

УДК 59.43

СПЕКТРОМЕТРЫ–РАДИОМЕТРЫ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ. ТРЕБОВАНИЯ, ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ, ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ

Кочергин А. В., зав. лаб.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт "Искра",

г. Луганск

91033, Луганск, ул. Звейнека, 145с

E-mail: official@iskra.lugansk.ua

Представлений огляд сучасного стану розвитку приладів для оперативного контролю радіаційної обстановки в польових умовах. Наданий короткий аналіз вимог, що пред'являються до приладів даного класу. Розглянуті типові рішення приладів і деякі перспективні напрями поліпшення тактико-технічних характеристик.

Ключові слова: спектрометр-радіометр, іонізуючі випромінювання, детектор, оперативний контроль

The review of development modern state of the devices for operative control of radiation environment in the field conditions is presented in the article. The brief analysis of requirements to this class of devices is given. The decisions of devices models and some perspective directions of performance improvement are considered.

Key words: spectrometer-radiometer, ionizing radiations, operative control

Введение. В последние годы все более широкое распространение получают полупрофессиональные приборы радиационного контроля и радиационной разведки, предназначенные для оснащения офицеров и специалистов таможи, полиции и других специальных служб, работающих непосредственно на местности в динамичной, быстро меняющейся обстановке. Основное назначение этого класса приборов - поиск и локализация несанкционированного перемещения радиационных материалов и оперативный контроль радиационной обстановки на местности в случае радиационной аварии. Причем задача зачастую не ограничивается измерением дозовых характеристик поля. Важно также определить потоковые характеристики поля, спектральный состав излучения и радионуклидный состав загрязнения с оценкой активности идентифицированных изотопов. Определенную сложность представляет собой то, что операторы подобных приборов, как правило, не являются специалистами в области измерения и классификации ионизирующих излучений. По этой причине такие приборы должны обладать встроенными интеллектуальными возможностями по обработке результатов измерения и некоторой автоматизации алгоритма принятия решения.

Базовые требования к приборам этого класса определены следующими международными стандартами:

- IEC 62327 - Radiation protection instrumentation - Hand-held Instruments for the Detection and Identification of Radioactive Isotopes and for the Measurement of Dose Rate;

- IEC 62401 – Alarming personal radiation detectors for detection of illicit trafficking of radioactive material;

- IEC 62244 – Installed radiation monitors for the

detection of radioactive and special nuclear materials at national borders;

- ISO/DIS 22188 - Monitoring for inadvertent movement and illicit trafficking of radioactive material;

- ANSI N42.38 1 WD-F1. - Performance Criteria for Spectroscopy-Based Portal Monitors used for Homeland Security.

Цель работы. Обзор приборов, отвечающих требованиям стандарта IEC 62327.

Материал и результаты исследований. Стандарт определяет основное назначение класса приборов - поиск, идентификация, количественная оценка и локализация радиоактивных материалов, а также индикация мощности эквивалентной дозы в заданных радиационной безопасности.

Документ регламентирует общие требования к приборам, требования к детекторам, спектрометрическому тракту, ПО для идентификации, библиотеке радионуклидов, средствам управления и индикации, определяет основные характеристики приборов и методы испытаний.

В частности, прибор должен функционировать в диапазоне температур от -15° С до + 50° С.

Питание прибора должно осуществляться от батарей или аккумуляторов с ресурсом не менее 50 часов работы.

Масса прибора – не более 2 кг.

Габаритные размеры – в пределах 20×30×16 см.

В части требований к детекторам определено, что прибор может иметь более, чем один детектор, по крайней мере, один из которых должен обеспечивать разделение гамма и нейтронного излучения.

Определен следующий список основных радионуклидов, которые подлежат идентификации.

Ядерные материалы: ²³³U, ²³⁵U, ²³⁹Pu, ²⁴¹Pu;

Медицинские радионуклиды: ¹⁸F, ⁶⁷Ga, ^{99m}Tc,

^{111}In , ^{192}Ir , Iodine (^{123}I , ^{125}I , ^{131}I), ^{201}Tl , ^{133}Xe ;

Природные радионуклиды (NORM): ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{238}U ;

Технические радионуклиды: ^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{192}Ir , ^{226}Ra , ^{241}Am , ^{238}Pu .

Примечание: для урана, плутония и йода достаточно указать только элемент и категорию.

Прибор должен обеспечивать выявление и идентификацию:

1) следующих радионуклидов при плотности потока гамма излучения, эквивалентной $0,5 \pm 30\%$ мкЗв/час выше фона:

– без защиты за 1 минуту: ^{111}In , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{201}Tl , ^{67}Ga , ^{133}Xe , ^{125}I , ^{123}I , ^{131}I , ^{192}Ir ;

– за 3 мм стальной защитой за 2 минуты: ^{235}U , ^{238}U , ^{57}Co , ^{241}Am ;

– за 5 мм стальной защитой за 2 минуты: ^{239}Pu , ^{233}U , ^{133}Ba , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{192}Ir ;

2) следующих комбинаций радионуклидов при плотности потока гамма-излучения, эквивалентной $5 \pm 30\%$ мкЗв/час выше фона от первого нуклида и $0,5 \pm 30\%$ мкЗв/час от второго:

– за 1 минуту без защиты $^{137}\text{Cs} + ^{239}\text{Pu}$, $^{131}\text{I} + ^{235}\text{U}$, $^{57}\text{Co} + ^{235}\text{U}$, $^{133}\text{Ba} + ^{239}\text{Pu}$.

3) следующую комбинацию радионуклидов при плотности потока гамма-излучения от каждого нуклида, эквивалентной $5 \pm 30\%$ мкЗв/час выше фона;

– за 1 минуту без защиты $^{239}\text{Pu} + ^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$.

Прибор должен реагировать на поток нейтронов, эквивалентный источнику $0,01 \mu\text{g}$. ^{252}Cf (≈ 20000 н/с) с расстояния 25 см за 10с.

Спектрометрический гамма-детектор должен иметь энергетическое разрешение, достаточное для разделения пиков полного поглощения, необходимых для идентификации радионуклидов.

Прибор должен иметь средства стабилизации шкалы измерительного тракта во всем диапазоне условий эксплуатации, обеспечивающие точность измерения, достаточную для целей идентификации.

Прибор должен иметь встроенное программное обеспечение для процедуры идентификации нуклидов из библиотеки.

Анализ требований стандарта показывает, что условия и временные ограничения процедуры измерения и идентификации приводят к тому, что в большинстве случаев результирующий гамма-спектр имеет сложный характер со значительным количеством мультиплетов, тяжелых для идентификации при реальных уровнях скорости счета, не намного превышающих фоновую. Кроме того, характеристические линии гамма-спектра библиотеки нуклидов, подлежащих поиску и идентификации, расположены по шкале энергии крайне неравномерно. Подавляющее большинство линий лежит в области до $0,5 \text{ МэВ}$.

Учитывая этот факт и относительное энергетическое разрешение возможных по условиям эксплуатации детекторов, очевидно, что число одновременно идентифицированных изотопов не может быть велико. Анализ спектра и характеристик приборов-аналогов показывает, что это количество колеблется

в диапазоне от 1 до 3 изотопов.

Обзор конструктивных решений и технических характеристик серийных приборов.

Данное направление в радиационном приборостроении развивается достаточно бурно. В последние годы ведущие фирмы мира выпустили целый ряд малогабаритных ручных полевых приборов для поиска и идентификации радионуклидов, конструкция и встроенное программное обеспечение которых требуют минимального участия оператора. В рамках одной статьи не представляется возможным рассмотреть все возможные решения, поэтому в обзор попали наиболее типовые с точки зрения авторов приборы.

Среди стран СНГ следует отметить белорусскую фирму «АтомТех» с линейкой приборов «МКС АТ6101» модификаций А, Б, С и Д и «МКС АТ6102» [1], а также российскую фирму НПЦ «АСПЕКТ» с приборами «МКС-А02» и GAMMA-1S-PS [2].

Из зарубежных аналогов наиболее заметны и типичны InSpectorTM 1000 фирмы Canberra [3], линейка приборов IdentiFINDER TARGET Instruments inc и GR-135 Science Applications International Corporation [4].

Интересен также российский поисковый дозиметр-радиометр МКС-PM1401К [5] разработки НТЦ «Экспертцентр», представляющий собой прибор с урезанным набором функций, но с минимальными массогабаритными характеристиками и большим ресурсом работы.

Анализ технических и эксплуатационных характеристик присутствующих на рынке приборов сделать некоторые выводы:

1. Практически все представленные приборы обладают несколькими детекторами. Базовые комплекты варьируются из следующего набора детекторов:

- спектрометрический детектор гамма-излучения на базе сборки сцинтиллятор (как правило NaI(Tl))-ФЭУ;

- счетчик Гейгера-Мюллера для дозиметрии рентгеновского и гамма-диапазона излучения;

- детектор нейтронов, как правило, на базе ^3He счетчика или литиевых стекол.

Возможна комплектация детектором альфа- и бета-частиц. Как правило, это присоединяемые детекторы. Лишь в нескольких случаях в качестве спектрометрического детектора применялся CdZnTe-детектор как один из вариантов комплектации.

2. Конструкционно приборы условно можно разделить на два класса.

- однокорпусные приборы со встроенными в корпус одним или более детекторами.

К ним можно отнести следующие приборы:

GR-135 miniSPEC Handheld Gamma Ray Spectrometer фирмы SAIC.

Прибор имеет от 1 до 4 детекторов в зависимости от выбранной конфигурации (всего имеется 4 типа комплектации прибора) и автоматическую энергетическую и температурную стабилизацию

шкалы измерительного тракта.

Линейка приборов identiFINDER TARGET Instruments inc.

identiFINDER – CH-Комплектация с CZT и нейтронным детектором, identiFINDER – N Стандартная комплектация, identiFINDER – NH Стандартная комплектация с нейтронным детектором.

Малогобаритный многофункциональный гамма-спектрометр МКС-АТ6102 кампани «АТОМТЕХ» республики Беларусь и спектрометр-радиометр МКС-А03 НТЦ Аспект, Россия.

- приборы с разнесенными блоками – блок управления, обработки и индикации и присоединяемые блоки детектирования.

В этом случае детекторов может быть от 2 до 5 штук.

К последним можно отнести следующие приборы:

– InSpector 1000 Канадской фирмы «CANBERRA» с подключаемыми к блоку спектрометрическому гамма детектором и нейтронным счетчиком с замедлителем;

– линейку приборов МКС-АТ6101 «АТОМТЕХ» с комплектацией от 2 до 5 детекторов.

Сюда же относится и прибор ГАММА-1S-PS НТЦ Аспект.

3. Встроенное программное обеспечение как минимум обеспечивает:

- измерение и индикацию МЭД (мощности эквивалентной дозы), причем в некоторых случаях используются разные детекторы для работы в нескольких поддиапазонах;

- процедуру идентификации нуклидов, от 1 до 3 нуклидов одновременно;

- хранение результатов измерения, как спектральных (до 300 измеренных спектров), так и результатов измерения МЭД (до 40000 результатов);

- возможность подключения нескольких детекторов, переключения между ними и между различными диапазонами измерения, в том числе и энергетическими;

тическими;

- включает в себя одну или несколько библиотек нуклидов общим числом от 27 до 200 нуклидов;

- обеспечивает интерфейс связи с удаленным компьютером по протоколу RS-232, IrDA или USB.

Процедура оценки активности идентифицированных нуклидов реализована только в 1-2 из рассматриваемых приборах, что, очевидно, связано с тем, что корректно она может быть проведена лишь в случае заранее известной геометрии измерения.

4. Во всех приборах в той или иной степени реализована процедура стабилизации энергетической шкалы спектрометрического тракта. Как правило, она осуществляется при помощи контрольного изотопа (¹³⁷Cs), встроенного или входящего в комплект поставки. В некоторых случаях калибровка осуществляется по встроенному световому релеру. Кроме того, в большинстве приборов предусмотрена цифровая термостабилизация.

5. Масса приборов лежит в диапазоне от 1,7 до 5 кг, и конструктивно они приспособлены для проведения всех операций одним оператором.

6. Минимальное время автономной работы – не менее 8 часов, что накладывает существенные ограничения на энергопотребление прибора.

Тенденции развития. Новые сцинтилляционные материалы.

Из сказанного выше очевидно, что при выборе детекторов ионизирующих излучений разработчики отдают предпочтение стандартным, проверенным временем решениям. В то же время, в течение последних 3 – 5 лет ведущие фирмы-разработчики сцинтилляторов предложили целый ряд новых сцинтилляционных материалов, предназначенных для самых различных приложений.

Некоторые новые монокристаллы фирмы Saint-Gobain Ceramics & Plastics, Inc. [6] представляют особый интерес для спектрометрии и дозиметрии рентгеновского и γ -излучений. Свойства этих материалов приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Свойства новых материалов Saint-Gobain Crystals

Свойства сцинтилляторов	BrilLanCe ^R 350	BrilLanCe ^R 380	PreLude ^R 420
Химическая формула	LaCl ₃ (Ce)	LaBr ₃ (Ce)	Lu _{1,8} Y _{0,2} SiO ₅ (Ce)
Плотность, г/см ³	3,79	5,29	7,1
Показатель преломления	~ 1,9	~ 1,9	1,81
Температура плавления, К	1135	1116	-
Гигроскопичность	+	+	-
Линейный коэф. термического расширения, 10 ⁻⁵ /К	1,1	0,8	(?)
Расщепление	<100>	<100>	-
Интегральный квантовый выход, % NaI(Tl)	70 – 90	130	75
Длина волны максимума спектра высвечивания, нм	350	380	420
Постоянная высвечивания, нс	28	16	41
Выход фотонов при 300 К, 10 ³ фотон/МэВ	49	63	32

BrilLanCe^R350 – прозрачный сцинтиллятор с превосходным энергетическим разрешением, быст-

рым высвечиванием и отличной линейностью. Его свойства подобны свойствам NaI(Tl). Однако время

высвечивания намного меньше, что и обеспечивает возможность получения лучшего энергетического разрешения. Очень похожие свойства имеет и $\text{BrilLanCe}^{\text{R}}380$. При превосходной прозрачности и линейности плотность этого материала больше, чем плотность CsI(Tl) . Интегральный квантовый выход больше, чем у NaI(Tl) . Обращает на себя внимание длина волны максимума спектра высвечивания – в обоих случаях она превосходно подходит для бищелочного фотокатода. В результате, по данным Saint-Gobain Crystals, относительное разрешение по линии Cs^{137} блоков детектирования с $\text{BrilLanCe}^{\text{R}}350$ составило 3,8 %, блоков детектирования с $\text{BrilLanCe}^{\text{R}}380$ – 2,8 %. К недостаткам этих кристаллов следует отнести их гигроскопичность.

$\text{PreLude}^{\text{R}}420$ - это активированный церием кристалл на основе лютеция. Он имеет высокую плотность, короткое время высвечивания и улучшенный квантовый выход по сравнению с $\text{BGO} (\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12})$, который имеет такую же плотность. На ФЭУ с бищелочным фотокатодом $\text{PreLude}^{\text{R}}420$ обеспечивает энергетическое разрешение 7,1 % по линии Cs^{137} . Следует также отметить весьма малый температурный коэффициент квантового выхода в температурном интервале 25 - 50°C. Он составляет всего – 0,28%/°C

Для спектрометрии и дозиметрии гамма-излучения хорошо подходит иттрий-алюминиевый перовскит, активированный церием $\text{YAP}(\text{Ce}) (\text{YAlO}_3:\text{Ce}^+)$. При интегральном квантовом выходе в 40 % от NaI(Tl) и длине волны максимума спектра высвечивания 350 нм этот стеклоподобный материал негигроскопичен, химически инертен и имеет плотность 5,55 г/см³. Короткое время высвечивания (27 нс) и малый температурный коэффициент квантового выхода в температурном интервале 25 - 50 °C (- 0,01 %/°C) обеспечивают применимость такого материала в условиях экстремальных внешних воздействий и сложной радиационной обстановке. Экспериментальные измерения энергетического разрешения показали, что блок детектирования с $\text{YAP}(\text{Ce})$ имеет энергетическое разрешение 10 % по линии Cs^{137} . Так как материал негигроскопичен, то может быть закрыт очень тонким окном и использован для детектирования заряженных частиц (α - и β -излучений).

Иттрий-алюминиевый гранат, активированный церием $\text{YAG}(\text{Ce}) (\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}^+)$, при сравнительно небольшом квантовом выходе (≈ 21 % от NaI(Tl)) также негигроскопичен и химически инертен. Длина волны максимума спектра высвечивания составляет 550 нм. Таким образом, сцинтиллятор хорошо подходит для применения с фотодиодными фотоприемниками.

Лютеций-алюминиевый гранат, активированный церием $\text{LuAG}(\text{Ce}) (\text{Lu}_3\text{Al}_5\text{O}_7:\text{Ce}^+)$ [7], относительно плотный (6.73 г/см³) и быстрый (70 нс). Длина волны максимума спектра высвечивания составляет 535 нм, что идеально для применения с фотодиодами и лавинными фотодиодами. Высокая плотность материала позволяет изготавливать эффективные детекторы небольшого размера.

Стекла для детекторов нейтронов.

Весьма сложную проблему представляет собой задача поиска и идентификации ядерных материалов.

Причин тому несколько:

- во-первых, ядерные материалы не природного (техногенного происхождения) представляют собой сложную смесь изотопов, находящихся в неравновесном состоянии;

- во-вторых, в случае цельных (компактных) образцов ядерных материалов существенную роль играют процессы взаимодействия ионизирующего излучения с материалом самого образца;

- в-третьих, в спектре образцов, особенно для плутония, весьма сложно выделить характеристические линии, уникальные для данного типа ядерных материалов.

Очевидно, что идентификация по гамма излучению, к примеру изотопов плутония, чрезвычайно затруднена. По этой причине возникает необходимость детектирования нейтронного излучения.

В последние годы для детектирования нейтронов стали часто применяться сцинтилляционные стекла, активированные церием, на основе лития. Плотность таких материалов составляет 2,4 – 2,6 г/см³. Они не слишком эффективны для детектирования γ -излучения, однако в условиях экстремальных полей могут применяться для измерения характеристик γ -полей. В условиях гамма-нейтронных полей сцинтилляционные стекла могут быть использованы для одновременного измерения компонент и идентификации частиц по форме импульса. Физические свойства стекол, выпускаемых фирмой Applied Scintillation Technologies [8] приведены в табл. 2.

Сцинтилляционные стекла выпускаются также Saint-Gobain Crystals [6], многими другими фирмами.

Недостатком детекторов, построенных на их основе является тот факт, что они работают в диапазоне тепловых нейтронов, что не позволяет эффективно их использовать во многих реальных задачах без замедлителя.

При работе в смешанных гамма - нейтронных полях перспективным выглядит направление регистрации нейтронов по протонам отдачи в пластиковом сцинтилляторе с цифровой идентификация частиц по форме сцинтилляционного импульса [12].

Таблиця 2 – Фізическіє свойства сцинтиляційних стекл

	GS1 / 2 / 3	GS10 / 20 / 30	KG1 / 2 / 3	GSF1
Плотность, г /см ³	2.66	2.50	2.42	2.42
Показатель преломления	1.06	1.55	1.57	1.58
Температура стеклования, °С	620	499	464	610
Температура размягчения, °С	650	522	490	
Коэф. термического расширения	7.0×10 ⁻⁶	9.23×10 ⁻⁶	100×10 ⁻⁶	
Длина волны максимума спектра высвечивания, нм	395	395	395	395
Относительный квантовый выход к антрацену	22% ~ 34%	20% ~ 30%	20%	
Время высвечивания, нс	50 ~ 70	50 ~ 70	50 ~ 70	50 ~ 70
Разрешение по тепловым нейтронам, полученное с замедленными Po/Be нейтронами	13% ~ 22% (GS2)	13% ~ 22% (GS2)	20% ~ 30% (KG2)	

Выводы. Проведенный анализ современного состояния разработок полевых спектрометров радиометров показал, что в настоящее время рынок этих приборов переживает период развития. Как тактико-технические характеристики, так и конструктивные решения приборов лежат в очень широком диапазоне. Во многом это объясняется тем фактом, что большинство стандартов, регламентирующих требования к приборам данного класса, либо вышли совсем недавно, либо еще находятся в процессе разработки.

В области схемотехники, конструкций и материалов детекторов предпочтение пока отдается стандартным опробованным решениям.

В то же время появление новых сцинтилляторов и фотоприемников дает возможность предложить несколько вариантов замены традиционной (и признанной в практике) схемы спектрометрического блока детектирования.

В частности, ожидаемые характеристики приборов могут оправдать затраты на дополнительные меры защиты из-за гигроскопичности блоков детектирования на основе BrilLanCe^R 350 и BrilLanCe^R 380. Высокая плотность PreLude^R 420 может стать основой для создания прибора с высокой эффективностью регистрации. Такой прибор может обеспечить мониторинг малых превышений радиационного фона вблизи естественного уровня. При этом габариты блока детектирования могут быть достаточно небольшими.

В тоже время учитывая естественные физические и технологические ограничения, налагаемые тактико-техническими требованиями на детекторную часть прибора, для нас очевидно, что большинство перспективных методов улучшения характеристик прибора связаны с разработкой методов и алгоритмов цифровой обработки спектрометрической информации. Данный факт налагает дополнительные требования к вычислительному ядру прибора, которое должно обладать существенными встроенными интеллектуальными возможностями.

ЛИТЕРАТУРА

1. [http:// www.atomtex.com](http://www.atomtex.com)
2. [http:// www.aspect.dubna.ru](http://www.aspect.dubna.ru)
3. <http://www.canberra.com>
4. [http:// www.saic.com](http://www.saic.com)
5. [http:// www.beta.ru](http://www.beta.ru)
6. <http://www.detectors.saint-gobain.com/home.asp>
7. [http:// www.mkt-intl.com](http://www.mkt-intl.com)
8. <http://www.appscintech.com/products/>
9. Saint-Gobain Crystals. CsI (Tl), CsI (Na), Cs(I) pure Cesium Iodide Scintillation Material. www.detectors.saint-gobain.com
10. Bicon inorganic products. NaI pure, NaI(Tl) and POLYSCIN® NaI(Tl). www.bicon.com
11. Valentine John D., Moses William W., Derenzo Stephen E., Wehe David K., Knoll Glenn F. Temperature dependence of CsI(Tl) gamma-ray excited scintillation characteristics. Nuclear Instruments and methods in Physics Research A325 (1993) 147-157.
12. М.В. Прокуроров, А.А.Голубев, и др. Цифровая идентификация частиц по форме импульса. Приборы и техника эксперимента 2006 №2 с 67-83.

Статья поступила 20.03.2007 г.
Рекомендовано к печати к.т.н., доц.
Мосьпаном В.А.