

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ КСЕНОНОВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ ОЦЕНКИ АКТИВНОСТИ ИЗОТОПА $^{60}_{27}\text{Co}$

*И. А. Южаков¹, А. И. Маджидов², В. В. Дмитренко, С. Е. Улин,
К. Ф. Власик, В. М. Грачев, Р. Р. Егоров, К. В. Кривова,
З. М. Утешев, И. В. Чернышева, А. Е. Шустов*

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

Представлены результаты испытания ксенонового гамма-спектрометра, основанного на использовании ионизационной камеры с сжатым ксеноном. Для исследования характеристик спектрометра использовался стандартный источник $^{60}_{27}\text{Co}$. Измерены основные характеристики: эффективность регистрации — 2%, энергетическое разрешение — 1,4%.

The results of testing a xenon gamma-ray spectrometer based on the use of an ionization chamber with compressed xenon are presented. A standard source $^{60}_{27}\text{Co}$ was used to study the characteristics of the spectrometer. The main characteristics were measured: registration efficiency — 2%, energy resolution — 1.4%.

PACS: 07.85.Nc; 29.30.Kv

ВВЕДЕНИЕ

Для оценки заражения местности необходимо идентифицировать источник заражения. Для этого необходимо измерить энергетический спектр и оценить активность радиоактивных источников. Иногда это приходится делать в полевых условиях, где применение, например, широко используемых детекторов из чистого германия затруднено из-за необходимости охлаждения детектора до криогенных температур. Одним из таких устройств считается ксеноновый гамма-спектрометр. Ксеноновый гамма-спектрометр имеет хорошее энергетическое разрешение, однако оценивать активность на данном устройстве довольно проблематично. Это связано с тем, что эффективность регистрации довольно низкая и зачастую значения активности получались довольно низкими либо же сильно завышенными. В представленной работе приводятся результаты измерений и методы обработки спектров радионуклида $^{60}_{27}\text{Co}$.

¹E-mail: ilya144133@gmail.com

²E-mail: AIMadzhidov@mephi.ru.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Ксеноновый гамма-спектрометр представляет собой цилиндрическую ионизационную камеру с экранирующей сеткой, работающую в импульсном режиме. Камера имеет размеры: диаметр 110 мм и длину 170 мм. Она наполнена сверхчистым ксеноном, плотность которого составляет 0,3 г/см³. Общий вид установки и его принципиальная блок-схема показаны на рис. 1.

Аналогичный ксеноновый гамма-спектрометр КСЕНИЯ также был использован в наиболее длительный период измерения на орбитальной станции «МИР» для изучения космических гамма-всплесков [2].

Активность образца оценивается по формуле

$$A_m = 4\pi \frac{N_{\text{пик}}}{\varepsilon\eta\Omega t} \cdot 100\%,$$

где A_m — активность источника на момент измерения; η — квантовый выход: количество гамма-квантов данной энергии на каждые 100 распадов изотопа. Необходимо учесть, что распад радиоактивного ядра происходит на различные возбужденные уровни дочернего нуклида и высвечивание гамма-квантов может происходить различными каналами, поэтому количество испущенных гамма-квантов может отличаться от количества распавшихся ядер. Согласно приведенной формуле также учитывалось время набора t и количество событий в пике полного поглощения $N_{\text{пик}}$. Ω — телесный угол, учитывающий расстояние между источником излучения и детектором. Следует также подчеркнуть, что согласно известным данным по радионуклидам [4] $^{60}_{27}\text{Co}$ испускает две главные гамма-линии: 1,173 МэВ (100%) и 1,332 МэВ (100%). Для $^{60}_{27}\text{Co}$ есть возможность упростить эту процедуру: так, на один распад $^{60}_{27}\text{Co}$ испускается по одному фотону разной энергии, а среднее арифметическое испускаемых энергий составляет примерно 1,25 МэВ. То есть мы можем вместо двух фотонов с разными энергиями (1,173 и 1,332 МэВ) взять те же два фотона с одинаковой энергией: 1,25 МэВ, но приписать им выход 200%.

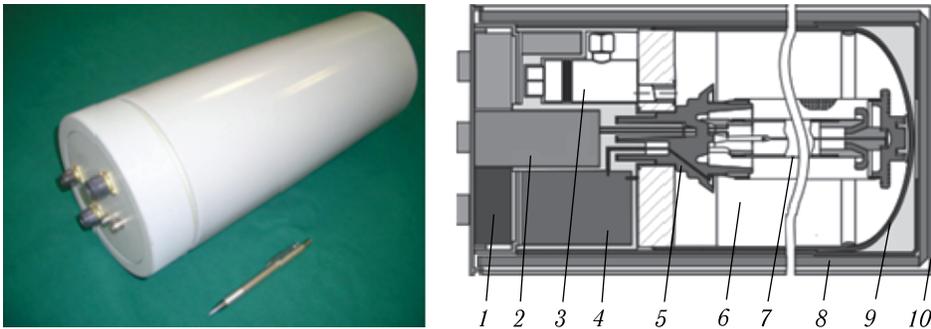


Рис. 1. Внешний вид ксенонового гамма-детектора и его принципиальная блок-схема: 1 — преобразователь напряжения для высоковольтного источника; 2 — зарядочувствительный усилитель; 3 — кран для наполнения детектора газом; 4 — блок высоковольтного питания; 5 — керамический гермоввод; 6 — цилиндрическая ионизационная камера; 7 — анод; 8 — термоизоляция; 9 — корпус ионизационной камеры; 10 — защитный алюминиевый корпус. Рисунок взят из [1]

Реальную активность естественного распада в соответствии с временем приобретения источника ОСГИ в нашей работе следует учесть уже так, как если на момент измерений активность источников могла бы существенно упасть, в связи с чем требуется ввести поправку на активность:

$$A = A_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

где A_0 — значения активности источника в начальный момент времени; t — время, прошедшее после поступления радионуклида; $T_{1/2}$ — период полураспада ${}^{60}_{27}\text{Co}$. В дальнейшем именно на это условное значение мы будем ссылаться.

Значения для телесного угла определяются особенностью геометрии. В нашем случае формула для телесного угла:

$$\Omega = 4 \arctg \frac{ab}{2d\sqrt{d^2 + a^2 + b^2}},$$

где d — расстояние между источником и детектором; a и b — размеры прямоугольного сечения детектора.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Измерения характеристик спектрометра проводились в условиях, представленных на рис. 2 диапазоне от 1 до 2,5 м. Располагать источник ближе нерационально, так как до 1 м наблюдается значительное увеличение мертвого времени. Кроме того, проводилась предварительная серия измерений для оценки эффективности детектора.

Полученные экспериментальные данные анализировались по программе «Identification», разработанной на 7-й кафедре НИЯУ МИФИ. Измеренный энергетический спектр от источника, полученный в работе, будет представлен на рис. 3.

Оценена эффективность регистрации в соответствии с приведенной выше формулой. Также из рис. 3 можно было оценить энергетическое разрешение, и оно составило значение около 17 кэВ, что соответствует среднему относительному значению 1,45%. Эффективность регистрации у ксенонового гамма-спектрометра ~ 2,4%. Значения активности источника представлены на рис. 4. Следует также отметить, что полученные значения энергетического разрешения спектрометра хуже почти в 10 раз, чем значения энергетического разрешения для Ge-детекторов. Однако надо отметить, что используемый детектор намного проще в использовании и не требует криогенной техники, как в случае с Ge-детектором.

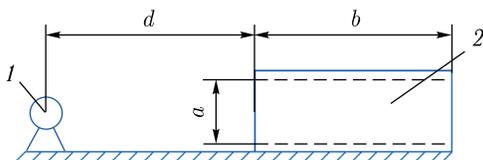


Рис. 2. Схема эксперимента: 1 — источник; 2 — детектор в коллиматоре; d — расстояние от источника до детектора; b — общая длина детектора; a — диаметр боковой стороны

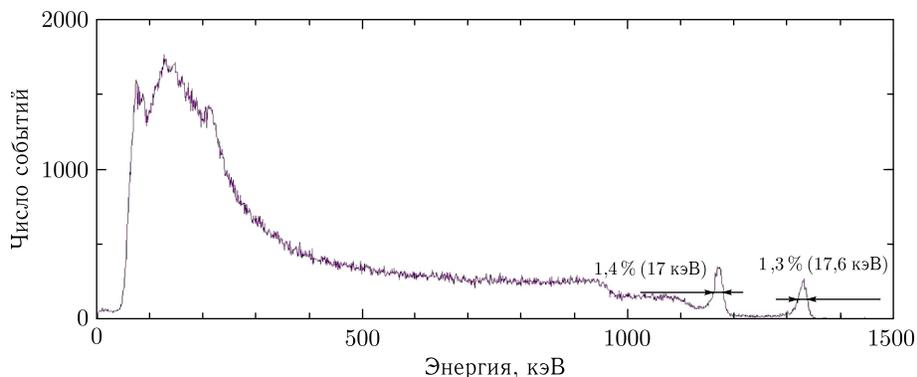


Рис. 3. Измеренный энергетический спектр от источника

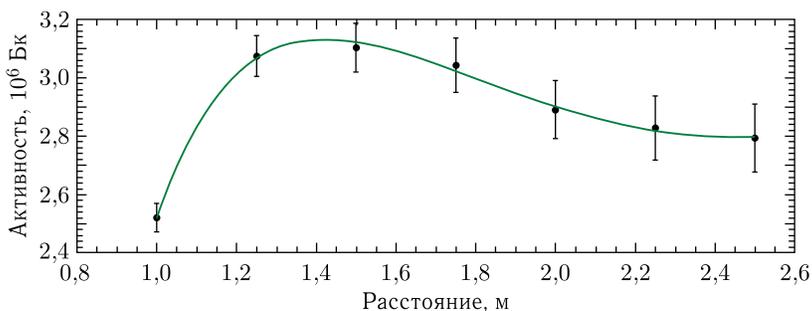


Рис. 4. График зависимости активности от расстояния

На рис. 4 представлены значения активности в зависимости от расстояния между источником и детектором. Значения на расстоянии 1 м слегка отличаются от среднего значения, так как нам приходится фильтровать события при анализе, тем самым часть событий не принимается в расчет. При увеличении расстояния на первых этапах возникает некоторый рост, а затем наблюдается усредненная величина. Активность на момент измерений составляет порядка 3 МБк, а усредненное полученное значение — 2,9 МБк.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- 1) отработана методика оценки активности источника;
- 2) оценена реальная эффективность спектрометра при помещении его в колодезный коллиматор. Эффективность регистрации оценена в 2,4% при регистрации двух линий $^{60}_{27}\text{Co}$;
- 3) измерены значения активности в зависимости от расстояния между детектором и источником.

Полученные результаты можно использовать для сравнения данных экспериментов с результатами моделирования. Кроме того, данные будут использоваться для будущего машинного обучения роботизированной установки, разработанной на 7-й кафедре НИЯУ МИФИ [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Улин С. Е., Дмитренко В. В., Грачев В. М., Власик К. Ф., Утешев З. М., Ищенко А. Д., Духвалов А. Г. Гамма-спектрометры на сжатом ксеноне для обнаружения и идентификации радиоактивных и делящихся материалов // Краткие сообщ. по физике Физ. ин-та им. П. Н. Лебедева РАН. 2020. Т. 47.
2. Ulin S. E., Vlasik K. F., Galper A. M. Influence of Proton and Neutron Fluxes on Spectrometric Characteristics of High Pressure Xenon Gamma-Spectrometer // Proc. SPIE. 1997. V. 3114. P. 499–504.
3. Маджидов А. И., Дмитренко В. В., Улин С. Е., Грачев В. М., Власик К. Ф., Егоров Р. Р., Кривова К. В., Утешев З. М., Чернышева И. В., Шустов А. Е. Перспективы использования ксенонового гамма-спектрометра в качестве регистрирующего устройства на борту автоматизированного и роботизированного гамма-спектрометрического комплекса для вывода из эксплуатации ядерно-физических установок // Радиоактив. отходы. ИБРАЭ РАН. 2022. Т. 2, вып. 19. С. 56–67.
4. Ткаченко В. В., Кутьков В. А., Романцов В. П., Романцова И. В. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. Обнинск, 2015. 285 с.

Получено 1 февраля 2024 г.