

УДК 539.1.074.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКТИВНОСТИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ В КОНТЕЙНЕРЕ С ПОМОЩЬЮ КСЕНОНОВОГО ГАММА СПЕКТРОМЕТРА

С. Н. Пья, К. Ф. Власик, В. М. Грачев, В. В. Дмитренко, А. С. Новиков, Д. В. Петренко, А. Е. Шустов, З. М. Утешев, С. Е. Улин, И. В. Чернышева

*Приведено описание ксенонового гамма спектрометра (КГС) с чувствительным объемом 6 литров. Представлены физико-технические характеристики гамма спектрометра, полученные с использованием радиоактивных источников из набора образцовых стандартных спектрометрических гамма источников. Измерены гамма спектры от радиоактивных отходов, находящихся в контейнере объемом 3.4 м<sup>3</sup> для твердых радиоактивных отходов, и получены активности изотопов. Проведено моделирование КГС с помощью метода Монте Карло с применением пакета GEANT4. Активности находились комбинированным методом анализа экспериментальных спектров и моделированных данных. Показано, что КГС имеет хорошие метрологические возможности для характеристики радиоактивных отходов, которая включает в себя идентификацию нуклидов и оценку их активности.*

**Ключевые слова:** гамма-спектрометрия, ксеноновый гамма спектрометр, анализ спектров, гамма-источник, моделирование гамма спектров, радиоактивные отходы.

На предприятиях атомной промышленности, занимающихся демонтажем плутоний-урановых графитовых реакторов и других ядерно- и радиационно-опасных объектов возникает необходимость характеристики больших объемов радиоактивных отходов (РАО) различных типов. Одним из методов анализа является экспрессный неразрушающий контроль на базе гамма-спектрометров, обладающих высокой эффективностью регистрации гамма-квантов и энергетическим разрешением, радиационной стойкостью

НИЯУ МИФИ, Москва, Каширское шоссе, д. 31; e-mail: gypsy30@gmail.com.

и температурной стабильностью, имеющих высокую эксплуатационную надежность и простоту в использовании [1]. В наибольшей степени этими свойствами обладают ксеноновые гамма спектрометры (КГС), разрабатываемые в Радиационной лаборатории НИЯУ МИФИ. В данной статье представлены результаты исследований возможностей КГС с рабочим объемом 6 литров для решения задач характеристики РАО по гамма излучению радионуклидов [2, 3].

Ксеноновый гамма-спектрометр (КГС) изготовлен на основе импульсной цилиндрической ионизационной камеры с экранирующей сеткой [4]. Камера наполнена смесью (рабочее вещество) сжатого ксеноном с добавкой водорода, увеличивающего скорость дрейфа электронов в электрическом поле. Схема спектрометра представлена на рис. 1.

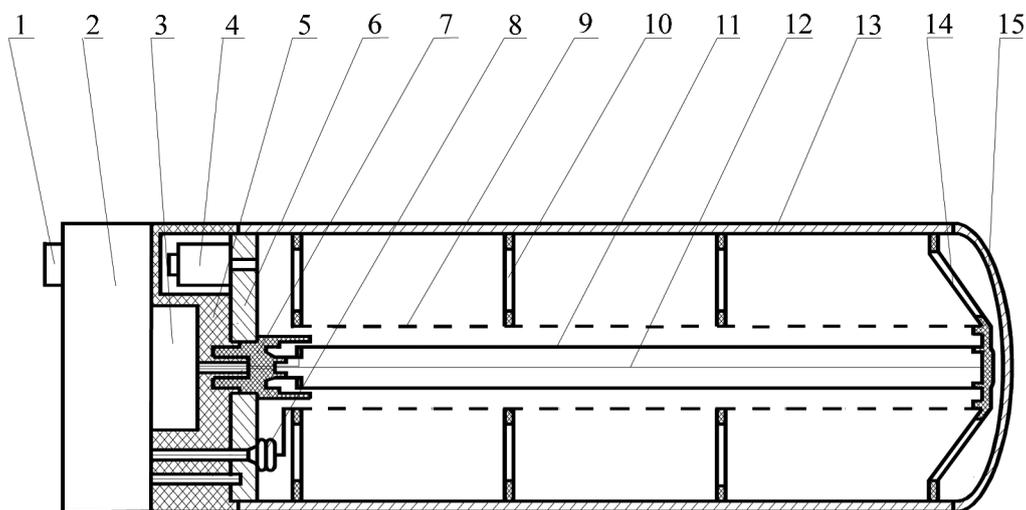


Рис. 1: Общая схема ксенонового гамма-спектрометра: 1 – разъем низковольтного питания; 2 – высоковольтный источник питания; 3 – зарядочувствительный усилитель; 4 – вентиль газового ввода; 5 – тефлоновый изолятор; 6 – фланец; 7 – металлокерамический гермоввод; 8 – высоковольтный вход для экранирующей сетки; 9 – экранирующая сетка; 10 – виброзащитные керамические изоляторы; 11 – анод; 12 – металлическая нить с нулевым потенциалом; 13 – корпус (катод); 14 – опорный керамический изолятор; 15 – эллипсоидальная крышка.

Общие характеристики КГС: энергетический диапазон регистрируемых гамма-квантов – 0.05–4 МэВ; плотность ксенона – 0.31 г/см<sup>3</sup>; давление ксенона при 23 °С – 43 атм; чувствительный объем – 6000 см<sup>3</sup>; масса – 14.5 кг; диаметр катода, сетки и

анода – 117, 40 и 20 мм, соответственно; толщина стенки детектора – 3 мм и габариты –  $\phi 12 \times 76$  см.

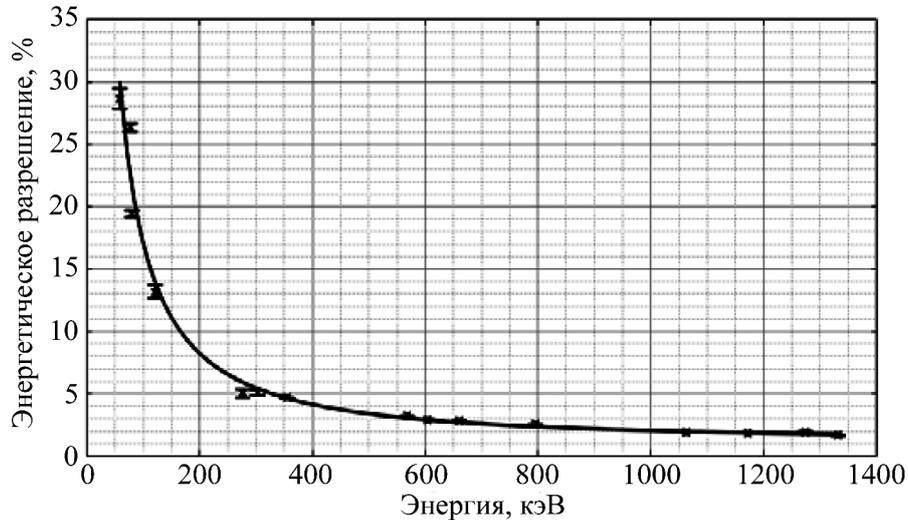


Рис. 2: Зависимость энергетического разрешения от энергии гамма-квантов.

На рис. 2 представлена зависимость энергетического разрешения КГС от энергии регистрируемых  $\gamma$ -квантов. Во время измерений образцовые спектрометрические гамма источники (ОСГИ) устанавливались на расстоянии 20 см от боковой поверхности КГС. На рис. 2 видно, что КГС обладает высоким энергетическим разрешением, которое составляет 2.5% для энергии гамма-квантов 662 кэВ, что в 3 раза лучше, чем энергетическое разрешение сцинтилляционного детектора NaI(Tl).

На рис. 3 приведена измеренная с помощью АЦП и многоканального анализатора зависимость положения пика полного поглощения в гистограмме распределения амплитуд импульсов сигнала от энергии гамма-квантов. Отклонение измеренных значений от прямой линии не превышает 0.5% во всем рассматриваемом энергетическом диапазоне от 60 до 1332 кэВ, что демонстрирует хорошую линейность КГС, которая важна для идентификации РАО.

*Моделирование КГС для задач характеристики РАО.* Моделирование гамма спектрометра на основе сжатого ксенона для задач характеристики РАО в реальных условиях измерений проводились с применением пакета программ GEANT4 [5]. Моделирование физических процессов переноса  $\gamma$ -излучения в контейнере осуществлялось методом Монте-Карло. Он позволяет описать геометрию эксперимента любой сложности.

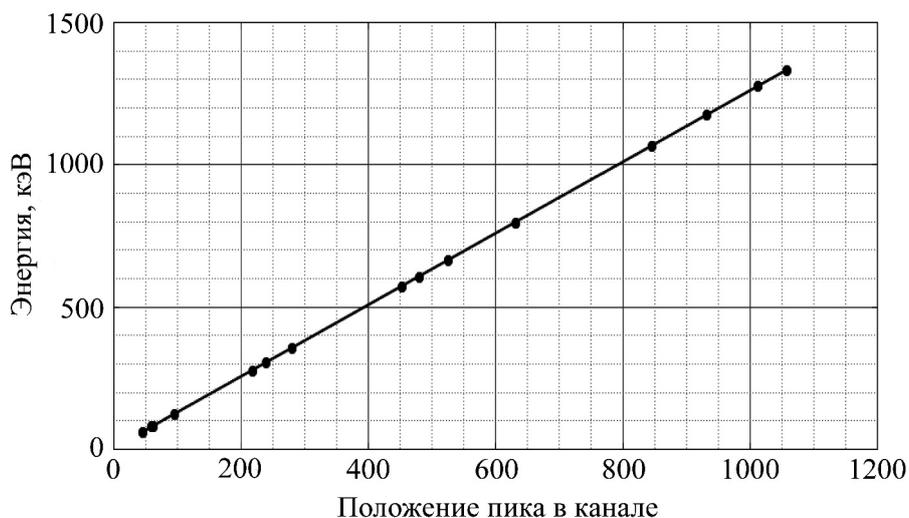


Рис. 3: Зависимость энергии гамма-квантов от положения пика полного поглощения.

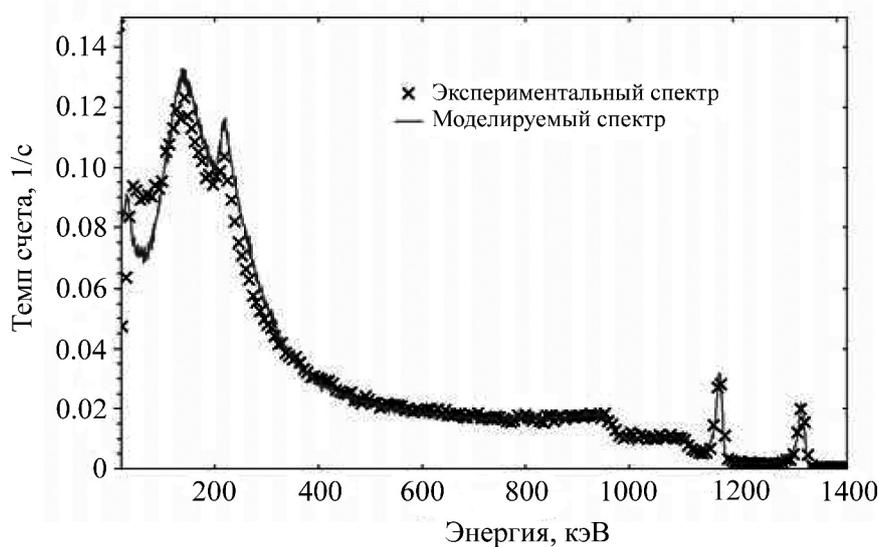


Рис. 4: Сравнение моделируемого и экспериментального спектров для источника  $^{60}\text{Co}$ .

Для проверки корректности виртуальной модели КГС проводился сравнительный анализ моделируемых и экспериментальных спектров, набранных от источников ОСГИ. На рис. 4 видно, что моделируемый спектр от источника ОСГИ  $^{60}\text{Co}$  с активностью 98.5 кБк достаточно хорошо согласуется с экспериментальным. Присутствует некоторое отличие в малых энергиях комптоновски рассеянных  $\gamma$ -квантов, обусловленное, по-видимому, взаимодействием излучения с окружающим спектрометр веществом.

*Определение активности изотопов в контейнере.* Для характеристики радиоактивных отходов при помощи КГС с объемом 6 литров проводились исследования в ФГУП «Торно-химический комбинат». Объектом исследований был контейнер размерами  $215 \times 215 \times 77$  см<sup>3</sup> и массой содержимого 1300 кг. Толщина стальной стенки 8 мм. Контейнер был наполнен кусками стали, загрязненной радионуклидами <sup>137</sup>Cs и <sup>60</sup>Co.

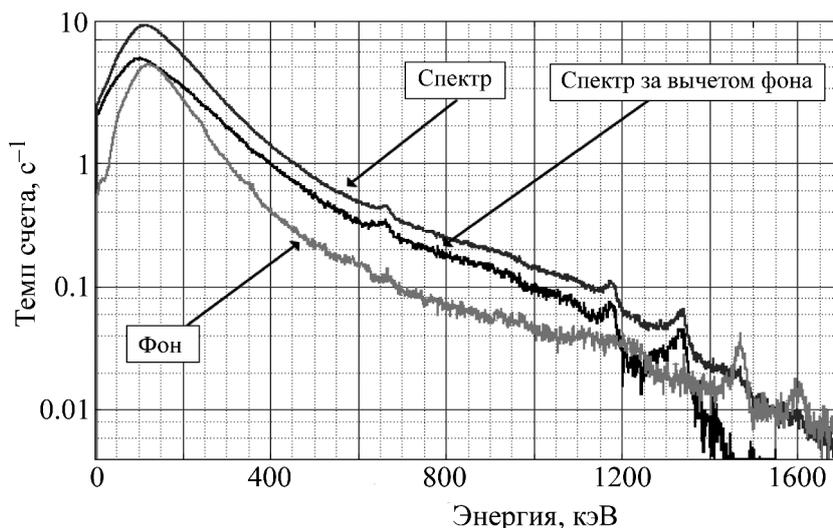


Рис. 5: Фоновый и гамма спектры от контейнера.

На рис. 5 представлены спектры гамма излучения от контейнера, содержащего РАО с фоном и без фона. Измерения проводились с помощью КГС объёмом 6 литров на расстоянии 2.5 м от боковой поверхности контейнера. В спектре присутствуют пики с энергиями 662 (<sup>137</sup>Cs), 1174 и 1332 кэВ (<sup>60</sup>Co). Для нахождения активности радиоактивных изотопов использовался комбинированный метод определения активности РАО на основе сравнения экспериментальных спектров и спектров, моделированных как описано выше.

Для того, чтобы получить корректные значения активности радиоактивного содержимого контейнера, было проведено моделирование эксперимента по регистрации гамма излучения с помощью КГС. Расположение детектора и размеры контейнера совпадали с геометрией эксперимента. Моделирование было проведено в предположении, что вещество содержимого контейнера (сталь) было распределено равномерно по объему контейнера. Активность радиоактивного вещества (<sup>137</sup>Cs и <sup>60</sup>Co) в расчете была задана в размере 400 МБк (116.5 кБк/дм<sup>3</sup>) для каждого изотопа и носит изотропный характер. Полученные результаты представлены в таблице 1. Суммарный темп счета составляет

$263 \pm 16$  имп/с под пиком 662 кэВ,  $91 \pm 8$  имп/с под пиком 1174 кэВ и  $84 \pm 8$  имп/с под пиком 1332 кэВ. Вычисление активности изотопов РАО проводились по формуле:

$$A^E = A^M \frac{\sum_j^n S_j^E}{\sum_j^n S_j^M},$$

$A^E$  – экспериментальная активность радионуклида в источнике;  $A^M$  – моделируемая активность радионуклида в источнике;  $S_j^E$  – экспериментальная площадь под данным пиком полного поглощения;  $S_j^M$  – площадь под данным пиком полного поглощения в моделируемом спектре.

Т а б л и ц а 1

*Результаты моделирования и измерения гамма-излучения от контейнера*

Изотоп	$^{137}\text{Cs}$	$^{60}\text{Co}$	
Энергия линии, кэВ	662	1173	1332
Интенсивность экспериментального пика, имп/с	1.50	1.18	0.88
Интенсивность моделируемого пика, имп/с	263	91	84
Моделируемая активность, МБк	400	400	
Экспериментальная активность в контейнере рассчитанная по (1), МБк	2.28	4.71	
Рассчитанная удельная активность изотопа в контейнере, кБк/кг	1.76	3.62	

Суммарная активность содержимого контейнера составляет 6.99 МБк, что соответствует удельной активности 5.38 кБк/кг. Данный уровень активности контейнера относится к низкоактивным отходам.

*Заключение.* Проведено исследование образцов радиоактивных отходов, содержащихся в контейнере с помощью ксенонового гамма спектрометра объемом 6 литров. Измерения гамма спектров показали, что в контейнере размерами  $215 \times 215 \times 77$  см<sup>3</sup> и массой содержимого 1300 кг присутствуют радиоактивные изотопы  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{60}\text{Co}$ . Проведено моделирование ксенонового гамма спектрометра с целью определения активности объёмных радиоактивных источников, содержащихся в контейнере, по измеренным спектрам. По результатам анализа экспериментальных и моделируемых данных суммарная активность изотопов составила 6.99 МБк, что соответствует удельной активности 5.38 кБк/кг. Проведенные измерения позволяют сделать вывод о возможности использования КГС для решения задач характеристики РАО.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] A. S. Novikov, S. E. Ulin, et al., Opt. Eng. **53**(2), 021108 (2014)
- [2] К. Ф. Власик, В. М. Грачев и др., ПТЭ № 5, 114 (1999).
- [3] В. В. Дмитренко, К. Ф. Власик, В. М. Грачев и др., ПТЭ № 4, 3 (2012).
- [4] С. Е. Улин, В. В. Дмитренко и др., Вопросы электромеханики **114**, 43 (2010).
- [5] С. Н. Пья, В. М. Грачев и др., Краткие сообщения по физике ФИАН, № 9, 9 (2014).

Поступила в редакцию 25 июня 2015 г.