

УДК 539.17

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАБИЛИЗАЦИИ И ПОНИЖЕНИЯ ФОНА В ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ОБРАЗЦОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

О.М. ПОП*, М.В. СТЕЦ, В.Т. МАСЛЮК

Институт электронной физики НАН Украины, Ужгород, Украина

*e-mail: oksana_por@i.ua

(Поступила в редакцию 12 ноября 2014 г.)

Рассмотрен гамма-спектрометрический комплекс ИЭФ НАН Украины, который использует пассивную, многослойную внешнюю защиту (изготовлен в 1989 г.). Разработана и исследована система стабилизации и понижения фона в гамма-спектрометрическом комплексе. Как метрологические коэффициенты рассматриваются коэффициенты эффективности защиты, расчет и анализ которых показывает, что их значения отличаются для различных энергий гамма-квантов и различных гамма-активных нуклидов.

1. Введение

Гамма-спектрометрический комплекс (ГСК) представляет собой систему, состоящую из детектора Д ионизирующих частиц (в нашем случае – гамма-квантов); предварительного усилителя, усилителя, многоканального анализатора импульсов и т.д.; программного обеспечения; внешней защиты – металлической конструкции, предназначенной для защиты детектора от внешнего излучения и понижения фона системы [1].

Детекторы и электроника представляют собой стандартные узлы. Внешняя защита представляет собой металлическую конструкцию, которая предназначена для понижения фона детектора. В некоторых случаях она защищает персонал от излучения образца. Конструкция защиты зависит от многих факторов, поэтому она достаточно индивидуальна. Такими факторами являются: задачи, для которых используется гамма-спектрометрический комплекс; местоположение ГСК (детекторного помещения); местоположение научного помещения (лаборатория) – географические координаты [1].

В нашем случае гамма-спектрометрический комплекс выполняет две задачи:

- прикладную ядерную гамма-спектрометрию наведенной гамма-активности (высокие уровни гамма-активности);
- прикладную ядерную гамма-спектрометрию естественной гамма-активности (низкие уровни гамма-активности).

ГСК ИЭФ НАН Украины использует полупроводниковый Ge(Li)-детектор ДГДК 100В (Д), размещенный в пассивной многослойной (Pb+Cd+Fe+Cu+Al)4π – защите (внешняя защита). Жесткое гамма-излучение образца, который размещается в середине внешней защиты, возбуждает рентгеновское излучение в этом же образце (в частности, Pb (76.74 KeV)) [2].

1.1. Нестабильность фона внутренней окружающей среды

Метеорологическая ситуация влияет на уровень гамма-активности воздуха. Компонентами воздуха являются радиоактивные газы – ^{14}C (составляющая углекислого газа CO_2), изотопы Rn. Они, в свою очередь, влияют на значения активностей дочерних гамма-активных нуклидов (ГАН) [3]: $^{220}\text{Rn} - ^{212}\text{Pb}$, ^{212}Bi , ^{208}Tl (ряд ^{232}Th); $^{219}\text{Rn} - ^{215}\text{Po}$, ^{215}Pb , ^{215}Bi (ряд ^{235}U); $^{222}\text{Rn} - ^{214}\text{Pb}$, ^{214}Bi (ряд ^{238}U) и дисперсию этих значений. Эти дочерние гамма-активные нуклиды имеют интенсивные линии. Поэтому они фактически составляют основной образ гамма-спектра, формируя его не только своими пиками полного поглощения, но и комптоновскими распределениями, пиками сумм, пиками одиночных и двойных вылетов, рентгеновскими пиками и т.п.

Бета-частицы распада ^{14}C , попадая в вещество, тормозятся. Это приводит к возникновению в нем тормозного гамма-излучения, которое регистрируется детектором. Сказанное относится и к другим бета-активным радионуклидам. Тормозное излучение, имея непрерывный спектр, сильно изменяет гамма-спектр в области низких энергий гамма-квантов. При повышении влажности (> 90%) и понижении температуры происходит конденсация влаги на охлажденных поверхностях (поверхности детектора, криостата и т.п.).

Радон (Rn) – тяжелый газ, который хорошо конденсируется на охлажденных поверхностях и вместе с атмосферной водой накапливается за время отсутствия естественной и принудительной вентиляции (подробнее физико-химические свойства Rn см. в [4]). Источником Rn является внешняя окружающая среда гамма-спектрометрического комплекса: скальные породы, на которых построен лабораторный корпус, система канализации, материал защиты микротрона. Радон есть и в воздухе, приносится к нам ветрами. Во время осадков его концентрация возрастает.

Укажем, что каждый из указанных основных факторов влияния на значение фона имеет собственную динамику. Эти факторы действуют одновременно.

1.2. Предел возможностей прикладной ядерной гамма-спектрометрии на гамма-спектрометрическом комплексе

Сейчас ГСК отвечает, в основном, требованиям современной прикладной ядерной гамма-спектрометрии облученных образцов (наведенная активность) и природной активности образцов массой 100–1000 г, с пределом таких

измерений на уровне удельных активностей > 10 Бк/кг и погрешностью $> 10\%$. Значения удельных активностей на уровне 10 Бк/кг соответствуют интенсивностям I на уровне $n - 10^{-3}$ имп/с. Это уровень интенсивностей гамма-фона. Укажем, что речь идет о спектрометрии естественной гамма-активности, аппаратный гамма-спектр (АГС) которой определяется в большинстве случаев одним и тем же списком гамма-активных нуклидов (см. выше). Поэтому АГС фона $\approx$ АГС образца.

Предел возможностей, не в последнюю очередь, определяется рентальной продолжительностью измерений: $\leq 4-8$ часов/образец. Можно считать, что это является границей, у которой будем находиться, если не изменить условия работы гамма-спектрометрического комплекса [1].

2. Система стабилизации и понижения фона ГСК

Рассмотрены основные факторы, влияющие на работу ГСК отдела фото-ядерных процессов ИЭФ НАН Украины. Сделана попытка обосновать целесообразность стабилизации и понижения фона в ГСК. На основе этого была разработана система стабилизации и понижения фона гамма-спектрометрического комплекса (ССПФ ГСК). Она состоит из подсистем, комбинация которых формирует геометрию измерения. Выбор конструкции и материала для СППФ обусловлен следующими требованиями: он должен быть недорогим, конструкция СППФ должна быть простой, мобильной, поддаваться очистке, последующей возможной модернизации и демонтажу. Разрабатываемая система является составной частью ГСК и включает в себя существующую внешнюю защиту.

2.1. Подсистема фиксированного объема и состава воздуха

Для уменьшения неконтролируемого пространства в детекторном помещении создана система фиксированного объема и состава воздуха (ФОСВ). Воздух считается изолированным в этих объемах, несмотря на неполную герметичность. Новые поступления радионуклидов – замедленные. Воздух, изолированный в ФОСВ, не участвует в неконтролируемой или принудительной конвекции.

2.2. Подсистема шлюзов

Подсистема из 5 последовательных шлюзов (пропускников) доступа к гамма-спектрометрическому комплексу создана для:

- уменьшения неконтролируемой конвекции воздуха между детекторным помещением и другими помещениями;
- уменьшения неконтролируемой конвекции воздуха;
- конденсации атмосферной влаги в наружной защите.

2.3. Подсистема температурных градиентов

Двигателем неконтролируемой конвекции воздуха, как известно, могут быть перепад давлений и температурные градиенты (перепады температур), которые зависят от климатических условий и т.д. Для разрешения этой проблемы была создана подсистема температурных градиентов. Она обеспечивает стабильный перепад температур в середине внешней защиты (где, как указывалось, есть центр конденсации), между внешней защитой и детекторным помещением, между детекторным помещением и смежным измерительным помещением.

2.4. Теплоизоляция

Установлено, что определенное значение имеет и температура внутренних (металлических) поверхностей внешней защиты. Поэтому они были закрыты теплоизолятором. Кроме теплоизоляции, эти дополнительные поверхности препятствовали попаданию воздуха из щелей внешней защиты.

2.5. Подсистема вентиляции

Установлено, что полная теплоизоляция без вентиляции приводит к нежелательному повышению температуры воздуха и нагреву электроники. Поэтому была создана подсистема вентиляции с небольших компактных вентиляторов, которые вентилировали воздух в наружную верхнюю защиту и внешнюю нижнюю защиту.

2.6. Внутренняя защита

Прикладная ядерная гамма-спектрометрия различных, в том числе и объемных, образцов, в которых находятся объемы воздуха, нуждается в дополнительной внутренней защите (ВЗ). Эта защита находится во внешней верхней защите (ВВЗ). Под термином «объемный» следует понимать не только крупные образцы, но и образцы произвольной массы, формы и размеров, например, археологические объекты. Эта защита служит для одновременной защиты поверхности кристалла и объемных образцов. Она состоит из:

- внутренней верхней защиты (ВВЗ), которая защищает образцы.
- внутренней нижней защиты (ВНЗ), которая защищает боковую поверхность детектора.

Разработано несколько конструкций внутренней защиты, состоящих из фольг Al, Cd, Ta и Cu.

2.7. Геометрии

Реализация указанных технических решений шла постепенно в разных направлениях, которые условно названы геометриями. Следующая геометрия, как правило, является развитием предыдущей. Всего исследовали 21 геометрию. Укажем те геометрии, которые использовались в качестве базовых, для сравнения с другими геометриями.

Геометрия 0. В этой геометрии начинались измерения. Детектор находится во внешней защите. Осуществляется вентиляция внешней защиты и детекторного помещения. Проводится прикладная ядерная гамма-спектрометрия стандартных источников гамма-квантов, то есть измерения, для которых наличие внешней защиты не критично.

Геометрия 3. Это геометрия, когда детектор находится вне защиты в детекторном помещении. Используется как базовая для сравнения между собой различных геометрий и различных уровней гамма-фона ближней окружающей среды.

2.8. Режимы измерений гамма-фона

Кроме геометрий были выделены два режима (способа) измерения фона. Это фон накопления и фон вентиляции.

Фон накопления – стартовое измерение гамма-фона после ночного или иного длительного перерыва, когда в детекторном помещении и во внешней защите никакие работы не проводились.

Фон вентиляции – следующее измерение, когда с целью уменьшения возможного накопления радиоактивности в воздухе детекторного помещения и внешней защиты осуществляется интенсивная тепловентиляция.

Оба типа фонов осуществляются в геометрии 0.

3. Эксперимент

3.1. Гамма-спектрометрия

Весь процесс разработки ССПФ контролировался гамма-спектрометрически. Измерения выполнялись на полупроводниковом Ge(Li)-детекторе ДГДК 100В (Д). Продолжительность ТС одного измерения составляла от 0.5 до 2 часов. Пакет программ SBS-40 выполняет функции многоканального амплитудного анализатора.

3.2. Список гамма-активных нуклидов и их линий

Основные линии (ППП) обнаружены и идентифицированы программой SBS-40. Это гамма-активные нуклиды: ^{228}Ac (338 КэВ; 968 КэВ; 911 КэВ); ^{212}Pb (239 КэВ); ^{212}Bi (727 КэВ); ^{208}Tl (583 КэВ; 2614 КэВ); ^{226}Ra (186 КэВ); ^{214}Bi (609 КэВ; 1120 КэВ; 1765 КэВ); ^{214}Pb (295 КэВ; 351 КэВ); ^{40}K (1461 КэВ); ^{137}Cs (662 КэВ).

3.3. Расчеты количественных характеристик

Для получения количественных характеристик и дальнейшего сравнительного анализа использовались значения интенсивностей I :

$$I = \Delta Sx / TC_{ж},$$

где $\Delta S_x = S - Sf$; S – площадь пика полного поглощения; ΔS_x – часть S , созданная активностью линии гамма-активного нуклида в аппаратурном гамма-спектре образца x ; Sf – часть S , созданная активностью той же линии гамма-активного нуклида в аппаратурном гамма-спектре фона f ; $ТС_{ж}$ – живое время измерения.

Для серии измерений одной геометрии находились (см. [5]) средние арифметические значения I_{cp} (функция СРЗНАЧ)

$$I_{cp} = \frac{\sum I}{n}$$

и стандартные выборочные отклонения (функция СТАНДОТКЛОН)

$$s = \sqrt{\frac{n \sum I^2 - (\sum I)^2}{n(n-1)}}.$$

Имея средние значения I_{cp} и стандартные отклонения s , можно эти значения упорядочить по геометрии и значениям (от большего к меньшему).

3.4. Коэффициенты эффективности защиты как оценка эффективности системы стабилизации и понижения фона

Для сравнительного анализа необходима определенная количественная характеристика, которая давала бы возможность непосредственно сравнивать данные различных геометрий X с одной выбранной (базовой) геометрией. В качестве такой базовой геометрии выбрали геометрию 3 (геометрия 3: измерения вне защиты, в детекторном помещении) и определили величину, которую называли коэффициентом эффективности защиты (КЭЗ):

$$КЭЗ = 1 / (I_{cp}(X) / I_{cp}(Y)).$$

На рис.1 приведены значения КЭЗ, упорядоченные «от меньшего к большему», для различных геометрий X . Видно, что значения КЭЗ удовлетво-

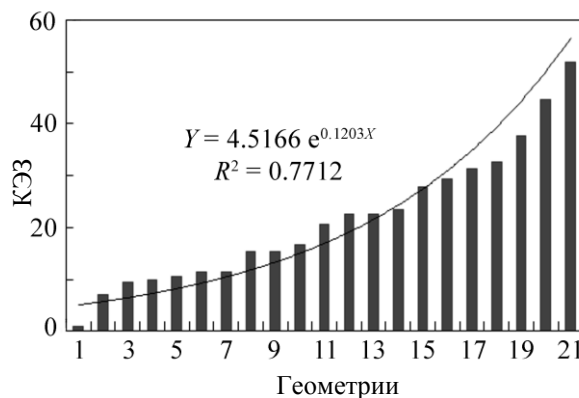


Рис.1. Значения КЭЗ для различных геометрий защиты для ^{40}K (1461 КэВ).

рительно подчиняются экспоненциальной зависимости, которая обозначена сплошной линией. R^2 – коэффициент детерминации [6]. Такие зависимости получены и для других линий гамма-активных нуклидов.

Определяя коэффициенты эффективности защиты, гамма-спектрометрический комплекс осуществляет метрологические функции на основе сравнительного анализа упорядоченных в шкале порядков КЭЗ для каждого варианта исследуемой геометрии. Следовательно, КЭЗ являются метрологическими коэффициентами, которые определяются для дальнейшего сравнительного анализа исследованных однотипных конструкций ВЗ детектора. Значения КЭЗ позволяют количественно оценить собственный фон детектора, а также выявить перспективные материалы для их использования во ВЗ.

3.5. Матрицы коэффициентов эффективности защиты

Обобщая идею метрологизации шкалы КЭЗ для каждой линии гамма-активного нуклида, можно рассчитать матрицу значений КЭЗ_{ij}:

$$КЭЗ_{ij} = 1 / (I_{ср i} / I_{ср j}),$$

$$КЭЗ_{ji} = 1 / (I_{ср j} / I_{ср i}),$$

где i, j – геометрии. Значение $КЭЗ_{ij} = f(\text{геометрия } X)$ можно представить графически. Значения матрицы КЭЗ приведены на рис.2–5 – это множество упорядоченных по значениям номеров j геометрий, значений $КЭЗ_{ji}$ для каждой пары геометрий ji .

На рис.2,3 приведены значения $КЭЗ_{ij}$ для ^{40}K (линия 1461 КэВ) и ^{212}Pb (линия 238 КэВ) для разных номеров геометрий, упорядоченных по 1, 2, Эти рисунки приведены для различных геометрий ВЗ, т.е. когда геометрия 3 исключена из сравнения. При этом видно, что ВЗ «работает» – улучшает КЭЗ. Необходимо отметить, что улучшение КЭЗ происходит не в n раз, а может изменяться в пределах 10–20%.

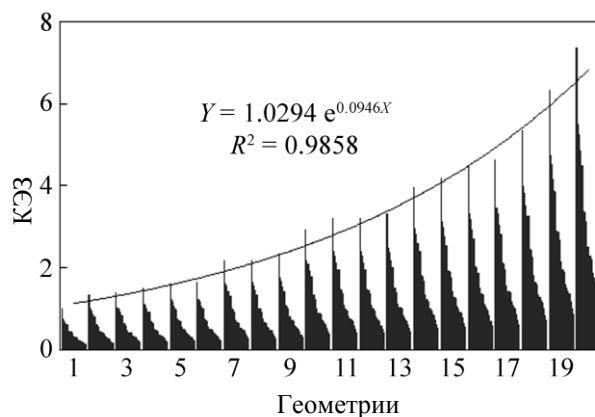


Рис.2. Значение элементов матрицы КЭЗ для различных геометрий ВЗ для ^{40}K (1461 КэВ) без базовой геометрии 3.

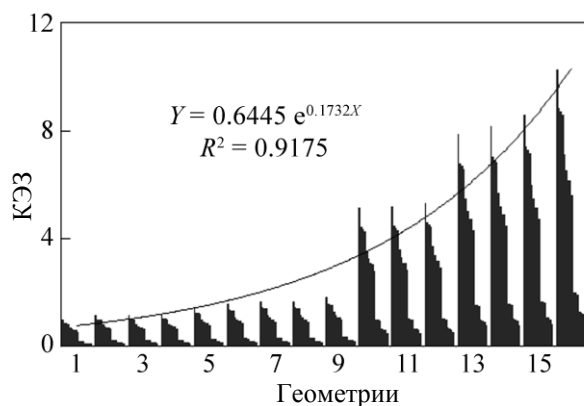


Рис.3. Значение элементов матрицы КЭЗ для различных геометрий ВЗ для ^{212}Pb (238 КэВ) без базовой геометрии 3.

На рис.4,5 приведены также значения КЭЗ_{ij} для ^{40}K (линия 1461 КэВ) и ^{212}Pb (линия 238 КэВ) для разных номеров геометрий, упорядоченных по 1,2, При этом для сравнения как базовая используется геометрия 3.

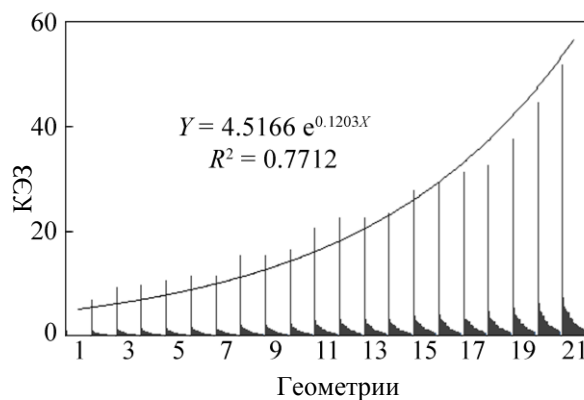


Рис.4. Значение элементов матрицы КЭЗ для различных геометрий защиты для ^{40}K (1461 КэВ) с базовой геометрией 3.

В матрице КЭЗ (элементы которой изображены на рис.4,5) максимальные значения среди всех значений КЭЗ имеют место для базовой геометрии 3. Видно, что основной вклад дает внешняя защита (сравнение с геометрией 3). Вклад других геометрий меньше, чем вклад внешней защиты, однако он является важным.

Расчет и анализ КЭЗ показывает, что их значения отличаются для различных энергий гамма-квантов и различных гамма-активных нуклидов. Так например, для ^{40}K (1461 КэВ) максимальное $\text{КЭЗ} \approx 52$ (см. рис.4), для ^{212}Pb (238 КэВ) – 30 (см. рис.5), а для ^{214}Bi (609 КэВ) – 50. Очевидно, что отличие в значениях КЭЗ будет наблюдаться и для других гамма-активных нуклидов. Это

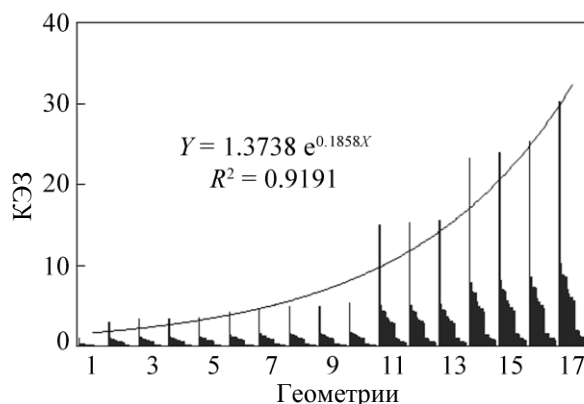


Рис.5. Значение элементов матрицы КЭЗ для различных геометрий защиты для ^{212}Pb (238 КэВ) с базовой геометрией 3.

можно объяснить, во-первых, различиями естественной гамма-активности конструктивных материалов, из которых сделана защита; во-вторых, различиями в значениях коэффициентов самопоглощения гамма-квантов в различных материалах для различных энергий и гамма-активных нуклидов.

Таким образом, рис.2–5 иллюстрируют эффективность ССПФ. Можно сделать вывод, что вклад всей системы защиты, в которую входит внешняя защита и ССПФ (рис.4,5), находится на уровне значений КЭЗ до 52. При этом, как видно из рис.2,3, значение КЭЗ намного меньше. Это означает, что вклад разработанной ССПФ меньше: КЭЗ ≈ 10 .

Матрицы КЭЗ, рассчитанные для всех линий гамма-активных нуклидов, являются удобным методическим инструментом для детального сравнительного анализа возможностей ССПФ.

4. Заключение

Прикладная ядерная гамма-спектрометрия гамма-фона разработанной системы и расчет коэффициентов эффективности созданной системы показали уменьшение значений и дисперсии интенсивности фоновых линий гамма-активных ^{228}Ac , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl (ряд ^{232}Th); ^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{214}Bi (ряд ^{238}U) и ^{40}K . Основной вклад в уменьшение гамма-фона дает внешняя защита: КЭЗ ≥ 30 . Вклад разработанной нами системы (ССПФ) меньше: КЭЗ ≈ 7 ; вклад всей системы защиты, в которую входит внешняя защита и ССПФ, находится на уровне КЭЗ ≈ 52 . Значения КЭЗ для геометрий разработанной нами системы растут экспоненциально с ростом мер защиты (подсистем ССПФ).

Указанные закономерности справедливы для энергий гамма-квантов в диапазоне от 186 КэВ (^{226}Ra) до 2614 КэВ (^{208}Tl). Они справедливы для гамма-активных нуклидов, которые являются дочерними для гамма-активного нуклида радона (^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl – ряд ^{232}Th ; ^{214}Pb , ^{214}Bi – ряд ^{238}U). Указанные законо-

мерности справедливы также и для других гамма-активных нуклидов: ^{228}As – ряд ^{232}Th ; ^{226}Ra – ряд ^{238}U и ^{40}K . Поэтому можно сделать вывод, что их источником, кроме воздуха, является вещество защиты, детекторное помещение и т.п.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю.Ю. Юркуц, О.М. Поп, М.В. Стець, В.Т. Маслюк. Науковий Вісник Ужгородського університету. Фізика. **30**, 119 (2011).
2. Н.С. Гусев, П.П. Дмитриев. Квантовое излучение радиоактивных нуклидов. М., Атомиздат, 1977.
3. Н.С. Гусев, П.П. Дмитриев. Радиоактивные цепочки. М., Атомиздат, 1978.
4. М. Гайсинкий, Ж. Адлов. Радиохимический словарь элементов. М., Атомиздат, 1968.
5. М.В. Стець, О.М. Поп. Дослідницький стенд для визначення метрологічних коефіцієнтів ефективності внутрішнього захисту типових гамма-спектрометричних комплексів. Патент на корисну модель (2013), №79328 від 25.04.2013 р. Бюл. №8.
6. Г.И. Сингалеvская. Функции в Excel. М., Диалектика, 2005.

QUANTITATIVE ESTIMATIONS OF THE EFFICIENCY OF STABILIZATION AND LOWERING OF BACKGROUND IN GAMMA-SPECTROMETRY OF ENVIRONMENT SAMPLES

O.M. POP, M.V. STETS, V.T. MASLYUK

We consider a gamma-spectrometric complex of IEP of the NAS of Ukraine, where a passive multilayer external defense is used (complex has been made in 1989). We have developed and investigated a system of stability and lowering of background in the gamma-spectrometric complex. As metrological coefficients, the efficiency factor of defense are considered, the calculation and analysis of which show that their values are different for different energies of gamma-quanta and gamma-active nuclides.