

## ГАММА-СПЕКТРОМЕТРЫ НА СЖАТОМ КСЕНОНЕ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ И ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

С.Е. Улин, В.В. Дмитренко, В.М. Грачев,  
К.Ф. Власик, З.М. Утешев, А.Д. Ищенко,  
А.Г. Духвалов  
(НИЯУ МИФИ)

К.А. Боярчук, В.Я. Геча  
(ФГУП «НПП ВНИИЭМ»)

Приведено описание ксенонового  $\gamma$ -детектора (КГД) и рассмотрены перспективы его применения для контроля за перемещением радиоактивных и делящихся материалов. Предложен метод обработки измеряемых  $\gamma$ -спектров, позволяющий повысить чувствительность КГД к  $\gamma$ -радиоактивным источникам. Дано описание многофункционального портального монитора, в состав которого входит КГД. Проведен анализ результатов испытаний КГД в составе портального монитора. Показано, что КГД можно успешно использовать в составе портальных мониторов как для обнаружения, так и для идентификации различных радионуклидов.

**Ключевые слова:** ксеноновый гамма-спектрометр, портальный монитор, гамма-источники, радиоактивные и делящиеся материалы.

### Введение

В настоящее время задача создания спектрометрических портальных мониторов, предназначенных для контроля за перемещением делящихся и радиоактивных материалов (РДМ), становится крайне актуальной. Для решения этой задачи необходимы  $\gamma$ -спектрометры, обладающие большой светосилой и высоким энергетическим разрешением. Их применение позволит уже на первом этапе радиационного контроля осуществить как обнаружение, так и идентификацию радиоактивных веществ, что значительно упростит задачу принятия квалифицированного решения о дальнейшем перемещении пассажиров, их багажа, а также всевозможных грузов при пересечении таможенных терминалов.

В большинстве случаев для задач таможенного контроля используются детекторы на основе неорганических скнтилляторов (NaI(Tl), CsI(Tl)). Однако энергетическое разрешение таких  $\gamma$ -детекторов  $\geq 7 - 10\%$ , что недостаточно для надежной идентификации радионуклидов. В последнее время появились  $\gamma$ -детекторы на основе кристаллов CZT (CdZnTe) и на основе лантана (LaCl<sub>3</sub>, LaBr<sub>3</sub>). Такие детекторы обладают хорошим энергетическим разрешением ( $\sim 3\%$ ), которое, однако, зависит от объема кристалла, что ограничивает их применение. Детекторы на основе небольшого ( $\sim 1 \text{ см}^3$ ) кристалла не могут обеспечить светосилу, необходимую для проведения надежных измерений в течение коротких временных экспозиций ( $\sim 1 - 5 \text{ с}$ ). Кроме того, CZT-детекторы устойчиво функционируют только при комнатной температуре ( $\sim 15^\circ - 25^\circ \text{ C}$ ), но при ее увеличении спектрометрические характеристики этих  $\gamma$ -детекторов заметно ухудшаются.

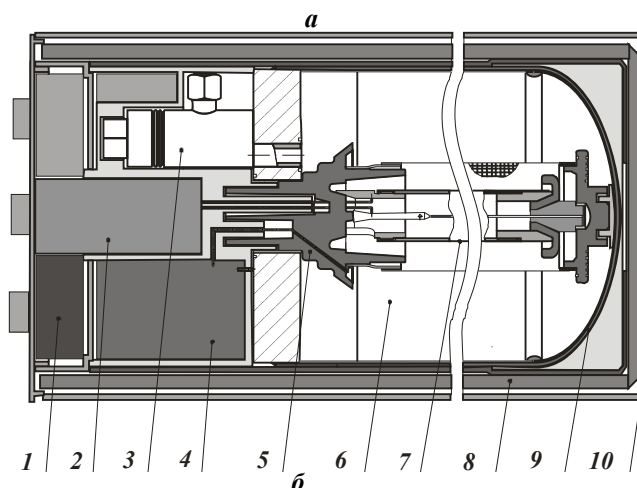
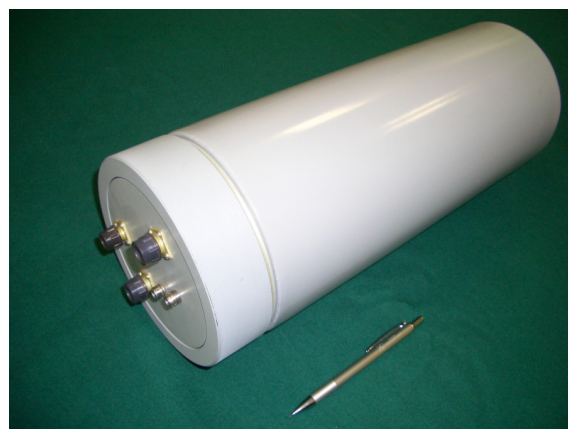


Рис. 1. Ксеноновый  $\gamma$ -детектор: а – фотография; б – общая принципиальная схема: 1 – преобразователь напряжения для высоковольтного источника; 2 – зарядочувствительный усилитель; 3 – кран для наполнения детектора газом; 4 – блок высоковольтного питания; 5 – керамический гермоввод; 6 – цилиндрическая ионизационная камера; 7 – анод; 8 – термоизоляция; 9 – корпус ионизационной камеры; 10 – защитный алюминиевый корпус

Гамма-спектрометры на основе сжатого ксенона (ксеноновые  $\gamma$ -детекторы (КГД)) лишены этих недостатков и могут оказаться весьма перспективными для использования их в составе различных портальных мониторов, в том числе и для проведения контрольных измерений на таможне.

В данной статье представлены результаты исследования возможности использования ксеноновых  $\gamma$ -спектрометров, разработанных в Национальном исследовательском ядерном университете МИФИ (НИЯУ МИФИ) [1, 2], для таможенного контроля за перемещением делящихся и радиоактивных веществ.

### Описание ксенонового $\gamma$ -спектрометра

Основой  $\gamma$ -детектора (рис. 1) является заполненная сжатым ксеноном цилиндрическая ионизационная камера (ИК) с экранирующей сеткой. Камера работает в импульсном режиме.

Зарядочувствительный усилитель 2 предназначен

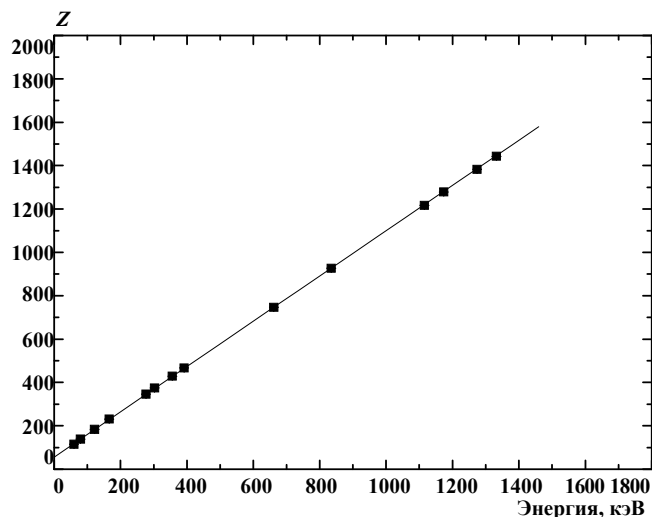


Рис. 2. Зависимость положения гамма-пика от энергии гамма-квантов

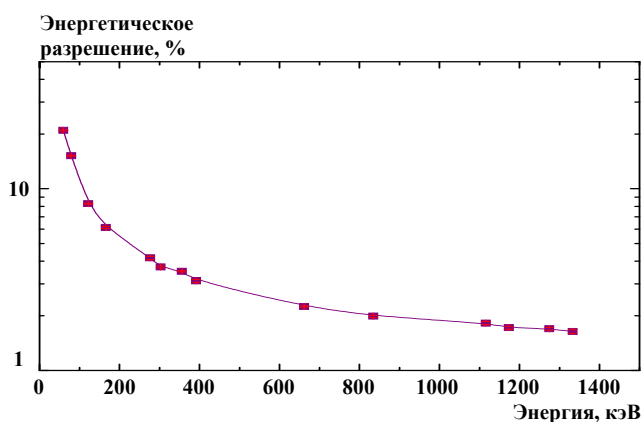


Рис. 3. Зависимость энергетического разрешения от энергии гамма-квантов

для усиления электрического сигнала, возникающего на аноде при взаимодействии гамма-квантов с рабочим веществом ионизационной камеры – ксеноном. Высоковольтный источник питания 4 обеспечивает напряжение 20 и 10 кВ, подаваемые на корпус (катод) гамма-детектора 10 и экранирующую сетку 9 соответственно. Заполнение детектора рабочим веществом осуществляется через газовый кран 3. Корпус ИК с толщиной стенки 3 мм обеспечивает двукратный запас механической прочности. Наружный алюминиевый корпус 10 предназначен для герметичности и защиты гамма-детектора от внешних механических воздействий. На лицевой панели детектора имеются разъемы, через которые обеспечивается питание детектора и вывод полезного сигнала.

Общие характеристики КГД: энергетический диапазон регистрируемых гамма-квантов – 0,05 – 5 МэВ; плотность ксенона – 0,35 г/см<sup>3</sup>; чувствительный объем – 2000 см<sup>3</sup>; масса – 5 кг; габариты – диаметр 120 мм, длина 320 мм; напряжение питания – ~220 В или + 24 В; мощность потребления – <15 Вт; ресурс работы – не менее 10 лет.

Гамма-спектрометр подключается к персональному компьютеру, в котором установлена электронная плата SBS-75 с усилителем-формирователем и многоканальным анализатором, разработанная фирмой «Green Star» [3]. В отличие от традиционных способов построения спектрометрического тракта в SBS-75 происходит преобразование амплитуды заряда в цифровой код. Такое построение тракта дает возможность устранить влияние флуктуаций времени сбора заряда. Спектрометрическая информация накапливается и обрабатывается в компьютере с помощью программного обеспечения, также разработанного фирмой «Green Star».

На рис. 2 приведена измеренная КГД зависимость положения фотопика от энергии гамма-квантов в широком энергетическом диапазоне (0,06 – 2,6 МэВ). Данные измерения хорошо описываются линейной функцией. Отклонение от линейной зависимости положения пика от энергии  $\gamma$ -квантов не превышает 0,5%.

На рис. 3 представлена зависимость энергетического разрешения КГД от энергии регистрируемых  $\gamma$ -квантов. По мере увеличения энергии  $\gamma$ -квантов, энергетическое разрешение детектора улучшается. Для  $\gamma$ -линии 662 кэВ энергетическое разрешение составляет  $\approx 2\%$ , а для  $\gamma$ -линии 1332 кэВ  $\approx 1,5\%$ .

Типичные спектры от  $\gamma$ -источников <sup>137</sup>Cs, <sup>133</sup>Ba и <sup>238</sup>U, измеренные с помощью КГД, показаны на рис. 4. Из представленных спектров отчетливо видны характерные  $\gamma$ -линии, с помощью которых можно надежно идентифицировать различные радиоактивные нуклиды.

На рис. 5 показана эффективность регистрации КГД от энергии  $\gamma$ -квантов. Эффективность регистрации составила  $\sim 10\%$  при энергии  $E \cong 100$  кэВ и  $\sim 1\%$  при энергии  $E \cong 1$  МэВ.

Поскольку эффективность КГД определяется плотностью рабочего вещества ИК (ксенона), то для увеличения чувствительности КГД достаточно просто увеличить массу рабочего вещества детектора. При этом основные спектрометрические характеристики КГД практически не изменятся. Расширить энергетический диапазон регистрируемых  $\gamma$ -квантов в области малых энергий до 30 кэВ возможно путем утончения стенок чувствительного объема детектора до 0,5 – 1,0 мм (в настоящее время его толщина составляет 3 мм). Для упрочнения тонкостенного корпуса используется композитное покрытие на основе синтетических волокон. При этом чувствительность ксенонового детектора, особенно для гамма-квантов малых энергий, также увеличится.

На рис. 6 приведена зависимость энергетического разрешения от температуры для КГД и для  $\gamma$ -детектора на основе кристаллов CZT. Как видно из рисунка, энергетическое разрешение КГД остается постоянным при увеличении температуры до  $80^\circ\text{C}$ , в то время как для CZT-детектора оно ухудшилось более чем в 4 раза.

Более подробное описание КГД можно найти в работах [4 – 6].

#### Чувствительность ксенонового детектора к РДМ

В портальных мониторах обычно используются  $\gamma$ -детекторы на основе пластиковых или неорганических сцинтилляторов [7 – 9], с помощью которых определяется превышение числа зарегистрированных гамма-квантов над естественным фоном. Фактически эти детекторы используются как простые счетчики регистрируемых частиц.

Ограниченные спектрометрические возможности таких детекторов резко снижают их чувствительность к радиоактивным материалам. Это особенно ярко проявляется при регистрации РДМ, имеющих слабое (на уровне фона)  $\gamma$ -излучение. В этом случае гамма-источники, излучение которых не превышает статистических флуктуаций естественного фона (в пределах трех стандартных отклонений), при малых временных экспозициях (1 – 2 с) вообще не могут быть обнаружены портальными мониторами, оборудованными пластиковыми сцинтилляторами.

Использование в портальных мониторах  $\gamma$ -спектрометров с высоким энергетическим разрешением открывает принципиально новые возмож-

ности как для обнаружения, так и для идентификации различных  $\gamma$ -источников.

Важной особенностью спектрометрических  $\gamma$ -детекторов является возможность анализировать в измеряемых спектрах конкретные пики полного

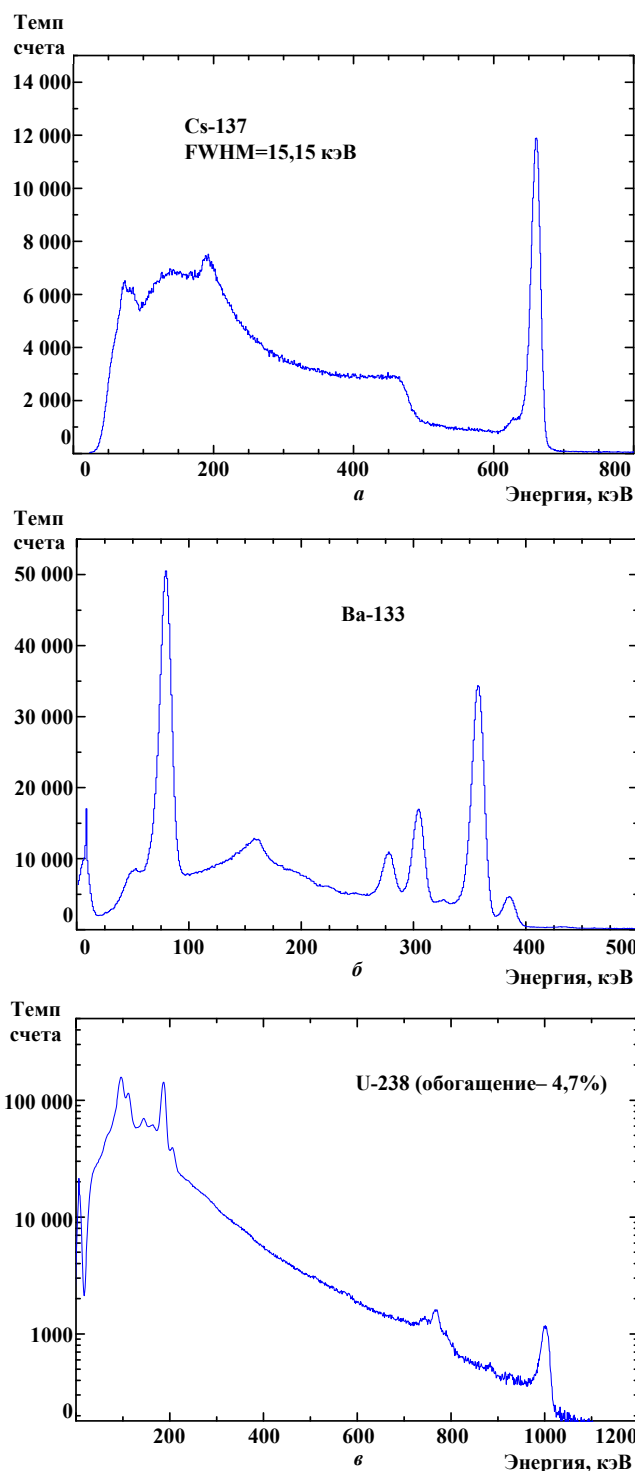


Рис. 4. Гамма-спектры источников  $^{137}\text{Cs}$  (а),  $^{133}\text{Ba}$  (б) и  $^{238}\text{U}$  (е), измеренные ксеноновым гамма-детектором

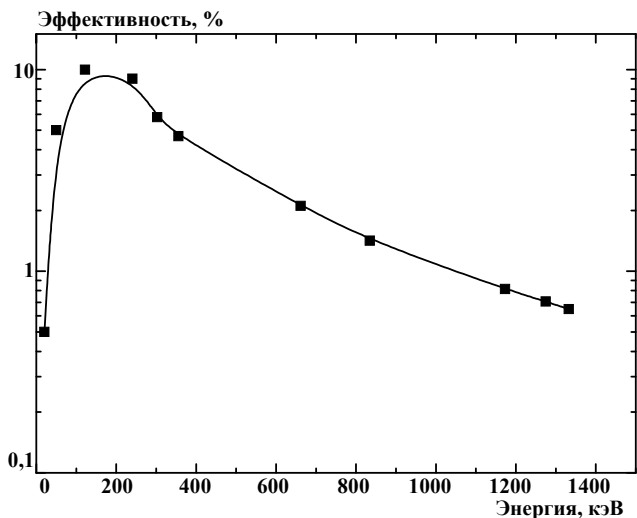


Рис. 5. Зависимость эффективности регистрации гамма-квантов от их энергии

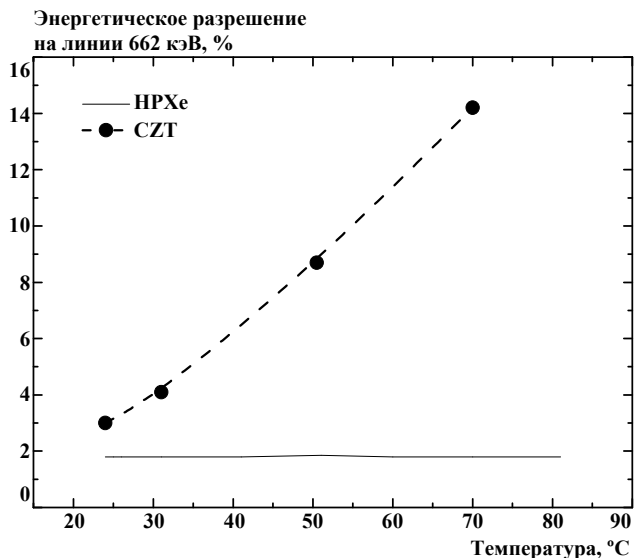


Рис. 6. Зависимость энергетического разрешения от температуры ксенонного гамма-спектрометра и CZT-детектора [7]

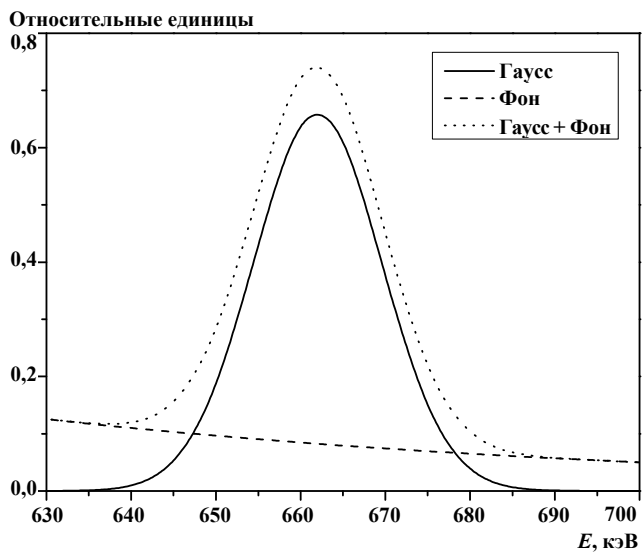


Рис. 7. Распределение частиц в фоне и пике полного поглощения гамма-квантов

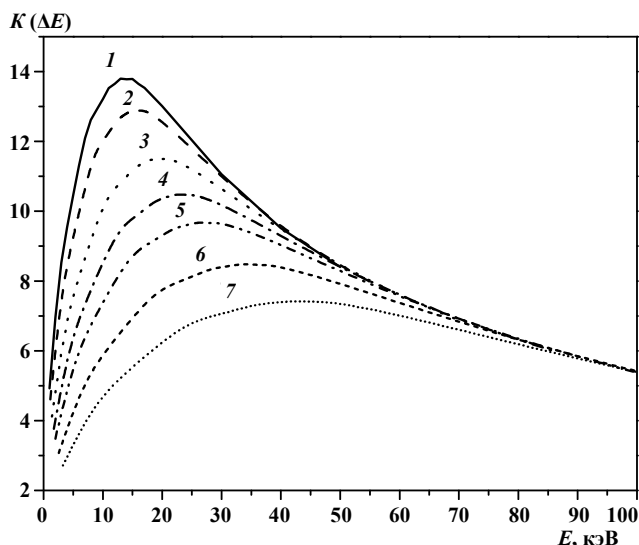


Рис. 8. Чувствительность детектора в зависимости от величины интервала сканирования при различных значениях энергетического разрешения гамма-детектора: 1 – 14 кэВ; 2 – 16 кэВ; 3 – 20 кэВ; 4 – 24 кэВ; 5 – 28 кэВ; 6 – 36 кэВ; 7 – 46 кэВ

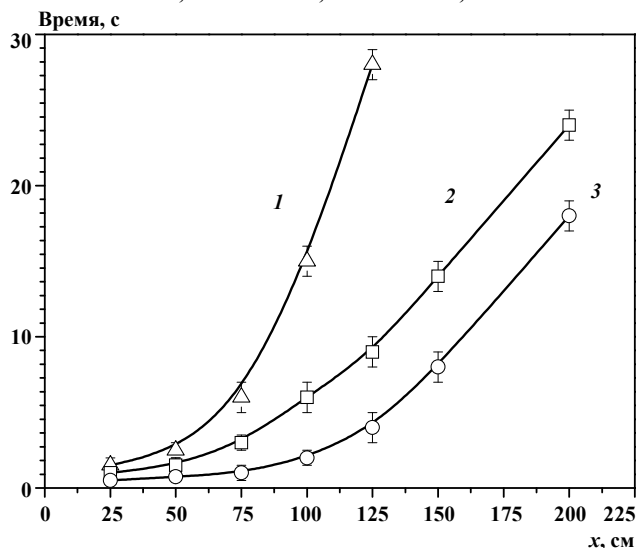


Рис. 9. Зависимость минимального времени экспозиции радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  (75 кБк) от расстояния до боковой стенки  $x$  детектора при различных интервалах сканирования  $\Delta E$  гамма-спектра: 1 – 1000 кэВ; 2 – 100 кэВ; 3 – 20 кэВ

поглощения  $\gamma$ -квантов и сравнивать число соответствующих им  $\gamma$ -квантов с фоновым излучением в соответствующем энергетическом интервале.

В качестве критерия чувствительности  $K(\Delta E)$  спектрометрического детектора можно выбрать отношение полного числа зарегистрированных  $\gamma$ -квантов конкретного пика в измеренном спектре к среднеквадратичному отклонению фона в энергетическом диапазоне  $\Delta E$ , соответствующему ширине анализируемого пика. Если пик полного поглощения для определенности выбрать в виде

распределения Гаусса, а фон в виде экспоненты, то чувствительность  $K(\Delta E)$   $\gamma$ -детектора можно записать в следующем виде:

$$K(\Delta E) = \frac{\int_{E_0 - \frac{\Delta E}{2}}^{E_0 + \frac{\Delta E}{2}} \frac{N_0}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(E-E_0)^2}{2\sigma^2}} dE}{\left[ \int_{E_0 - \frac{\Delta E}{2}}^{E_0 + \frac{\Delta E}{2}} \alpha e^{-\beta E} dE \right]^{\frac{1}{2}}},$$

где  $\Delta E$  – энергетический интервал, в котором осуществляется интегрирование;  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение распределения Гаусса, описывающего форму  $\gamma$ -линии;  $\alpha, \beta$  – коэффициенты, определяющие экспоненциальное распределение фона.

Вычисления  $K(\Delta E)$  были проведены для различных значений энергетического диапазона интегрирования ( $\Delta E$ ) и ширины пика полного поглощения  $\gamma$ -квантов (FWHM).

При расчетах предполагалось, что общее число  $\gamma$ -квантов в пике полного поглощения не превышает величину фона на одну десятую стандартного отклонения в энергетическом интервале (100 – 1000 кэВ).

Распределения регистрируемых  $\gamma$ -квантов в пике полного поглощения для энергии  $\gamma$ -квантов 662 кэВ и естественного фона, которые использовались в расчетах, показаны на рис. 7.

Результаты расчета чувствительности  $K(\Delta E)$   $\gamma$ -спектрометра в зависимости от интервала интегрирования –  $\Delta E$ , нормированного на  $\sigma$ , представлены на рис. 8.

Из этого рисунка следует, что максимальная чувствительность  $\gamma$ -детектора достигается при

$$\Delta E/\sigma = 2,36.$$

Это означает, что для обеспечения максимальной чувствительности  $\gamma$ -детектора следует проводить интегрирование в области исследуемой  $\gamma$ -линии с энергетическим интервалом, соответствующим ширине  $\gamma$ -пика на полувысоте.

Из рисунка видно, что чувствительность  $\gamma$ -детектора резко уменьшается с ухудшением его энергетического разрешения.

Анализ результатов расчетов, представленных на рис. 8, позволяет сделать следующие выводы:

– максимальная чувствительность  $\gamma$ -детектора достигается при использовании оптимальных энергетических диапазонов интегрирования, ширина которых равна энергетическому разрешению  $\gamma$ -детектора для конкретной энергии  $\gamma$ -излучения;

–  $\gamma$ -детекторы с более высоким энергетическим разрешением обладают большей чувствительностью к регистрируемому  $\gamma$ -излучению.

Проведенные расчеты показывают, что чувствительность КГД с энергетическим разрешением ~ (12 – 14) кэВ (на линии 662 кэВ) в несколько раз выше, чем у сцинтилляционных  $\gamma$ -детекторов, имеющих энергетическое разрешение ~50 кэВ.

В том случае, если интенсивность регистрируемой  $\gamma$ -линии будет превышать фоновый поток  $\gamma$ -квантов в конкретном энергетическом диапазоне в меньшее число раз, чем это показано на рис. 7, то чувствительность ( $K(\Delta E)$ )  $\gamma$ -детектора также уменьшится в соответствующее число раз, но общий характер ее зависимости от величины энергетического разрешения будет сохраняться.

### Экспериментальная проверка метода

С целью проверки результатов расчетов, касающихся оценки чувствительности КГД к обнаружению гамма-излучения, был проведен ряд измерений.

В качестве  $\gamma$ -источника использовался  $^{137}\text{Cs}$  (с активностью 75 кБк), который располагался на различных расстояниях от двухлитрового ксенонного  $\gamma$ -детектора.

Время экспозиции изменялось от 0,25 с до нескольких десятков секунд. В процессе измерений определялось минимальное время экспозиции, при котором чувствительность КГД  $K(\Delta E)$  превышала фон на три стандартных отклонения. Результаты измерений показаны на рис. 9.

Из рис. 9 следует, что наилучшая чувствительность КГД (или минимальное время экспозиции) достигается при сканировании измеренного спектра переменными энергетическими интервалами ( $\Delta E$ ), которые соответствуют энергетическому разрешению КГД, что подтверждается ранее сделанными расчетами.



Рис. 10. Портальный монитор «ВНИИЭМ-ПМ», в верхней части которого установлен КГД

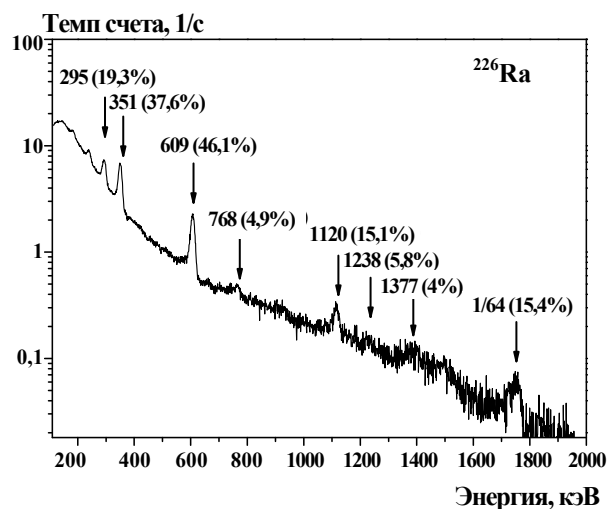


Рис. 11. Спектр гамма-источника  $^{226}\text{Ra}$  (активность 50 кБк)



При небольших расстояниях между  $\gamma$ -источником и КГД ( $\sim 25$  см) минимальное время обнаружения слабо зависит от ширины энергетического интервала сканирования ( $\Delta E$ ) (рис. 9).

Это объясняется тем, что при малых расстояниях интенсивность потока  $\gamma$ -излучения, попадающего в рабочий объем детектора, достаточно велика и регистрация необходимого числа гамма-квантов для обнаружения исследуемого гамма-источника осуществляется за короткое время экспозиции ( $\sim 1$  с), которое слабо зависит от величины ( $\Delta E$ ).

При удалении гамма-источника от КГД кривые на рис. 9 заметно расходятся. На расстоянии  $\sim 75$  см время, необходимое для обнаружения  $\gamma$ -источника при обработке экспериментальных данных по методике сканирующих интервалов, оказалось почти в 7 раз меньше, чем при обработке спектра простым подсчетом зарегистрированных  $\gamma$ -квантов (режим обычного интегрального счетчика).

Проведенные измерения подтверждают ранее выполненные расчеты и демонстрируют возможность увеличения чувствительности КГД за счет использования методики сканирующих интервалов при анализе измеренных гамма-спектров.

Испытания КГД [10] проводились также в составе многофункционального портального монитора «ВНИИЭМ-ПМ» (рис. 10), разработанного в ФГУП «НПП ВНИИЭМ» для проверки пассажиров и их багажа при пересечении контрольных пунктов.

Помимо КГД для установления личности пассажира портальный монитор был оборудован цифровой видеокамерой, голосовым анализатором и тепловизором. Информация, поступающая от различных датчиков и детекторов портального монитора, в режиме реального времени выводилась на экран дисплея с соответствующими рекомендациями для оператора-контролера.

С помощью КГД, помимо обнаружения радиоактивного источника, одновременно осуществлялась и его идентификация. Время экспозиции, обеспечивающего набор гамма-спектра с необходимым уровнем статистики, составило несколько секунд.

На рис. 11 показан спектр гамма-источника  $^{226}\text{Ra}$  с активностью 50 кБк, измеренный КГД в течение 5 с.

Обработка этого спектра методом сканирующего энергетического интервала позволила обнаружить данный гамма-источник. Его идентифи-

кация была осуществлена с помощью программного обеспечения, разработанного фирмой «Green Star» специально для решения задач таможни контроля.

Результаты испытаний КГД в составе портального монитора «ВНИИЭМ-ПМ» демонстрируют реальную возможность его эффективного использования как для обнаружения, так и для идентификации  $\gamma$ -источников.

Следует также отметить, что используемый КГД имел сравнительно небольшой чувствительный объем (2 л), и, тем не менее, его чувствительность оказалось вполне достаточной для эффективной работы портального монитора. При необходимости чувствительность КГД можно повысить в несколько раз за счет увеличения его рабочего объема.

Таким образом, включение в состав портальных мониторов ксеноновых гамма-спектрометров, оснащенных соответствующим программным обеспечением, позволяет значительно повысить их чувствительность, что безусловно способствует решению задачи эффективного обнаружения и идентификации различных радионуклидов уже на первом этапе радиационного контроля.

Результаты, представленные в данной статье, демонстрируют реальную возможность использования КГД в различных системах радиационного контроля (например в порталах) для обнаружения и идентификации радиоактивных и ядерных материалов.

Данная работа была проведена при поддержке МАГАТЭ, Контракт № 12599.

### Литература

1. High Pressure Xenon Gamma-Spectrometers with High Energy Resolution / V.V. Dmitrenko, V.M. Gratchev, S.E. Ulin et al. // Nuclear Science Symposium, 1996. Conference Record. – 1996. – Vol. 1. – P. 393 – 397.
2. Gamma-ray spectrometric equipment for detecting nuclear materials / S.E. Ulin, I.V. Chernycheva, V.V. Dmitrenko et al. // Proc. of SPIE. – 1999. – Vol. 3768. – P. 271 – 279.
3. Сайт фирмы «GreenStar». – Режим доступа: [www.greenstar.ru](http://www.greenstar.ru), свободный.
4. High-pressure xenon detectors for gamma-ray spectrometry / V.V. Dmitrenko, V.M. Gratchev, S.E. Ulin et al. // Applied Radiation and Isotopes. – 2000. – Vol. 52. – № 3. – P. 739 – 743.
5. Ulin S.E., Dmitrenko V.V., Grachev V.M. et al. // Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – USA: SPIE - International Society for Optical Engineering, 2001. – Vol. 4507. – P. 221 – 225.

6. High-Pressure Xenon Ion Chambers for Gamma-Ray Spectroscopy in Nuclear Safeguards / D.H. Beddingfield, A. Beyerle, P.A. Russo et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – Netherlands: Elsevier Science Publishing Company, Inc, 2003. – Vol. A 505. – P. 474 – 477.
7. Baseline suppression of vehicle portal monitor gamma count profiles: A characterization study / Presti C.A. Lo, Weier D.R., Kouzes R.T. et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – Netherlands: Elsevier Science Publishing Company, Inc, 2006. – Vol. A 562. – № 1. – P. 281 – 297.
8. The response of radiation portal monitors to medical radionuclides at border crossings / R.T. Kouzes, E.R. Siciliano // Radiation Measurements. – Netherlands: Elsevier Science Publishing Company, Inc, 2006. – Vol. 41. – № 5 – P. 499 – 512.
9. Comparison of PVT and NAI(TL) scintillators for vehicle portal monitor application / E.R. Siciliano, J.H. Ely, R.T. Kouzes et al. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – Netherlands: Elsevier Science Publishing Company, Inc, 2005. – Vol. A 550. – P.647 – 674.
10. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне / К.Ф. Власик, В.М. Грачёв, В.В. Дмитренко и др. // Приборы и техника эксперимента. – М.: Наука, 1999. – № 5. – С. 114 – 122.

Поступила в редакцию 01.02.2010

**Сергей Евгеньевич Улин**, д-р физ.-мат наук, профессор, т. 324-65-89, e-mail: [seulin@gmail.com](mailto:seulin@gmail.com).

**Валерий Васильевич Дмитренко**, д-р физ.-мат наук, профессор, зав. кафедры №7, т. 324-65-89, e-mail: [VVDmitrenko@mephi.ru](mailto:VVDmitrenko@mephi.ru).

**Виктор Михайлович Грачев**, канд. физ.-мат наук, доцент, т. 324-65-89, e-mail: [VGrachev@mephi.ru](mailto:VGrachev@mephi.ru).

**Константин Федорович Власик**, канд. физ.-мат наук, ст. научный сотрудник, т. 324-65-89.

**Зияэтин Мухаммедович Утешев**, канд. физ.-мат наук, ст. научный сотрудник, т. 324-65-89.

**Артем Дмитриевич Ищенко**, инженер, т. 324-65-89.

**Антон Геннадьевич Духвалов**, ассистент, т. 324-65-89.

**Кирилл Александрович Боярчук**, д-р физ.-мат. наук, зам. генерального директора-генерального конструктора, т. 366-12-01.

**Владимир Яковлевич Геча**, д-р техн. наук, гл. конструктор, руководитель Испытательного центра, начальник отдела, т. 365-26-69.