

УДК 539.1.074+519.245

## Имитация объемных мер активности металлов

Жуковский А.И.<sup>1</sup>, Ничипорчук А.О.<sup>1</sup>, Хрущинский А.А.<sup>2</sup>, Кутень С.А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УП «АТОМТЕХ»,

ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь

<sup>2</sup>НИИ ядерных проблем БГУ,

ул. Бобруйская, 11, 220030, г. Минск, Беларусь

Поступила 15.04.2016

Принята к печати 07.08.2016

В связи со спецификой решаемых задач в области спектрометрии ионизирующего излучения процесс разработки и создания объемных мер активности (стандартных образцов) для калибровки, градуировки и поверки спектрометрического оборудования не только является дорогостоящим, но и требует привлечения специалистов высокой квалификации с уникальным специфическим оборудованием. С использованием теоретических и экспериментальных исследований показана возможность создания имитантов в виде набора чередующихся образцовых спектрометрических гамма-источников и рассеивателей и их использования наряду со стандартными образцами при калибровке и поверке спектрометров на основе сцинтилляционных детекторов, используемых при радиационном контроле металлов. Для градуировки и калибровки спектрометров требуется наличие функций отклика спектрометра к таким радионуклидам, как  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{125}\text{Sb}+^{125\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{238}\text{U}$ , представляющих собой аппаратные спектры в заданной геометрии измерения. Для их получения используются стандартные образцы, в виде пробы плавки металла определенного диаметра и высоты. В свою очередь изготовление стандартных образцов является дорогостоящей процедурой, а с радионуклидами  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{125}\text{Sb}+^{125\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и т.д. затруднительно. В данном случае общепризнанным решением такой задачи является использование моделирования методом Монте-Карло. Полученные с использованием стандартных образцов и их имитантов экспериментальные и теоретические аппаратные спектры показали высокое соответствие разработанных Монте-Карло моделей их реальным образцам и подтвердили правильность результатов Монте-Карло моделирования для радионуклидов  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  и т.д., а также показали адекватность и состоятельность подхода в процессе имитирования стандартных образцов с помощью комбинации рассеивателей и образцовых спектрометрических гамма-источников. Использование нескольких спектрометрических гамма-источников в комбинации с набором рассеивателей для радионуклидов типа  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и т.д. позволяет компенсировать поглощенные гамма-кванты с низкими энергиями в металле, сформировать необходимый отклик в области пика обратного рассеяния и в итоге получить амплитудное распределение, эквивалентное эффектам взаимодействия, которые происходят в стандартном образце с равномерно распределенным по объему радионуклидом.

**Ключевые слова:** сцинтилляционный спектрометр, гамма-излучение, стандартный образец, имитант, Монте-Карло моделирование.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-219-226

**Адрес для переписки:**

Жуковский А.И.

УП «АТОМТЕХ»,

ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь

e-mail: alexzhukovski@gmail.com

**Address for correspondence:**

Zhukouski A.

SPE «АТОМТЕХ»,

Gikalo str., 5, 220005, Minsk, Belarus

e-mail: alexzhukovski@gmail.com

**Для цитирования:**

Жуковский А.И., Ничипорчук А.О., Хрущинский А.А., Кутень С.А.

Имитация объемных мер активности металлов.

Приборы и методы измерений.

2016. – Т. 7, № 2. – С. 219–226.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-219-226

**For citation:**

Zhukouski A., Nichyparchuk A., Khrutchinsky F., Kutsen S.

[Imitation of standard volumetric activity metal samples].

*Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements].

2016, vol. 7, no. 2, pp. 219–226 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-219-226

# Imitation of standard volumetric activity metal samples

Zhukouski A.<sup>1</sup>, Nichyparchuk A.<sup>1</sup>, Khrutchinsky F.<sup>2</sup>, Kutsen S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>SPE «ATOMTEX»,

Gikalo str., 5, 220005, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Research Institute for Nuclear Problems,

Bobruiskaya str., 11, 220030, Minsk, Belarus

Received 15.04.2016

Accepted for publication 07.08.2016

**Abstract.** Due to the specific character of problems in the field of ionizing radiation spectroscopy, the R&D and making process of standard volumetric activity metal samples (standard samples) for calibration and verification of spectrometric equipment is not only expensive, but also requires the use of highly qualified experts and a unique specific equipment. Theoretical and experimental studies performed have shown the possibility to use imitators as a set of alternating point sources of gamma radiation and metal plates and their use along with standard volumetric activity metal samples for calibration of scintillation-based detectors used in radiation control in metallurgy. Response functions or instrumental spectra of such spectrometer to radionuclides like <sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs, <sup>152</sup>Eu, <sup>154</sup>Eu, <sup>60</sup>Co, <sup>54</sup>Mn, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra, <sup>65</sup>Zn, <sup>125</sup>Sb+<sup>125m</sup>Te, <sup>106</sup>Ru+<sup>106</sup>Rh, <sup>94</sup>Nb, <sup>110m</sup>Ag, <sup>233</sup>U, <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U and <sup>238</sup>U are required for calibration in a given measurement geometry. Standard samples in the form of a probe made of melt metal of a certain diameter and height are used in such measurements. However, the production of reference materials is costly and even problematic for such radionuclides as <sup>94</sup>Nb, <sup>125</sup>Sb+<sup>125m</sup>Te, <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U etc. A recognized solution to solve this problem is to use the Monte-Carlo simulation method. Instrumental experimental and theoretical spectra obtained by using standard samples and their imitators show a high compliance between experimental spectra of real samples and the theoretical ones of their Monte-Carlo models, between spectra of real samples and the ones of their imitators and finally, between experimental spectra of real sample imitators and the theoretical ones of their Monte-Carlo models. They also have shown the adequacy and consistency of the approach in using a combination of metal scattering layers and reference point gamma-ray sources instead of standard volumetric activity metal samples. As for using several reference point gamma-ray sources with radionuclide like <sup>152</sup>Eu, <sup>232</sup>Th, <sup>226</sup>Ra etc, they allow, in a combination of metal scattering layers, to compensate for the absorption of low energy gamma rays in the metal and to generate the desired response in the backscatter peak range, and finally to get the correct amplitude distribution that is equivalent to interaction effects that occur in the volumetric standard sample with radionuclide uniformly distributed in it.

**Keywords:** scintillation spectrometer, gamma radiation, standard sample, imitator, Monte-Carlo simulation.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-219-226

---

**Адрес для переписки:**

Жуковский А.И.

УП «АТОМТЕХ»,

ул. Гикало, 5, 220005, г. Минск, Беларусь

e-mail: alexzhukovski@gmail.com

**Address for correspondence:**

Zhukouski A.

SPE «ATOMTEX»,

Gikalo str., 5, 220005, Minsk, Belarus

e-mail: alexzhukovski@gmail.com

---

**Для цитирования:**

Жуковский А.И., Ничипорчук А.О., Хрущинский А.А., Кутень С.А.

Имитация объемных мер активности металлов.

Приборы и методы измерений.

2016. – Т. 7, № 2. – С. 219–226.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-219-226

**For citation:**

Zhukouski A., Nichyparchuk A., Khrutchinsky F., Kutsen S.

[Imitation of standard volumetric activity metal samples].

*Pribory i metody izmerenij* [Devices and Methods of Measurements].

2016, vol. 7, no. 2, pp. 219–226 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-219-226

## Введение

Процесс создания объемных мер активности (стандартных образцов) наряду со специфическими экспериментальными работами включает в себя этап научных и методических разработок, подразумевает использование уникального оборудования, участие специалистов высокой квалификации в областях материаловедения, аналитической химии, метрологии и т.д. [1]. Вместе с тем проблема усугубляется еще и тем, что количественные объемы выпуска стандартных образцов (СО), используемых в процессе разработки, создания и градуировки спектрометрического оборудования, не велики и при этом требуют индивидуальной подготовки технологического процесса, что в свою очередь в условиях производства представляет большие сложности и приводит к существенному увеличению материальных затрат [2, 3].

Качество результатов измерений гамма-спектрометрии напрямую зависит от точности калибровочных характеристик (энергетической зависимости спектрометрического тракта, зависимости эффективности регистрации от энергии и т.д.), что в свою очередь определяется качеством используемых эталонных источников гамма-излучения, в том числе и СО, которые не могут быть изготовлены для всех необходимых радионуклидов в заданных геометриях измерений [4]. Цель данной работы заключалась в разработке метода, позволяющего заменить дорогостоящие стандартные образцы в процессе калибровки, градуировки и поверки спектрометров. Вместо них предлагается использовать их имитанты, представляющие собой набор чередующихся рассеивающих слоев и расположенных между ними источников типа образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ).

## Материалы и методы

Исследования проводились на сцинтилляционном блоке детектирования на основе кристалла NaI(Tl) ( $\varnothing 63 \times 63$  мм), размещенном в свинцовом блоке защиты [5]. СО с равномерно распределенным внутри радионуклидом размещался на расстоянии 2 см от торца детектора на специальном держателе из органического стекла.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием СО на основе радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ , набора ОСГИ с радионуклидами

$^{152}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и набора металлических дисков толщиной 1 мм и диаметром 35 мм, изготовленных из стали.

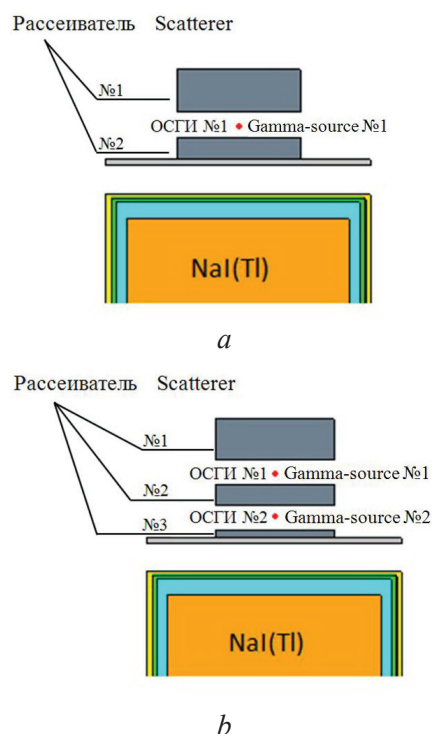
## Экспериментальные и теоретические исследования

Согласно требованиям нормативных документов [Санитарные нормы и правила «Требования к радиационной безопасности» и Гигиенические нормативы «Критерии оценки радиационного воздействия», Минск, 2012. – 230 с.] спектрометрическое оборудование для радиационного контроля металлов должно позволять проводить измерение удельных активностей радионуклидов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{152}\text{Eu}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{65}\text{Zn}$ ,  $^{125}\text{Sb}+^{125\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{106}\text{Ru}+^{106}\text{Rh}$ ,  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{110\text{m}}\text{Ag}$ ,  $^{233}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ . Данная задача является очень сложной как для сцинтилляционной спектрометрии, так и для ОЧГ-спектрометрии (гамма-спектрометрия с использованием детектора из особо чистого германия), но при наличии функций отклика к каждому указанному выше радионуклиду в виде аппаратного спектра в соответствующей геометрии измерения можно получить необходимые калибровочные зависимости для расчета активности заданных радионуклидов [6, 7]. Изготовление необходимых СО является дорогостоящей процедурой, а с радионуклидами  $^{94}\text{Nb}$ ,  $^{125}\text{Sb}+^{125\text{m}}\text{Te}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и т.д. оно вообще затруднительно. Совместное использование источников гамма-излучения типа ОСГИ в комбинации с рассеивающими слоями из металла и математическое моделирование методом Монте-Карло позволяет получить аппаратные спектры ко всем указанным радионуклидам в заданных геометриях измерения.

Теоретические аппаратные спектры в заданных геометриях измерения для СО и их имитантов на основе ОСГИ с тем же радионуклидом были получены с использованием моделирования методом Монте-Карло. Для численного моделирования использовалось программное обеспечение *MCNP*, версия 4В [8].

Основная цель использования моделирования методом Монте-Карло заключалась в подтверждении правильности предлагаемого метода имитации СО для источников гамма-излучения и получении теоретических аппаратных спектров в заданной геометрии измерения к радионуклидам, для которых отсутствует возможность получения экспериментальных аппаратных

спектров. Для моделирования процесса переноса гамма-излучения в геометрии измерения, представленной на рисунке 1, разработаны Монте-Карло модели блока детектирования, блока защиты, СО и их имитантов, учитывающие основные геометрические и технические характеристики соответствующих объектов. При этом учитывалось, что сцинтилляционный кристалл покрыт отражателем на основе оксида магния MgO (плотность 1,6 г/см<sup>3</sup>), толщина которого на торцевой и боковой поверхности детектора составляла 5 и 3 мм соответственно.



**Рисунок 1** – Имитанты стандартных образцов: *a* – имитант с одним образцовым спектрометрическим гамма-источником и двумя рассеивателями; *b* – имитант с двумя образцовыми спектрометрическими гамма-источниками и тремя рассеивателями

**Figure 1** – Imitators of standard samples: *a* – imitator with one reference point source of radiation (RPSR) and two scatterers; *b* – imitator with two RPSRs and three scatterers

Представление об имитанте СО можно получить из рисунка 1, на котором представлен имитант СО на основе одного радионуклида типа 1 (<sup>137</sup>Cs, <sup>134</sup>Cs, <sup>60</sup>Co и т.д.) (*a*), или радионуклида типа 2 (<sup>152</sup>Eu, <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th и т.д.) (*b*). Радионуклиды типа 1 характеризуются небольшим количеством линий гамма-излучения (1–2 линии), второй тип радионуклидов имеет по три и более высокоинтенсивных линии гамма-излучения. Имитанты

СО с радионуклидами первого и второго типа содержат один и два гамма-источника типа ОСГИ соответственно.

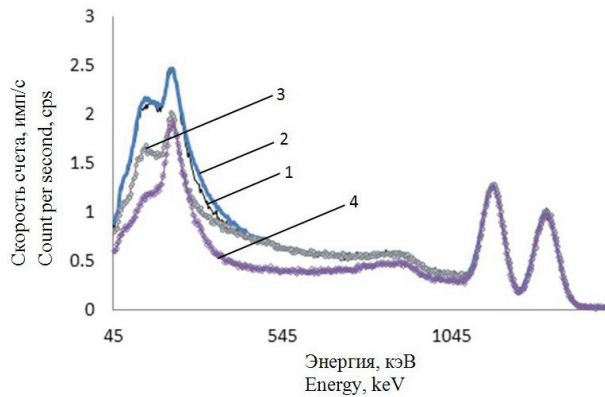
Рассеиватели № 1, № 2 и № 3 формируются из набора металлических пластин толщиной 1 мм и диаметром 35 мм.

Задний рассеиватель № 1 участвует в формировании низкоэнергетической области аппаратного спектра  $F(E, E_0)$ , «возвращая» рассеянные гамма-кванты уже с энергией  $E < E_0$  кэВ ( $E_0$  – энергия гамма-линии ОСГИ) обратно, в направлении детектора [9]. При этом часть рассеянных в направлении детектора гамма-квантов вторично рассеиваются или поглощаются в основном рассеивающем слое № 2. Последний обеспечивает формирование области аппаратного спектра с энергией ниже энергии края комптоновского рассеяния гамма-квантов на атомах материала имитанта.

При правильно подобранной конфигурации (количество и толщина рассеивающих слоев, положение и активность гамма-источников типа ОСГИ) имитанта СО аппаратные спектры с заданным радионуклидом не должны отличаться от аппаратных спектров, полученных с использованием СО с тем же радионуклидом.

На рисунке 2 графически представлены экспериментальные аппаратные спектры радионуклида <sup>60</sup>Co, полученные с использованием СО и его имитанта. Имитант изготовлен на основе гамма-источника типа ОСГИ с тем же радионуклидом, расположенным между рассеивающими слоями согласно рисунку 1*a*).

Спектры нормированы на единицу в пике полного поглощения (ППП) с энергией гамма-излучения 1333 кэВ. Аппаратные спектры, полученные при измерении имитанта, в котором в первом случае отсутствовал задний рассеиватель № 1, во втором – основной рассеиватель № 2, показывают, что только использование их обоих позволяет в полной мере воспроизвести большинство эффектов, происходящих в СО. Отношение количества зарегистрированных импульсов гамма-излучения в энергетическом диапазоне от 50 до 1000 кэВ аппаратного спектра СО и его имитанта с основным и задним рассеивателями на уровне 1,03 подтверждает корректность предлагаемого метода для его имитации с радионуклидами первого типа, у которых небольшое количество высокоинтенсивных линий гамма-излучения.



**Рисунок 2** – Экспериментальные аппаратные спектры стандартного образца с радионуклидом  $^{60}\text{Co}$  и различных форм его имитанта: 1 – стандартный образец; 2 – имитант с рассеивателями № 1 и № 2; 3 – имитант без рассеивателя № 1; 4 – имитант без рассеивателя № 2

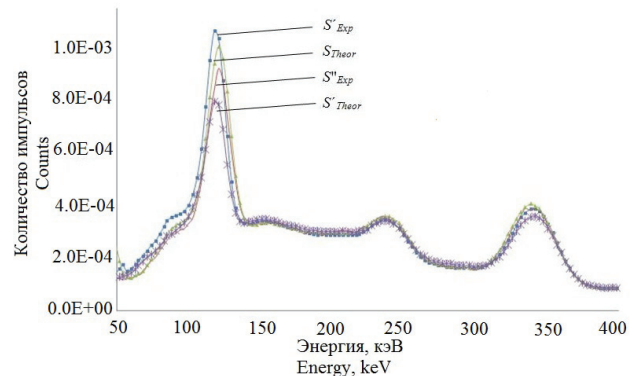
**Figure 2** – Instrumental experimental spectra of standard samples with  $^{60}\text{Co}$  and different forms of its imitators: 1 – standard sample; 2 – imitator with scatterers № 1 and № 2; 3 – imitator without scatterer № 1; 4 – imitator without scatterer № 2

При имитировании СО с радионуклидами второго типа, у которых несколько (3 и более) высокоинтенсивных гамма-линий в широком энергетическом диапазоне, при формировании необходимой формы аппаратного спектра следует учесть эффекты поглощения гамма-квантов с низкими энергиями в металле [10]. Для «компенсации» поглощенных гамма-квантов в области низких энергий от ОСГИ № 1 предлагается использовать дополнительный источник гамма-излучения ОСГИ № 2 и дополнительный рассеиватель № 3 (рисунок 1b).

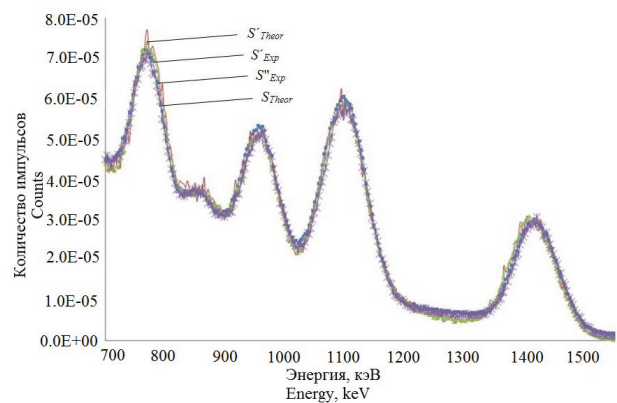
Результаты экспериментальных и теоретических исследований с радионуклидом  $^{152}\text{Eu}$ , для которого не было возможности изготовить СО, представлены на рисунке 3. Теоретический аппаратный спектр СО  $S_{Theor}$ , экспериментальный  $S'_{Exp}$  и теоретический  $S''_{Theor}$  аппаратные спектры имитанта, собранного согласно рисунку 1b, и экспериментальный аппаратный спектр имитанта  $S''_{Exp}$  с одним источником ОСГИ (рисунок 1a) нормированы на импульс/фотон.

Аппаратурные спектры  $S'_{Exp}$ ,  $S_{Theor}$  и  $S''_{Theor}$  представленные на рисунке 3, демонстрируют высокую степень состоятельности предлагаемого метода имитации СО на основе  $^{152}\text{Eu}$  (радионуклид второго типа) в энергетическом диапазоне от 60 до 1500 кэВ в области ППП, комптоновско-

го и обратного рассеяния с использованием дополнительного ОСГИ и рассеивателя. Различие интегральных откликов относительно друг друга не превышает 3 %.



a



b

**Рисунок 3** – Экспериментальный и теоретические аппаратные спектры в энергетических диапазонах: a – 50–400 кэВ; b – 700–1500 кэВ:  $S'_{Exp}$  – экспериментальный спектр имитанта;  $S_{Theor}$  – теоретический спектр стандартного образца;  $S''_{Exp}$  – экспериментальный спектр имитанта без использования дополнительного образцового спектрометрического гамма-источника и рассеивателя;  $S''_{Theor}$  – теоретический спектр имитанта

**Figure 3** – Instrumental experimental and theoretical spectra of radionuclide  $^{152}\text{Eu}$  in energy range: a – 50–400 keV; b – 700–1500 keV:  $S'_{Exp}$  – experimental spectrum of imitator;  $S_{Theor}$  – theoretical spectrum of standard sample;  $S''_{Exp}$  – experimental spectrum of imitator without additional reference point source of radiation and scatterer;  $S''_{Theor}$  – theoretical spectrum of imitator

В случае имитации СО на основе  $^{152}\text{Eu}$  с использованием только одного ОСГИ различие интегральных откликов, достигающее 20 % и более для аппаратных спектров  $S'_{Exp}$  и  $S''_{Exp}$  наблюдается в области ППП в энергетическом диапазоне ниже 300 кэВ. Это свидетельствует о

некорректности имитации СО на основе радионуклидов второго типа с использованием только одного ОСГИ.

В качестве количественной оценки соответствия друг другу двух аппаратурных спектров  $S^1$  и  $S^2$  с заданным радионуклидом использовался коэффициент корреляции  $r^2$ , вычисляемый по формуле:

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n ((S_i^1 - \bar{S}^1) \cdot (S_i^2 - \bar{S}^2))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i^1 - \bar{S}^1)^2 \cdot \sum_{i=1}^n (S_i^2 - \bar{S}^2)^2}}$$

где  $n = 1024$  – количество каналов аналогового преобразователя спектрометра;  $S_i^1$ ,  $S_i^2$  – количество импульсов в  $i$ -ом канале первого и второго аппаратурного спектра соответственно.

Результаты сравнения экспериментальных и теоретических аппаратурных спектров СО с различными радионуклидами и их имитантов представлены в таблице. Экспериментальные аппаратурные спектры нормированы на импульс/фотон.

Таблица 1 / Table 1

**Результаты сравнения экспериментальных и теоретических аппаратурных спектров стандартных образцов и их имитантов**

**Results of comparison experimental and theoretical instrumental spectra of standard samples and their imitators**

Радионуклид Radionuclide	Коэффициент корреляции $r^2$ Correlation coefficient $r^2$			
	$S_{Exp}^1/S_{Exp}^2$	$S'_{Theor}^1/S'_{Theor}^2$	$S_{Theor}^1/S_{Theor}^2$	$S'_{Exp}^1/S'_{Exp}^2$
$^{137}\text{Cs}$	0,997	0,977	0,991	0,993
$^{60}\text{Co}$	0,998	0,995	0,998	0,994
$^{134}\text{Cs}$	-	0,991	0,998	0,993
$^{54}\text{Mn}$	-	0,986	0,997	0,991
$^{152}\text{Eu}$	-	0,979	0,989	0,982
$^{65}\text{Zn}$	-	0,987	0,997	0,989

$S_{Exp}^1$  – экспериментальный аппаратурный спектр, полученный с использованием стандартного образца

$S_{Exp}^2$  – instrumental experimental spectrum, obtained by using standard sample

Значения коэффициентов корреляции в столбце  $S_{Exp}^1/S_{Exp}^2$ , близкие к 1, говорят о соответствии экспериментальных аппаратурных спектров имитантов экспериментальным аппаратурным спектрам СО на основе  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ .

В связи с отсутствием СО с радионуклидами  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{54}\text{Mn}$ ,  $^{152}\text{Eu}$  и  $^{65}\text{Zn}$  были проведены экспериментальные и теоретические исследования их имитантов. После подтверждения корректности Монте-Карло моделей имитантов их физическим образцам (столбец  $S'_{Exp}/S'_{Theor}$ ), с использованием Монте-Карло моделирования были получены теоретические аппаратурные спектры СО. Результаты их сравнения с теоретическими аппаратурными спектрами их имитантов (столбец  $S_{Theor}/S'_{Theor}$ ) показывают практически полное совпадение представленных спектров по форме и подтверждают правильность метода имитации СО. Значения коэффициентов корреляции на уровне 1 показывают, что имитантов СО достаточно для воспроизведения эффектов взаимодействия гамма-квантов с веществом образца, которые происходят в объемном источнике с равномерно распределенным по объему радионуклидом.

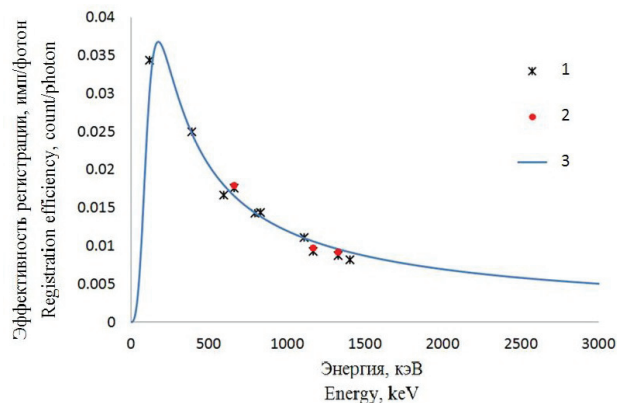
Значения коэффициентов корреляции в столбце  $S'_{Exp}/S_{Theor}$  подтверждают возможность использования имитантов в качестве образцовых средств измерений вместо СО и показывают необходимость использования дополнительных ОСГИ и рассеивателя для компенсации поглощенных в основном рассеивателе низкоэнергетических гамма-квантов для имитации СО на основе радионуклида второго типа.

С помощью экспериментальных и теоретических аппаратурных спектров СО и их имитантов были рассчитаны зависимости эффективности регистрации от энергии в геометриях измерения проб плавков металлов (рисунок 4). Отношения значений эффективности регистрации, полученных с использованием СО и их имитантов, к значениям эффективности регистрации, полученных с использованием результатов моделирования методом Монте-Карло, находятся в пределах от 0,91 до 1,03 для энергетического диапазона от 50 до 3000 кэВ.

Это подтверждает возможность использования имитантов СО для градуировки и поверки спектрометров без использования корректирующих коэффициентов.

Для радионуклидов второго типа толщины основного и дополнительного рассеивателей подбирались экспериментальным путем с учетом ослабления гамма-излучения в материале имитанта в диапазоне энергий от 50 до 1500 кэВ и результатов Монте-Карло моделирования. Экспериментальные и теоретические исследования показали, что толщины рассеивателей зависят от соотноше

ния активностей основного ОСГИ (№ 1) и дополнительного (№ 2).



**Рисунок 4** – Зависимости эффективности регистрации от энергии гамма-излучения: 1 – эффективность регистрации для имитанта, полученная экспериментально; 2 – эффективность регистрации для стандартного образца, полученная экспериментально; 3 – эффективность регистрации для стандартного образца, полученная с помощью Монте-Карло моделирования

**Figure 4** – Dependence of the registration efficiency of the gamma-ray energy: 1 – registration efficiency for imitator, obtained experimentally; 2 – registration efficiency for standard sample, obtained experimentally; 3 – registration efficiency for standard sample, obtained by using Monte-Carlo simulation

Дополнительные исследования, касающиеся процедуры подбора и аналитической связи между характеристиками имитанта (активность гамма-источников типа ОСГИ, их расположение, количество рассеивающих слоев и их толщина) и СО (материал, размеры, радионуклид), будут представлены в следующей работе.

## Заключение

Путем экспериментальных и теоретических исследований показана возможность использования имитантов в виде набора чередующихся источников гамма-излучения типа ОСГИ и рассеивателей вместо объемных мер активности при калибровке спектрометрического оборудования на основе сцинтилляционных детекторов.

Коэффициенты корреляции экспериментальных и теоретических аппаратных спектров демонстрируют адекватность и состоятельность предложенного метода имитирования стандартного образца с использованием набора рассеивателей и гамма-источников типа ОСГИ не только в области пиков полного поглощения,

но и в области пика обратного рассеяния и комптоновского рассеяния. Процедура имитирования и ее результаты описаны для стандартного образца с радионуклидами двух типов, один из которых представлен небольшим количеством линий гамма-излучения (1–2 линии), второй тип имеет по три и более высокоинтенсивные линии гамма-излучения. Использование дополнительных образцовых спектрометрических гамма-источников и рассеивателя при имитации стандартного образца на основе радионуклидов второго типа позволяет компенсировать поглощенные гамма-кванты с низкими энергиями в материале предыдущего рассеивателя, сформировать необходимый отклик в области пиков полного поглощения и в итоге получить амплитудное распределение, эквивалентное эффектам взаимодействия, которые происходят в объемном источнике с равномерно распределенным по объему радионуклидом.

Представленный метод с использованием конструируемых имитантов стандартных образцов позволит осуществлять калибровку или поверку спектрометрического оборудования для компетентных лабораторий предприятий металлургии без использования дорогостоящих стандартных образцов.

## Список использованных источников

1. *Сергеев, А.Г.* Метрология / А.Г. Сергеев. – М.: Логос, 2005. – 272 с.
2. *Борисов, В.А.* Метрологическое обеспечение производства / В.А. Борисов [и др.]. – Обнинск: НОУ ДПО «ЦИПК», 2010. – 384 с.
3. *Белов, Г.В.* Экологический менеджмент предприятий / Г.В. Белов. – М.: Логос, 2006. – 240 с.
4. *Radu, D.* A method of efficiency calibration for dick sources in gamma-ray spectrometry / D. Radu, D. Stanga, O. Sima // Romanian report in Physics. – 2009. – Vol. 61, no. 2. – P. 203–213.
5. Гамма-радиометр: пат. № 2656 Республики Беларусь, МКПО (9) 10-05 / М.Н. Довжук, В.Д. Гузов, В.В. Храмов, В.А. Краснов, А.И. Жуковский, В.И. Антонов, Е.В. Быстров; заявитель НПУП «АТОМТЕХ» ОАО «МНИПИ» – f 20120230; заявл. 07.08.2012; опубл. 28.02.2013 // Афіцыйны бюл. Вынаходніцтва. Карысныя мадэлі. Прамысловыя ўзоры / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2013. – № 1 (90). – С. 255.
6. *Reilly, D.* Passive Nondestructive assay of nuclear materials / Doug Reilly, Norbert Ensslin, Hastings Smith Jr., Sarah Kreiner. – Washington: U.S. Nuclear Regulation Commission, 1991. – 700 pp.

7. Волков, Н.Г. Методы ядерной спектрометрии / Н.Г. Волков, В.А. Христофоров, Н.П. Ушакова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

8. *Briestmeister; J.F.* Ed. MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4A. / J.F. Briestmeister. – Report LA-12625-M. – Los Alamos, NM : Los Alamos National Laboratory, 1994. – 736 p.

9. *Knoll, G.F.* Radiation detection and measurement. Third Edition / G.F. Knoll. – New York : John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 802 p.

10. *Jaeger; R.G.* Engineering Compendium on Radiation Shielding / R.G. Jaeger [et al.]. – Vol. 2: Shielding Materials. – Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1975. – 436 p.

## References

1. Sergeyev A.G. *Metrologiya* [Metrology]. Moscwa, Logos Publ., 2005, 272 p. (in Russian).

2. Borisov V.A., Gorshkov V.B., Ignatov V.P., Karpenko A.YA., Karpyuk M.L., Kuznetsov V.P. *Metrologicheskoye obespecheniye proizvodstva* [The metrological support of production]. Obninsk, NOU DPO «TSIPK» Publ., 2010, 384 pp. (in Russian).

3. Belov G.V. *Ekologicheskij menedzhment predpriyatij* [Environmental management enterprises]. Moscwa, Logos Publ., 2006, 240 p. (in Russian).

4. Radu D., Stanga D., Sima O. A method of efficiency calibration for dick sources in gamma-ray spectrometry. *Romanian report in Physics*, 2009, vol. 61, no. 2, pp. 203–213.

5. Dovzhuk M., Guzov V., Khramov V., Krasnov V., Zhukouski A., Antonov V., Bystrov E. *Gamma-radiometr* [Gamma-radiometer]. Patent BY, no. 2656, 2013.

6. Doug Reilly, Norbert Ensslin, Hastings Smith Jr., Sarah Kreiner Passive Nondestructive assay of nuclear materials / Washington, U.S. Nuclear Regulation Commission, 1991, 700 pp.

7. Volkov N.G., Khristoforov V.A., Ushakova N.P. *Metody yadernoj spektrometrii* [Methods of nuclear spectrometry]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 256 pp. (in Russian).

8. Briestmeister J.F. ed. MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code, Version 4A. Report LA-12625-M, Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory, 1994, 736 pp.

9. Knoll G. Radiation detection and measurement. Third Edition, New York, John Wiley & Sons, Inc., 2000, 802 p.

10. Jaeger R.G., Blizard E.P., Chilton A.B., Grotenhuis M., Hönig A., Jaeger T.A., Eisenloh H.H. Engineering Compendium on Radiation Shielding. Volume 2: Shielding Materials, Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1975, 436 p.