронов – 14.1 МэВ
- режим работы – непрерывный
- максимальное ускоряющее напряжение – 120 кВ
- электропитание – 200 ± 10 В
- масса блока излучателя нейтронов – не более 6 кг
- рабочий диапазон температур – 10÷45 °С
- предельная потребляемая мощность – 30 Вт

Нейтронный генератор окружен со всех сторон, кроме выходной апертуры девяти меченых пучков нейтронов, биологической защитой из полиэтилена. Толщина биологической защиты в среднем составляет 300 мм.

К настоящему времени нейтронный генератор проработал 300 ч при интенсивности нейтронного потока $\sim 2 \cdot 10^7$ н/с.

2.2. Детектор γ -квантов. Регистрация характеристического γ -излучения, образующегося в результате реакции неупругого рассеяния ($A(n, n'\gamma)A$) быстрых нейтронов на ядрах легких элементов (¹²C, ¹⁴N и ¹⁶O), входящих в состав исследуемого объекта, осуществляется с помощью двух сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов BGO.

Детекторы γ -квантов 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 γ -квантов в указанном энергетическом диапазоне, что позволяет осуществлять набор требуемой статистики для идентификации скрытых веществ за достаточно малые времена;
- 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.

γ -детектор состоит из 8-диодного 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.

На рис. 4а,б, в качестве примера, приведены спектры характеристического γ -излучения, возникающего при облучении образцов из углерода (¹²C) и меламина (имитатора взрывчатки – C₃H₆N₃) потоком меченых нейтронов. Толщины образцов из углерода и меламина вдоль направления падающих нейтронов составляли 3 и 10 см. Как видно, распределение а) характеризуется двумя пиками – пиком полного поглощения энергии характеристического γ -излучения углерода ($E_\gamma = 4.43$ МэВ) и пиком однократной утечки γ -кванта с энергией 0.511 МэВ ($E_\gamma = 3.92$ МэВ), а распределение б) – пиками γ -излучения углерода и азота ($E_\gamma = 5.1$ МэВ). Энергетическое разрешение γ -детектора на линии $E_\gamma = 4.43$ МэВ составляет $\Gamma_E = (3.9 \pm 0.1) \%$.

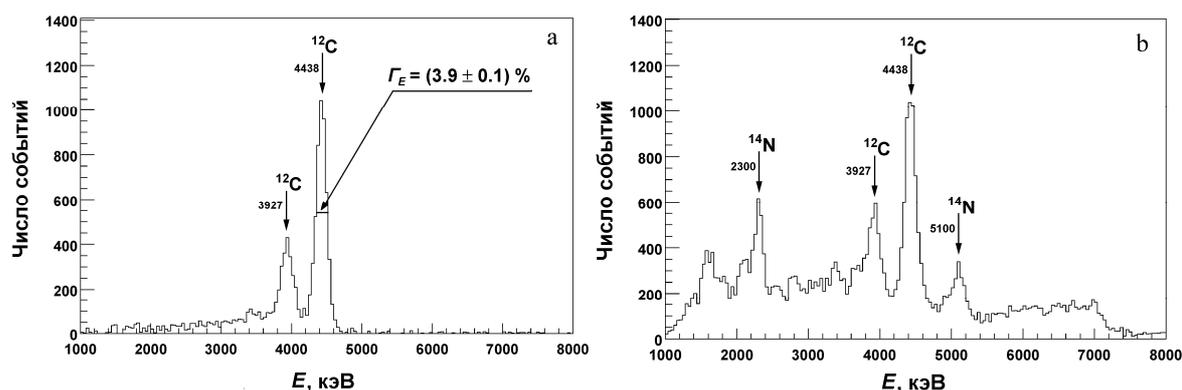


Рис. 4. Энергетические спектры характеристического γ -излучения углерода (а) и меламина (б).

1.3. Регистрирующая электроника. 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.

1.4. 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 [9], созданного на основе ROOT набора классов для работы с нейронными сетями. В качестве базы данных для хранения протоколов используется пакет MySQL [10], интерфейс к которому встроен в ROOT. Взаимодействие с генератором нейтронов производится по интерфейсу RS 232.

1.5. Параметры меченых пучков установки ДВиН-2. Измерения пространственного распределения нейтронов в девяти меченых пучках проводились с помощью специально разработанного и созданного для этих целей детектора-профилометра [6]. На рис. 5а,б, в качестве примера, приведены пространственные распределения нейтронов в плоскости XY, перпендикулярной направлению вылета пучков меченых нейтронов из мишени, и находящейся на расстоянии 275 мм от НГ. Распределения по абсциссе X и ординате Y приведены для меченых пучков, соответствующих центральным рядам α -пикселей по вертикали ($\alpha_2, \alpha_5, \alpha_8$) и горизонтали ($\alpha_4, \alpha_5, \alpha_6$). Значения абсциссы X и ординаты Y отсчитываются от точки пересечения оси НГ, проходящей через центр тритиевой мишени, с плоскостью XY.

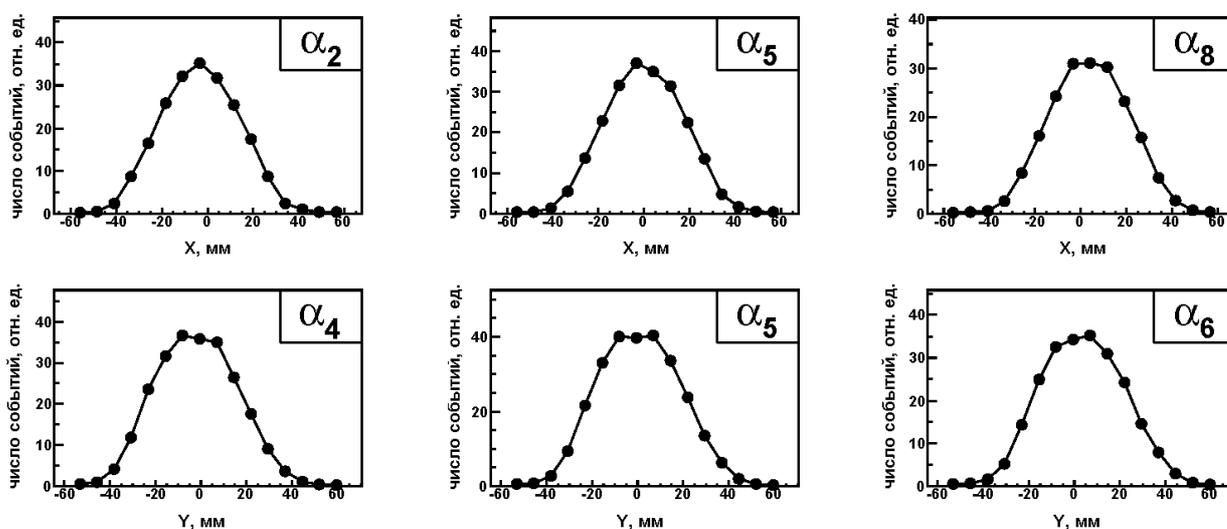


Рис.5. Пространственное распределение пучков меченых нейтронов вдоль осей X и Y. Сплошная линия – результат фитирования.

В среднем, ширины пиков на полувысоте на расстоянии 275 мм от центра тритиевой мишени до плоскости XY в направлениях осей X и Y составляют 41.1 ± 1.1 и 42.8 ± 1.4 мм, соответственно.

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

При интенсивности нейтронного потока ($I_n = 2 \cdot 10^7$ н/с) скорость счета событий, зарегистрированных одним α -пикселем, усредненная по всем 9 пикселям составляет $\sim 4 \cdot 10^4$ с⁻¹.

1.6. Временное разрешение детекторов установки ДВиН-2. Собственное временное разрешение (Γ_t) системы регистрации меченых нейтронов в совпадениях с α -частицами из dt -реакции определялось в опыте с использованием детектора нейтронов на основе пластического сцинтиллятора, который устанавливался непосредственно в меченый пучок нейтронов, соответствующий центральному пикселю. На рис. 6а,б приведены распределения временных интервалов между сигналами с центрального α -пикселя и с γ -детектора, измеренные при облучении образцов из ^{12}C ($10 \times 10 \times 3$ см³) и меламина ($10 \times 10 \times 10$ см³) потоком меченых нейтронов. ($10 \times 10 \times 30$ мм³)

Аппроксимация данных распределений производилась с помощью функции, представляющей собой сумму двух гауссианов и константы. Первый пик соответствует регистрации характеристического γ -излучения углерода ($E_\gamma = 4.43$ МэВ), а второй – детектированию меченых нейтронов, рассеявшихся на образце ^{12}C и попавших в γ -детектор.

Измеренное значение временного разрешения системы регистрации (α - n)-совпадений составило (1.6 ± 0.1) нс (см рис. 6с). Значения величины Γ_t для системы регистрации характеристического γ -излучения в совпадениях с сопутствующими α -частицами в опытах с образцами из ^{12}C и меламина составили (2.6 ± 0.1) нс и (3.2 ± 0.1) нс, соответственно (см. рис. 6а,б). Различие в указанных значениях величины Γ обусловлено различием времен свободного пробега меченого нейтрона в веществах указанных образцов, которые, в свою очередь, определяются плотностью вещества и толщиной облучаемого объекта.

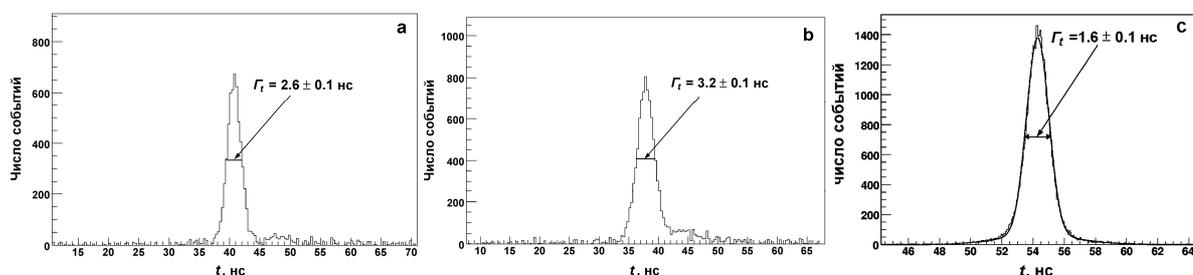


Рис.6. Распределения временных интервалов между сигналами с центрального α -пикселя и γ -детектора, измеренные при облучении потоком меченых нейтронов образцов из ^{12}C – а) и меламина – б); с) – распределение временных интервалов между сигналами с центрального α -пикселя и пластиковым детектором.

3. Результаты тестирования установки ДВиН-2

Основной целью тестирования созданной установки являлось определение вероятности идентификации взрывчатых (ВВ) и наркотических (НВ) веществ, при наличии разнообразных экранирующих материалов, а также вероятность ложных обнаружений ВВ и НВ.

Для обучения нейронной сети производилось измерение реперных энергетических распределений характеристического γ -излучения, возникающего при облучении потоком меченых нейтронов следующих взрывчатых и наркотических веществ: гексогена ($\text{C}_7\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_6$), аммонита (20% ТНТ + 80% $\text{H}_4\text{N}_2\text{O}_3$), тринитротолуола ($\text{C}_7\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_6$), тэна

($C_5H_8N_4O_{12}$), тетрила ($C_3H_6N_6O_6$), эластита (гексоген+пластификатор), ПВВ-5А (гексоген+пластификатор), героина ($C_{21}H_{23}NO_5$), кокаина ($C_{17}H_{21}NO_4$), солутана ($C_{10}H_{15}NO$ + различного типа добавки) и натрий-оксид-бутирата ($C_4H_8O_3$). Измерение γ -спектров производилось в режиме (α - γ)-совпадений. Время набора статистики для каждого из перечисленных веществ составляло в среднем ~ 1 ч при интегральной интенсивности потока нейтронов $\sim 4 \cdot 10^7$ н/с. Масса каждого из образцов составляла ~ 1 кг.

На рис. 7, в качестве примера, приведены для сравнения между собой энергетические спектры характеристического γ -излучения, полученные при облучении тринитротолуола, тэн, меламина (симулянта ВВ – $C_3H_6N_6$) и аммонита потоком меченых нейтронов.

Как видно, приведенные γ -спектры даже визуально различаются между собой по форме, что гарантирует четкую идентификацию данных ВВ с помощью нейронных сетей. Такое различие связано с тем, что соотношения между интенсивностями линий, характеристического γ -излучения ядер ^{12}C , ^{14}N и ^{16}O для перечисленных ВВ различны.

Сравнение же спектров, полученных для эластита и ПВВ-5А, свидетельствует об их практически полной схожести, и поэтому делает возможным только однозначную идентификацию данных веществ как ВВ, без указания конкретного взрывчатого вещества из приведенного набора ВВ.

На рис. 8 приведены энергетические спектры γ -излучения, полученные при облучении мечеными нейтронами наркотических веществ: солутана, натрия оксибутирата, кокаина и героина.

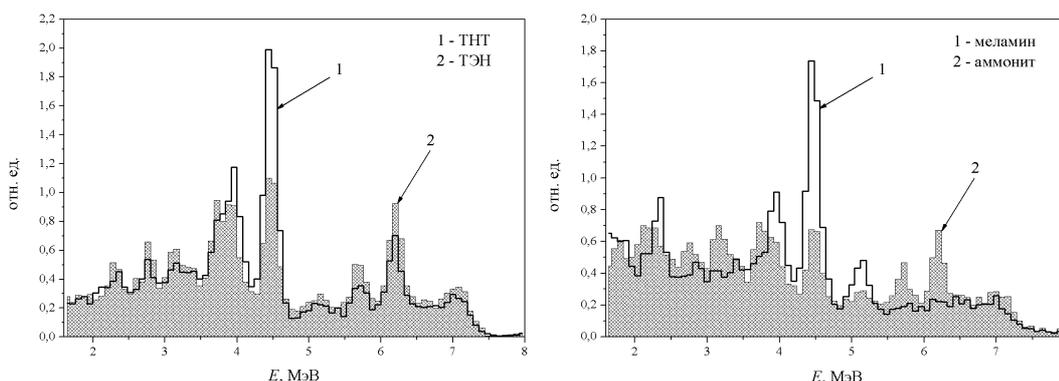


Рис. 7. Энергетические спектры характеристического γ -излучения, полученные при облучении потоком нейтронов тринитротолуола, тэна, меламина и аммонита.

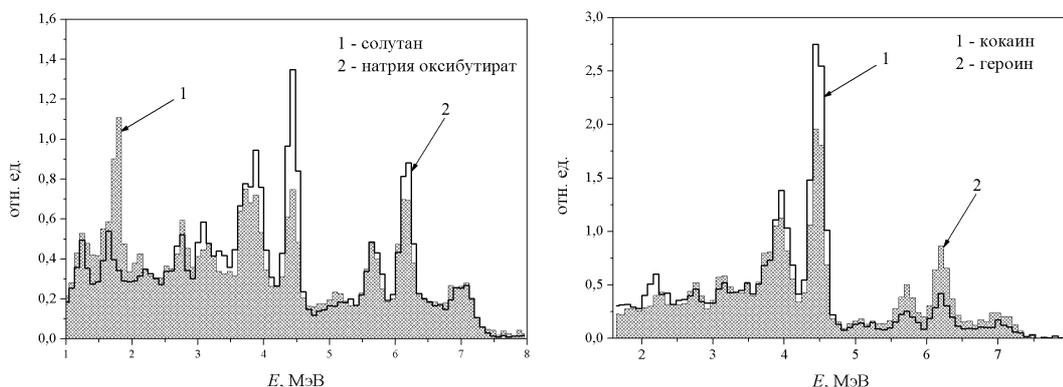


Рис. 8. Энергетические спектры характеристического γ -излучения, полученные при облучении потоком нейтронов солутана, натрия оксибутирата, кокаина и героина

Видно, что спектры для героина и кокаина, а также для солутана и натрия оксибутирата различны между собой по форме, что делает достоверной их идентификацию.

Результаты 76 тестовых опытов, выполненных со взрывчатыми и наркотическими веществами, свидетельствуют о высокой эффективности установки ДВиН-2 в плане идентификации скрытых ВВ и НВ при достаточно низкой вероятности ложных срабатываний. Вероятность идентификации ВВ составила 94%, а ложных срабатываний 3%.

Минимально детектируемая масса ВВ и НВ при наличии экранирующих веществ составила ~ 100 г.

Все тесты выполнялись при средней интенсивности нейтронного потока $\approx 2 \cdot 10^7$ н/с. При этом, время идентификации скрытого вещества составляло 3-7 мин, в зависимости от массы и толщины экранирующего материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

- 1) В Объединенном институте ядерных исследований разработан и создан стационарный досмотровый комплекс ДВиН-2, предназначенный для идентификации скрытых взрывчатых и наркотических веществ. Ядерно-физическая методика (метод меченых нейтронов) легла в основу создания данной установки.
- 2) Созданная установка ДВиН-2 обеспечивает идентификацию ВВ и НВ массой от 100 г до 50 кг в объектах контроля с габаритными размерами от 50 до 400 мм по всем трем измерениям без их вскрытия. Площадь зоны обследования объекта контроля, расположенного на расстоянии 600 мм от НГ, при однократном облучении его потоком меченых нейтронов составляет 300×300 мм².
- 3) Результаты 76 тестовых опытов, выполненных со взрывчатыми и наркотическими веществами, свидетельствуют о высокой эффективности установки ДВиН-2 в плане идентификации скрытых ВВ и НВ при достаточно низкой вероятности ложных срабатываний. Вероятность идентификации ВВ составляет 94%, а ложных срабатываний 3%.
- 4) Минимально детектируемая масса ВВ и НВ при наличии экранирующих веществ составляет ~ 100 г.
- 5) Время идентификации скрытых веществ в зависимости от их массы и толщины экранирующего материала составляет 3-7 мин при средней интенсивности нейтронного потока $\approx 2 \cdot 10^7$ н/с.

Благодарности. Авторы выражают благодарность: сотрудникам ГФС РФ В.А.Бочарникову, С.В. Кравченко и В.И.. Курчатову за инициирование данной работы и постоянную поддержку в ходе ее выполнения; сотрудникам ЛФВЭ ОИЯИ А.П. Дергунову и И.М. Мельниченко за большую практическую помощь в создании установки ДВиН-2, Е.В. Земляничкиной и Е.А. Переваловой за помощь при анализе экспериментальных данных; сотрудникам ВНИИА Е.П. Боголюбову, Ю.К. Преснякову, В.И. Рыжкову и Т.О. Хасаеву за плодотворное сотрудничество на всех этапах создания нейтронного генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bystritsky V.M. et al.* Experiments on Hidden Explosives by Using Tagged Neutron Beams // Proceedings of the 4th International Symposium on Technology and Mine Problem, Naval Postgraduate School, Monterey, California, March 13-16, 2000.
2. *Bystritsky V.M. et al.* Study of the Associated Particle Imaging Technique for the Hidden Explosives Identification // Proceedings of the International Conference on Requirements

- and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmines and UXO, EUDEM2-SCOT-2003, Vrije Universiteit Brussel, Sep. 15-18, 2003. Brussels, 2003, v 1, 2.
3. *Bystritsky V.M. 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. *Bystritsky V.M. et al.* Study of Nuclear Physics Methods for Identification of Hidden Materials in JINR // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference "Portable neutron generators and technologies on their basis", Moscow, 2004, p.283.
 5. *Bystritsky V.M. et al.* Portable Neutron Generator with 9-Section α Detector. JINR Commun. E13-2006-36. Dubna, 2006.
 6. *Bystritsky V.M. et al.* DVIN – Stationary Setup for Identification of Explosives // JINR Commun. E18-2007-142. Dubna, 2007; Physics of Elementary Particles and Atomic Nuclei, Letters. 2008. V.5, No. 5. P. 743-751.
 7. *Bogolyubov E.P. et al.* // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, October 18-22, 2004, Moscow, p. 299.
 8. *Kuznetsov A.V. et al.* // Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, October 18-22, 2004, Moscow, p. 265.
 9. <http://root.cern.ch>
 10. <http://mysql.org>