

# Аппаратура обнаружения, локализации и идентификации радиоактивных источников и материалов

А. Н. Толкачев, И. А. Лагуцкий, А. В. Антонов, В. А. Чирикало, А. А. Кийко  
Научно-производственное унитарное предприятие «АТОМТЕХ», г. Минск, Республика Беларусь  
info@atomtex.com

**Аннотация.** Доклад содержит описание, принцип действия и технические характеристики носимого спектрометрического оборудования, которое может быть использовано в пунктах таможенного и пограничного контроля. Данное оборудование позволяет обеспечить обнаружение и идентификацию радионуклидов, измерение мощности дозы гамма-излучения, быстрое реагирование на изменение радиационных уровней.

**Ключевые слова:** спектрометр; идентификация; мощность дозы

## I. ВВЕДЕНИЕ

В целях предотвращения незаконного перемещения ядерных материалов и радиоактивных МАГАТЭ в 1997 г. была запущена программа *ITRAP (Illicit Traffic Assessment Program)*, согласно которой пункты пропусков на границах должны оборудоваться специальным досмотровым оборудованием регистрирующим гамма и нейтронное излучение в проходящем потоке грузов и пассажиров [1, 2].

По классификации международной электротехнической комиссией (МЭК) носимые приборы радиационной защиты делятся на: носимые на теле (*body-worn instruments*) и ручные-портативные приборы (*handheld or portable instruments*). Используемые сокращения, обозначающие тип, конструкцию и определённые рабочие требования к разрабатываемым приборам, указанные в соответствующих стандартах следующие:

- *SPRD (Spectroscopy Personal Radiation Detector)* – персональный детектор радиации спектрометрического типа [4];
- *RID (Radionuclide Identification Device)* – прибор идентификации радионуклидов [3];
- *BRD (Backpack Radiation Detector)* – прибор радиационной защиты, размещаемый в рюкзаке [5].

Предприятие АТОМТЕХ, опираясь на действующие стандарты [8, 9] по измерению ионизирующих излучений и стандарты по приборам радиационной защиты, разработанные МЭК [3, 4, 5] на протяжении более чем 15 лет, разрабатывает и производит оборудование спектрометрического типа,

предназначенное для поиска и идентификации гамма-излучающих радионуклидов. Основой оборудования такого класса является высокочувствительные сцинтилляционные детекторы различных типоразмеров и фотоэлектронный умножитель. Также для расширения диапазона измерения мощности дозы и безопасности оператора предусмотрен дополнительно счетчик Гейгера–Мюллера, который расположен в корпусе прибора или блоке обработке информации.

## II. ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

В приборе МКС-АТ1321 (рис. 1) используется сцинтилляционный кристалл NaI(Tl) с размерами  $\varnothing 25 \times 40$  мм. Данный прибор относится к типу SPRD, выполнен в виде моноблока, имеет небольшие размеры и вес, что позволяет использовать его при повседневной и оперативной работе при досмотре транспортных средств, грузов, багажа и пассажиров в пунктах пропуска таможенного и пограничного контроля.



Рис. 1. Прибор МКС-АТ1321

Многофункциональный носимый спектрометр гамма-излучения МКС-АТ6102 и его модификации МКС-АТ6102А (NaI(Tl) –  $\varnothing 40 \times 40$  мм), МКС-АТ6102В (NaI(Tl) –  $\varnothing 40 \times 80$  мм) выполнены в виде моноблока и относятся к классу приборов RID, который совмещает в

себе спектрометрический гамма-канал и счетный нейтронный канал (МКС-АТ6102).



Рис. 2. Прибор-МКС АТ6102

Конструкция и габариты прибора обеспечивают возможность работы одной рукой. При подключении по кабелю внешних блоков детектирования альфа и бета излучения (БДПА-01, БДПБ-01) можно проводить обследование различных поверхностей, объектов или рабочих мест на предмет альфа- и бета-загрязнённости, а также измерять мощность дозы нейтронного излучения (БДКН-03).

Спектрометр АТ1120М и его модификации выполнен в виде спектрометрического блока детектирования, подключаемого по кабелю к блоку обработки информации.



Рис. 3. Прибор МКС-АТ1120М

В качестве блока обработки информации выступает портативный компьютер с операционной системой андроид с расширительным элементом, который включает в себя счетчик Гейгера–Мюллера и разъем для подключения кабеля.

### III. НАСТРОЙКА И ГРАДУИРОВКА

Спектрометрический тракт представленного оборудования содержит аналого-цифровой преобразователь (АЦП) на 1024 канала. Особенностью спектрометров является наличие сквозного тракта стабилизации с использованием в качестве реперного источника оптического излучения светодиод. В специальном режиме включения светодиод имеет стабильные оптические, временные и температурные характеристики. С помощью управляющего сигнала, поступающего со схемы светодиодной стабилизации, производится цифровая подстройка коэффициента усиления путем изменения высокого напряжения. Такая система обеспечивает хорошую (в пределах 1 %) стабильность энергетической шкалы спектрометра за время непрерывной работы.

Для каждого спектрометра на этапе производства выполняется:

- определение температурной характеристики в рабочем диапазоне  $-20^{\circ}\text{C}$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ;
- градуировка по энергии и разрешению 20–3000 keV;
- калибровка по мощности дозы 0.03–300  $\mu\text{Sv/h}$ ;
- калибровка встроенного счетчика Гейгера–Мюллера 1  $\mu\text{Sv/h}$  – 100 mSv/h.

#### A. Энергетическое разрешение, идентификация

Важной характеристикой прибора спектрометрического типа используемого для идентификации радионуклидного состава является энергетическое разрешение. Обычно разрешение рассчитывается по пику полного поглощения Cs-137 662 keV, согласно (1).

$$R = \frac{\Delta E}{E_0} \cdot 100\% , \quad (1)$$

где  $\Delta E$  – полная ширина пика на полувысоте,  $E_0$  – центр пика.

Энергетическое разрешение определяет, насколько близко могут находиться в спектре две линии, которые спектрометр позволяет идентифицировать как разные. Таким образом, спектрометр с меньшим разрешением способен более быстро и точно определять состав сложных радионуклидных смесей.

Выбор в качестве контрольных и образцовых источников на основе Cs-137 широко распространен в мире и применяются при проверке и калибровке аппаратуры радиационного контроля, а пик полного поглощения Cs-137 с энергией 662 keV располагается в средней области энергетической шкалы.

Модификация спектрометра МКС-АТ1120МЕ выделяется на фоне нашего остального оборудования с возможностями идентификации тем, что здесь применен новый блок детектирования гамма-излучения БДКГ-05С на основе сцинтиллятора  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  размером  $\varnothing 38 \times 38$  мм. Ключевыми преимуществами данного кристалла являются высокая чувствительность к гамма-излучению и высокое энергетическое разрешение ( $\sim 3,2\%$  для линии 662 кэВ изотопа Cs-137) [7].

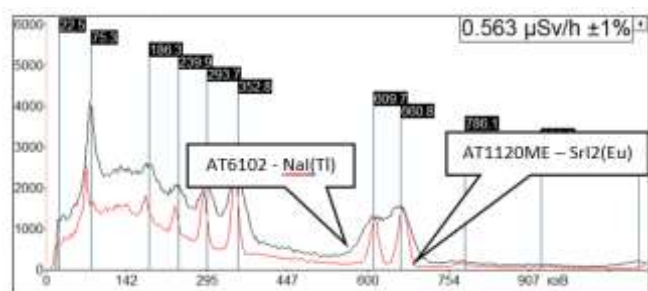


Рис. 4. Пример спектра смеси радионуклидов Cs-137 и Ra-226 измеренного спектрометрами с детекторами на основе NaI(Tl) – АТ6102 и SrI2(Eu) – АТ1120МЕ

На рис. 4 представлено сравнение двух спектров набранных при помощи приборов на основе детектора NaI(Tl) (МКС-АТ6102 R=7.5 %) и  $\text{SrI}_2(\text{Eu})$  (МКС-АТ1120МЕ R=3.2 %). В качестве радионуклидного источника выступали источники Cs-137 и Ra-226 с сопоставимой активностью. Основной проблемой в идентификации такой смеси является то, что два пика полного поглощения 609 keV (Ra-226) и 662 keV (Cs-137), располагаются близко друг к другу. Для детектора с худшим разрешением (NaI(Tl)) эти пики перекрываются, образуя трудно решаемый мультиплет, в то время как для детектора с лучшим разрешением ( $\text{SrI}_2(\text{Eu})$ ) пики хорошо разделяются и могут быть более быстро и легко идентифицированы в соответствии с библиотекой радионуклидов.

Алгоритм идентификации в исследуемом объекте основан на автоматическом определении положения и интенсивностей пиков полного поглощения набираемого спектра и сопоставлении найденных пиков с библиотекой радионуклидов. Библиотека радионуклидов располагается в энергонезависимой памяти прибора и содержит до 33 элементов, разделенных на следующие категории – промышленные, медицинские, естественные и при необходимости ядерные.

Библиотека радионуклидов представлена следующими радионуклидами:

- естественные – K-40, Th-232, Ra-226, Th-228;
- промышленные – Am-241, Ba-133, Co-57, Co-60, Cs-137, Ir-192, Na-22, Mn-54, Eu-152, Se-75, Cd-109, Cs-134, Pu-238, Sr-90;
- медицинские – Ga-67, I-123, I-125, I-131, In-111, Tc-99m, Tl-201, Xe-133, Cr-51, Mo-99, F-18.

Библиотеку можно адаптировать под конкретные требования потребителя, добавить или удалить какие-либо радионуклиды или создать специальную

библиотеку, например для задач радиационного контроля на атомной станции.

#### В. Определение мощности амбиентного эквивалента дозы

Мощность амбиентного эквивалента дозы (далее мощность дозы) в спектрометрах рассчитывается по измеренному спектру. Спектр разбивается на определенное количество энергетических окон, в которых определяется скорость счета, которая умножается на значение оператора спектр-доза для этого окна, затем полученные значения суммируются в соответствии с (2). Значения оператора спектр-доза, для каждого спектрометра или блока детектирования определяются на основании полученных методом моделирования Монте-Карло аппаратурных функций отклика на моноэнергетическое гамма-излучение в заданном энергетическом диапазоне, при этом необходимо учесть все конструкционные и физические особенности прибора (тип используемого сцинтилляционного кристалла, размеры, материалы корпуса) [6].

$$P = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^m S_i F_i \quad (2)$$

где P – мощность дозы,  $S_i$  – сумма импульсов в i-ом энергетическом интервале аппаратурного спектра, измеренного за время t,  $F_i$  – значение операционной функции, соответствующее i-ому энергетическому интервалу, m – число энергетических интервалов.

Таким образом, представленное оборудование обеспечивает проведение радиационного мониторинга с измерением мощности дозы в широком диапазоне. При достижении предела измерения со сцинтилляционным детектором, в приборе реализовано автоматическое переключение на измерения мощности дозы встроеным счетчиком Гейгера-Мюллера.

#### С. Чувствительность, поиск радиоактивных источников

Часто при выборе оборудования для поиска и локализации радиоактивных материалов обращают внимание на такой параметр как чувствительность, который определяется как отношение количества зарегистрированных в единицу времени импульсов к измеряемой величине, в данном случае к мощности дозы гамма-излучения ( $1 \mu\text{Sv/h}$ ). Чувствительность экспериментально определяется на установке дозиметрической гамма-излучения в точке с определенной мощностью дозы от выбранного источника (Cs-137, Co-60, Am-241). Этот параметр напрямую зависит от чувствительного объема детектора и качества сцинтилляционной сборки, обработки выходного сигнала. В таблице 1 представлено сравнение представленного оборудования по чувствительности и энергетическому разрешению. Видно, что детектор большего объема будет более чувствителен, а, следовательно, и быстрее реагировать на изменение

радиационной обстановки, но соответственно возрастет его вес и габариты.

ТАБЛИЦА I. СРАВНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ К ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ Cs-137

Прибор	Тип и размеры кристалла, мм	Энергетическое разрешение (Cs-137), %	Чувствительность (Cs-137), cps / [μSv/h]
МКС-АТ1321	NaI(Tl) 25x40	6.9–7.5	450
МКС-АТ6102, МКС-АТ6102А, МКС-АТ1120МА	NaI(Tl) 40x40	6.8–8.0	850
МКС-АТ1120МЕ	SrI2(Eu) 38x38	3.0–3.5	900
МКС-АТ6102В	NaI(Tl) 40x80	7.0–8.0	1600
МКС-АТ1120М	NaI(Tl) 63x63	7.0–8.0	2500

Поисковый алгоритм в приборах основан на анализе мгновенной скорости счета гамма-излучения, зарегистрированного сцинтиляционным детектором и сопоставлении ее с измеренным в начале поиска радиационным фоном. В случае превышения срабатывает тревожная сигнализация и автоматически начинается идентификация радионуклидного состава.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное в докладе оборудование разработки и производства предприятия АТОМТЕХ отвечает необходимым отечественным и международным нормам и требованиям, является сертифицированным оборудованием на территории таможенного союза России, Беларуси и Казахстана. Это оборудование в настоящий момент используется в пограничных и других службах этих государств, а также широко применяется за рубежом (Китай, ОАЭ, Франция, Италия и др.) и позволяет решать большой круг задач, связанных с оперативной оценкой радиационной обстановки, обнаружением, локализацией и идентификацией гамма-

излучающих радионуклидов. Следует отметить, что приборы оснащены модулями геопозиционирования, передатчиками bluetooth, а также позволяют работать при подключении к персональному компьютеру при использовании соответствующего программного обеспечения

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Обнаружения радиоактивных материалов на границе. IAEA-TECDOC-1312. МАГАТЭ, 2003
- [2] Предотвращение непреднамеренного перемещения и незаконного оборота радиоактивных материалов. IAEA-TECDOC-1311. МАГАТЭ, 2003.
- [3] IEC 62327:2017 - Приборы защиты от радиации. Ручные приборы для обнаружения и идентификации радионуклидов и индикации интенсивности дозового эквивалента фотонной радиации в окружающей среде.
- [4] IEC 62618:2022 Аппаратура для радиационной защиты. Персональные детекторы излучения спектроскопического типа (SPRD) для обнаружения контрабандной перевозки радиоактивных материалов.
- [5] IEC 62694:2022 Radiation protection instrumentation - Backpack-type radiation detector (BRD) for the detection of illicit trafficking of radioactive material
- [6] Горев В.С., Единович З.А., Кожемякин В.А., Фоминых В.И., Шульгович Г.И., Юрятин Е.Н., Янович Л.А. Измерение малых уровней гамма-излучения спектрометрическим методом с использованием оператора преобразования «спектр-доза». Метрология, 1983, N10, стр. 55-62.
- [7] Комар Д.И., Лагуцкий И.А., Антонов А.В., Антонов В.И. Применение кристалла SrI2(Eu) в задачах спектрометрии гамма-излучения // Международная конференция «Ядро-2022»: тезисы, г. Москва, 11-16 июля 2022 г. / МГУ им. Ломоносова. Москва, 2022. С. 402.
- [8] ГОСТ 4.59-79 Система показателей качества продукции (СПКП). Средства измерений ионизирующих излучений. Номенклатура показателей.
- [9] ГОСТ 26874-86 Спектрометры энергий ионизирующих излучений. Методы измерения основных параметров.