

УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПОТОКА ФОТОНОВ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ ^{153}Gd

© 2020 г. Н. Ф. Демченко^{а,*}, А. В. Дудун^а, М. М. Саликов^а

^а Научно-исследовательский институт атомных реакторов, 433510, Димитровград Ульяновской обл.,
Западное шоссе, д. 9

*e-mail: dem.nik.f@yandex.ru

Получена 27.03.2019, после доработки 22.04.2019, принята к публикации 29.04.2019

Разработаны установка и методика измерения потока фотонов источников на основе ^{153}Gd , позволяющие проводить измерения потока фотонов в источниках ионизирующего излучения на основе ^{153}Gd в диапазоне $(10^8\text{--}10^{10})$ фотон $\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{ср}^{-1}$ с погрешностью не более 10%, что в полной мере соответствует современным требованиям медицины.

Ключевые слова: гадолиний-153, источники ионизирующего излучения, измерение потока фотонов

DOI: 10.31857/S0033831120010074

Характеристики источников фотонов из оксида ^{153}Gd . В радиационной медицине источники ионизирующего излучения (ИИИ) – фотонного излучения – на основе радионуклида ^{153}Gd используются в аппаратах (костные денситометры) для измерения содержания минеральных солей в скелете человека и при диагностике заболевания. При изготовлении ИИИ (в соответствии с ТУ 95 2576-95 ОКП 70 1221 7000, Гадолиний-153) используется препарат оксида гадолиния. Удельная активность ^{153}Gd в препарате должна быть не менее 2.6 ТБк (70 Ки) на грамм гадолиния. Доля активности радиоактивных примесей ^{152}Eu , ^{154}Eu , ^{156}Eu и ^{160}Tb в препарате не должна превышать: $5\cdot 10^{-4}\%$. Вклад активности других радионуклидов в активность препарата значительно меньше и поэтому не учитывается. Габаритные размеры активной части: $d = 3$ мм, $l \leq 2$ мм.

Эти ИИИ представляют собой герметичную капсулу из титанового сплава, внутри которой находится таблетка, спрессованная из порошка оксида ^{153}Gd . Способ герметизации – аргонодуговая сварка. Основным параметром для потребителей таких ИИИ является поток фотонов [1]. Погрешность измерения этого параметра в медицинской практике не должна превышать 10%. В табл. 1 представлены значения потока фотонов для

различных типов ИИИ, выпуск которых налажен в НИИАР. Конструкция источника представлена на рис. 1.

Исследования установки измерения потока фотонов гадолиниевых источников. Установка потока гадолиниевых источников (УПГИ) была разработана и внедрена в НИИАР в тот момент, когда институт разрабатывал технологию и приступал к выпуску источников фотонов на основе ^{153}Gd . Метрологические исследования УПГИ проводили совместно с ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Была разработана методика измерения (МИ) потока фотонов для источников на основе ^{152}Gd [2]. Схема УПГИ представлена на рис. 2.

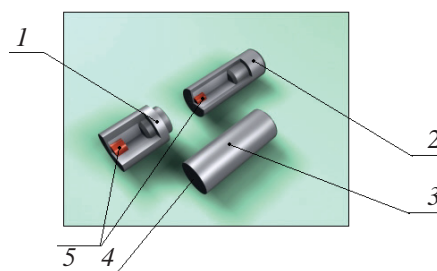


Рис. 1. Конструкция источников фотонов на основе ^{153}Gd : 1 – ФГ153М12.410, 2 – ФГ153М12.110, 3 – ФГ153М11.410, 4 – рабочая поверхность ИИИ, 5 – оксид ^{153}Gd

Таблица 1. Значения потока фотонов для различных типов источников, выпускаемых в НИИАР

Тип источника	Активность, ГБк (Ки)	Поток фотонов с энергией 44 кэВ (рентгеновское излучение), $c^{-1} \cdot cр^{-1}$	Отношение потоков фотонов с энергиями 44 и 100 кэВ	Габаритные размеры, мм	
				<i>d</i>	<i>l</i>
ФГ153М11.410	37 (1)	$>1.2 \times 10^9$	≥ 1.3	16.0	5.7
ФГ153М12.110 ^{а)}	11.1 (0.3)	$>4.0 \times 10^8$	≥ 1.3	16.0	5.7
ФГ153М13.410	37 (1)	$>2.0 \times 10^9$	≥ 1.3	10.0	7.0

^а Паспортизируются только по активности.

Спектр рентгеновского и гамма-излучения от реального ИИИ на основе ^{153}Gd представлен на рис. 3.

Измерения на рентгеновском спектрометре ИИИ из ^{153}Gd активностью от 0.3 до 1.0 Ки предполагают наличие необходимой геометрии, при которой расстояние от детектора до ИИИ должно составлять не менее 600 см. Из литературы хорошо известно, что рентгеновское излучение ^{153}Gd ($E_x = 41$ и 47 кэВ) при такой геометрии измерения значительно поглощается слоем воздуха [3]. При проведении длительных (прецизионных) измерений колебания давления воздуха, его температуры и конвекция воздуха в трубе-коллиматоре весьма неблагоприятно сказываются (как это было выявлено при испытаниях УПГИ) на результатах определения потока фотонов. Поэтому измерительная установка УПГИ представляет собой весьма сложное устройство, которое включает в себя рентгеновский спектрометр 2 (рис. 2) на базе детектора БДРК-25 и трубу-коллиматор 6. Труба-коллиматор имеет устройства, которые обеспечивают в ней необходимый вакуум ($P = 1$ Па) при измерениях.

В состав установки входят также форвакуумный насос 3, термодатный манометрический преобразователь 4, вакуумный ресивер 5, вакуумный вентиль 7 и измерительный прибор (вакуумметр) 8.

В трубе-коллиматоре 6 (рис. 2) есть устройства, которые позволяют закреплять «окошки» (фильтры) 10 из разных материалов, а также обеспечить крепление держателя с ИИИ из ^{153}Gd .

Исследования, проведенные нами с фильтрами из различных материалов и разной толщины, показывают, что полный спектр на УПГИ от ^{153}Gd можно получить, используя фильтр из нержавеющей стали. В нашем случае это фильтр толщиной $d = 0.3$ мм, который мы стали использовать в дальнейшем для УПГИ. При метрологических исследованиях (при калибровке) УПГИ были получены результаты, представленные в табл. 2 и 3.

В настоящее время установка не претерпела никаких изменений, менялись только детекторы, многоканальные анализаторы импульсов, датчики и некоторые узлы вакуумной системы на новые.

Методика измерения потока фотонов гадолиниевых источников. Измерения потока фото-

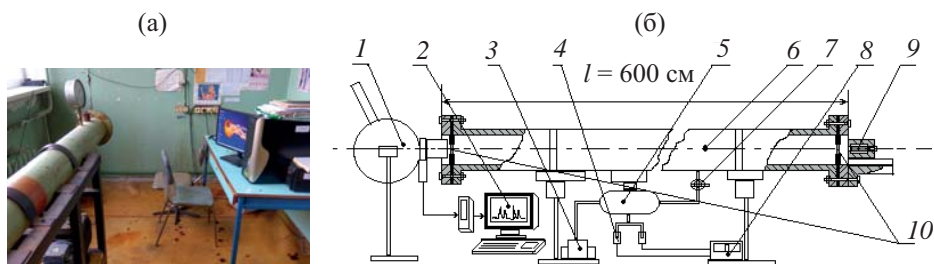


Рис. 2. Схема УПГИ. а – внешний вид, б – состав УПГИ. 1 – детектор БДРК-25, 2 – рентгеновский спектрометр на основе платы SBS-55, 3 – форвакуумный насос, 4 – термодатный манометрический преобразователь ПМТ-2, 5 – вакуумный ресивер, 6 – труба-коллиматор, 7 – вакуумный вентиль, 8 – измерительный прибор (вакуумметр), 9 – источник рентгеновского излучения из ^{153}Gd в держателе, 10 – фильтр в специальном устройстве.

нов от источников выполняют методом сравнения с мерой потока фотонов – эталонным источником фотонного излучения (табл. 4) не ниже второго разряда, тип которого соответствует типу измеряемого источника. Диапазон измерения потока фотонов рентгеновского и гамма-излучений составляет от 10^8 до 10^{10} фотон·с⁻¹·ср⁻¹ [2].

Расчёт потока фотонов $F_{\text{изм}}^{44}$ рентгеновского излучения от источника проводится по формуле:

$$F_{\text{изм}}^{44} = K_t F_{\text{эт}}^{44} \frac{N_{\text{изм}}^{44}}{N_{\text{эт}}^{44}}, \quad (1)$$

где $F_{\text{эт}}^{44}$ – значение потока фотонов рентгеновского излучения от эталонного источника (из свидетельства о поверке ИИИ), фотон·с⁻¹·ср⁻¹; $N_{\text{изм}}^{44}$, $N_{\text{эт}}^{44}$ – средние значения сумм скоростей счета в пике полного поглощения в области 40–50 кэВ для паспортизируемого источника и эталона соответственно; K_t – коэффициент, учитывающий радиоактивный распад радионуклида в эталонном источнике.

Поток фотонов гамма-излучения ($F_{\text{изм}}^{100}$) рассчитывают по той же формуле (2), заменяя значения параметров $F_{\text{эт}}^{44}$, $N_{\text{изм}}^{44}$ и $N_{\text{эт}}^{44}$ на значения $F_{\text{эт}}^{100}$, $N_{\text{изм}}^{100}$ и $N_{\text{эт}}^{100}$ для энергий 97 и 103 кэВ соответственно.

Суммарный поток фотонов $F_{\text{изм}}$ вычисляют по формуле:

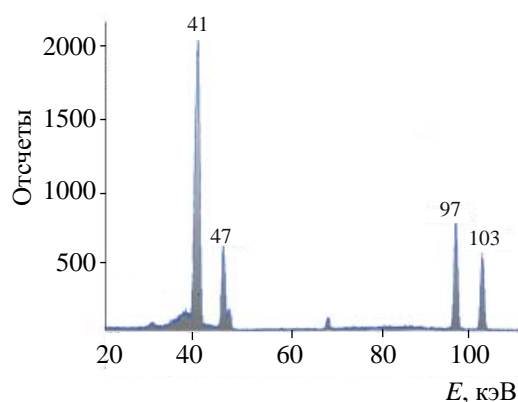


Рис. 3. Спектр рентгеновского и гамма-излучения ИИИ на основе ¹⁵³Gd.

$$F_{\text{изм}} = F_{\text{изм}}^{44} + F_{\text{изм}}^{100}. \quad (2)$$

Отношение потока фотонов рентгеновского излучения к потоку фотонов гамма-излучения (G) вычисляют по формуле

$$G = \frac{F_{\text{изм}}^{44}}{F_{\text{изм}}^{100}}, \quad (3)$$

Относительную стандартную неопределенность U_A , имеющую случайный характер (неопределенность типа А), принимают равной среднеквадратическому отклонению (СКО) SF и рассчитывают по формуле

Таблица 2. Значение средних эффективностей УПГИ

Диапазоны энергий, кэВ	Скорость счёта фонового излучения, с ⁻¹	Средняя эффективность регистрации ^а	Погрешность, %
39.27–51.83	≤0.009	2.8×10^{-7}	8
95.27–98.57	≤0.002	3.7×10^{-8}	8
101.05–105.02	≤0.001	3.3×10^{-8}	8

^а Эффективность УПГИ определяли по отношению к потоку фотонов в 1 ср. Рабочий эталон – источник типа ФГ153М13.410 № Э 2/1 (свидетельство о поверке № 1149/11) располагался в установке, где обеспечивался вакуум ($P = 1$ Па).

Таблица 3. Метрологические характеристики УПГИ

Параметр	Значение
Погрешность измерения пока фотонов для уровня доверительной вероятности $P = 0.95$, %	10
Диапазон энергии регистрируемого гамма-излучения, кэВ	40–105
Время установления рабочего режима, мин	30
Время непрерывной работы, ч	8
Диапазон измеряемого потока фотонов, с ⁻¹ ·ср ⁻¹	$10^8 - 10^{10}$

Таблица 4. Паспортные значения рабочего эталона типа ФГ153М13.410 № Э 2/1

Энергия, кэВ	Поток фотонов, фотон·с ⁻¹ ·ср ⁻¹	Погрешность потока ($P = 0.95$), %
$E_{\text{эфф}} = 44$ кэВ	2.77×10^9	4
$E_{\text{эфф}} = 100$ кэВ	1.52×10^9	4

$$U_A = SF, \quad (4)$$

где SF – относительное СКО результата измерений потока фотонов, %.

Значения СКО для рентгеновского излучения $SF_{\text{ИЗМ}}^{44}$ и для гамма-излучения $SF_{\text{ИЗМ}}^{100}$ вычисляются по следующим формулам:

$$SF_{\text{ИЗМ}}^{44} = 100 \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (N_{k \text{ ИЗМ}}^{44} - N_{\text{ИЗМ}}^{44})^2}{(N_{\text{ИЗМ}}^{44})^2 M_{\text{ИЗМ}} (M_{\text{ИЗМ}} - 1)} + \frac{\sum_{k=1}^N (N_{k \text{ ЭТ}}^{44} - N_{\text{ЭТ}}^{44})^2}{(N_{\text{ЭТ}}^{44})^2 M_{\text{ЭТ}} (M_{\text{ЭТ}} - 1)}}, \quad (5)$$

$$SF_{\text{ИЗМ}}^{100} = 100 \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (N_{k \text{ ИЗМ}}^{100} - N_{\text{ИЗМ}}^{100})^2}{(N_{\text{ИЗМ}}^{100})^2 M_{\text{ИЗМ}} (M_{\text{ИЗМ}} - 1)} + \frac{\sum_{k=1}^N (N_{k \text{ ЭТ}}^{100} - N_{\text{ЭТ}}^{100})^2}{(N_{\text{ЭТ}}^{100})^2 M_{\text{ЭТ}} (M_{\text{ЭТ}} - 1)}}, \quad (6)$$

где $M_{\text{ИЗМ}}$, $M_{\text{ЭТ}}$ – число измерений соответственно измеряемого и эталонного источников.

Относительную стандартную неопределенность, обусловленную присутствием неисключенных остатков систематических погрешностей (неопределенность типа В), U_B , %, рассчитывают по формуле

$$U_B = \frac{\theta}{1.1\sqrt{3}}, \quad (7)$$

где θ – граница относительной систематической погрешности результата измерений потока фотонов для $P = 0.95\%$:

$$\theta = 1.1 \sqrt{\theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_3^2}, \quad (8)$$

где θ_1 – относительная погрешность потока фотонов эталонного источника (приведена в свидетельстве о поверке и не должна превышать $\pm 5\%$); θ_2 – относительная погрешность, связанная с неточностью установки контейнера-держателя с измеряемым источником, не более 1%; θ_3 – относительная погрешность, связанная с нестабильностью установки, не более 1%.

Далее рассчитывают относительную суммарную стандартную неопределенность U_c по формуле

$$U_c = \sqrt{U_A^2 + U_B^2}. \quad (9)$$

Затем вычисляют относительную расширенную неопределенность $U_{0.95}$, %, при коэффициенте охвата $k = 2$ по формуле

$$U_{0.95} = 2U_c. \quad (10)$$

Далее рассчитывают относительную расширенную неопределенность (при коэффициенте охвата $k = 2$) для общего потока фотонов, $UF_{\text{ИЗМ}}$, %, по формуле

$$UF_{\text{ИЗМ}} = 1/F \sqrt{[F_{\text{ИЗМ}}^{44} U_{0.95}(F_{\text{ИЗМ}}^{44})]^2 + F_{\text{ИЗМ}}^{100} U_{0.95}(F_{\text{ИЗМ}}^{100})^2}, \quad (11)$$

где $U_{0.95}(F_{\text{ИЗМ}}^{44})$, $U_{0.95}(F_{\text{ИЗМ}}^{100})$ – относительная расширенная неопределенность, %, для потоков фотонов рентгеновского и гамма-излучения, соответственно.

В завершение рассчитывают относительную расширенную неопределенность при коэффициенте охвата $k = 2$ для отношения потоков фотонов рентгеновского и гамма-излучения, UG , %, по формуле фотонов, $UF_{\text{ИЗМ}}$, %, по формуле

$$U_{0.95}G = 1/F \sqrt{[U_{0.95}(F_{\text{ИЗМ}}^{44})]^2 + U_{0.95}(F_{\text{ИЗМ}}^{100})^2}, \quad (12)$$

В табл. 4 приведены паспортные значения образцового источника (рабочего эталона) № Э 2/1 типа ФГ153М13.410. Все рабочие эталоны проходят периодическую поверку в метрологическом центре ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в Санкт-Петербурге.

ВЫВОДЫ

Разработанная установка и методика измерения потока фотонов источников на основе ^{153}Gd по-

зволили успешно проводить паспортизацию этой продукции, выпускаемой в России. В настоящее время ИИИ такого типа широко применяются в клиниках России и за рубежом. В начале каждой поставки на рынок фотонных ИИИ из ^{153}Gd , как правило, проводят сличительные эксперименты по определению основного параметра ИИИ (в данном случае потока фотонов).

Заказчику также предоставляются свидетельства о калибровке средств измерения. Участники сличения результатов измерения также обмениваются результатами МИ. Такие эксперименты нами были проведены с фирмой Amersham (Англия). Они подтверждают достоверность наших результатов в пределах заявленной нами погрешности измерений. Созданные в НИИАР установка и методика измерения позволяют проводить измерения потока фотонов в ИИИ на основе ^{153}Gd в диапазоне (10^8 – 10^{10}) фотон·с $^{-1}$ ·ср $^{-1}$ с погрешностью не

более 10%, что в полной мере соответствует современным требованиям медицины.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радионуклидные источники ионизирующего излучения и препараты: Каталог. Димитровград: НИИАР, 2004.
2. Демченко Н.Ф., Дудун А.В., Кондаурова Г.И. Типовая методика выполнения измерений. Определение потока фотонов от закрытых радионуклидных источников на основе радионуклида гадолиний-153: Регистрационный номер в Реестре методик ГНЦ НИИАР № 855. Димитровград: НИИАР, 2010.
3. Машкович В.П. Защита от ионизирующего излучения: Справ. пособие. М.: Атомиздат, 1980.