

УДК 539.1.074.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ КСЕНОНОВОГО ГАММА-СПЕКТРОМЕТРА ДЛЯ АНАЛИЗА РАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

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

Представлены результаты расчета эффективности регистрации гамма-квантов для ксенонового гамма-спектрометра (КГС), полученные с помощью моделирования методом Монте–Карло с применением программы GEANT4. Проанализированы гамма-спектры от набора основных стандартных гамма-источников (ОСГИ) для реального детектора и проведено сравнение рассчитанной и реальной эффективности регистрации. Проанализированы спектры КГС для определения минимальной концентрации радионуклида ^{152}Eu в смеси ^{137}Cs и ^{60}Co . Показано, что ксеноновый гамма-спектрометр способен зарегистрировать изотоп при концентрации более 40% в смеси.

Ключевые слова: гамма-спектрометрия, эффективность регистрации, ксеноновый гамма-спектрометр, анализ спектров, гамма-источник, моделирование гамма-спектров.

Введение. В настоящее время в мире уделяется особое внимание контролю за перемещением и хранением радиоактивных отходов (РАО). Их транспортировка производится в специальных свинцовых контейнерах, к которым прилагается сопроводительная документация, содержащая информацию о перевозимых материалах. Для проверки содержимого контейнеров на соответствие данным, указанным в документации, необходимы специализированные приборы, способные определить тип радионуклидов и их количественное содержание.

Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, 115409 Россия, Москва, Каширское шоссе, 31; e-mail: gypsy30@gmail.com.

В радиационной лаборатории НИЯУ МИФИ был разработан ксеноновый гамма-спектрометр (КГС) – новый вид гамма-детектора, предоставляющий уникальные возможности для проведения научных и прикладных исследований в различных областях [1]. Энергетическое разрешение детектора составляет 2% для энергии γ -квантов 662 кэВ (линия ^{137}Cs), что в 5–6 раз лучше, чем разрешение сцинтилляционных гамма-детекторов на основе NaI или CsI. КГС может регистрировать γ -кванты в энергетическом диапазоне от 0.05 до 3 МэВ.

Целью настоящей работы было создание виртуальной модели детектора, позволяющей моделировать γ -спектры КГС для задач идентификации радиоактивных отходов. В данной работе проведено моделирование спектров для γ -квантов с энергиями от 50 до 1500 кэВ, проанализированы энергетическое разрешение и эффективность регистрации в зависимости от энергии γ -квантов. Исследованы спектры от контейнеров, содержащих РАО, с целью определения минимальной концентрации радионуклида ^{152}Eu в смеси $^{137}\text{Cs}^{60}\text{Co}$.

Описание ксенонового гамма-спектрометра. Ксеноновый гамма-спектрометр представляет собой цилиндрическую импульсную ионизационную камеру с экранирующей сеткой, заполненную сжатым до ~ 40 атм газом на основе смеси ксенона Xe и водорода H_2 , добавляемого для увеличения скорости дрейфа электронов [1, 2]. Чувствительный объем КГС составляет 2000 см^3 при торцевой площади, равной 100 см^2 . Отношение рабочего объема ионизационной камеры к общему объему составляет 88%. Схема спектрометра и его основные физические характеристики представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Параметры ксенонового гамма-спектрометра

Энергетический диапазон, МэВ	0.05-2
Энергетическое разрешение (на линии 662 кэВ), %	2.0
Плотность ксенона, $\text{г}/\text{см}^3$	0.28
Чувствительный объем, см^3	2000
Масса, кг	5
Площадь торцевой и боковой чувствительной поверхности, см^2	97
Габариты: длина \times диаметр, мм	320 \times \emptyset 145
Напряжение питания, В	+24

Моделирование ксенонового гамма-спектрометра. Моделирование спектров КГС проводилось при помощи пакета библиотек GEANT4 [4]. Программа позволяет полу-

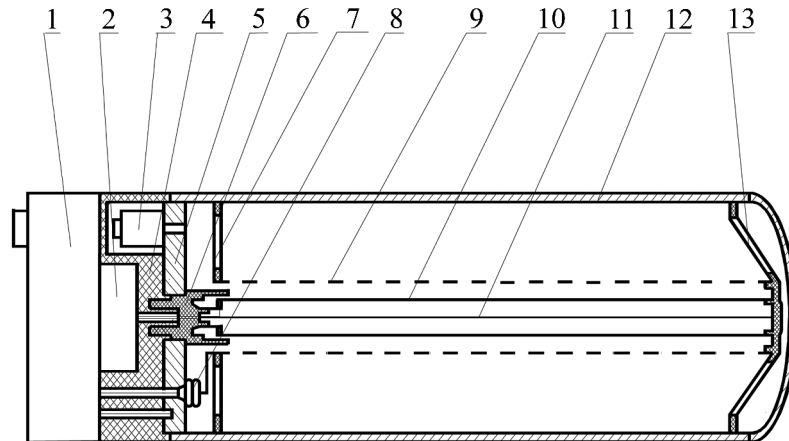


Рис. 1: Схема ксенонового гамма-спектрометра. 1 – источник высоковольтного питания; 2 – зарядочувствительный усилитель; 3 – вентиль газового ввода; 4 – корпус блока электроники; 5 – фланец; 6 – металлокерамический гермоввод; 7 – виброзащитный керамический изолятор; 8 – металлокерамический высоковольтный вход для экранирующей сетки; 9 – экранирующая сетка; 10 – анод; 11 – металлическая нить с нулевым потенциалом; 12 – корпус детектора (катод); 13 – фигурный керамический изолятор.

чить информацию о месте взаимодействия γ -кванта, электронов и позитронов, типе взаимодействия и выделившейся внутри рабочего объема энергии.

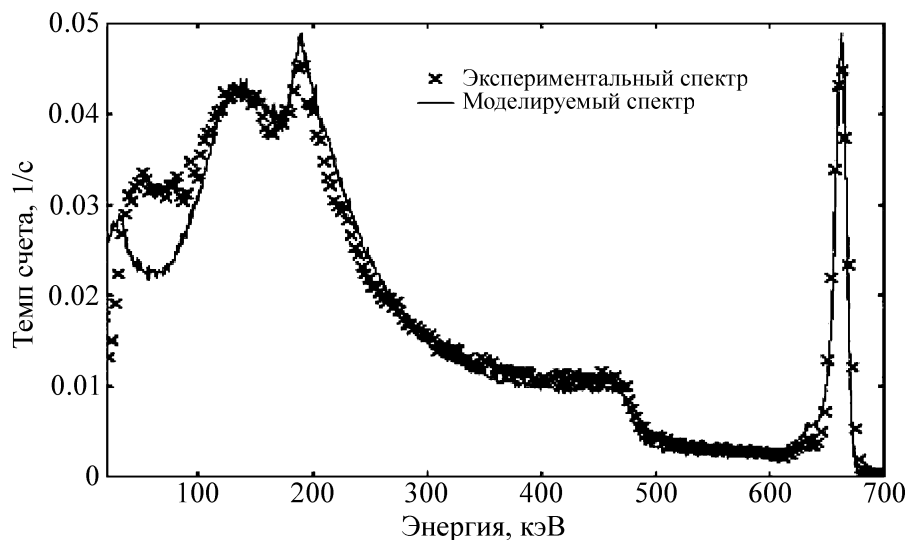


Рис. 2: Сравнение моделируемого и экспериментального спектров для энергии γ -квантов 662 кэВ.

На рис. 2 показано сравнение моделируемого и экспериментального спектров для энергии налетающих γ -квантов 662 кэВ. Моделируемый спектр достаточно хорошо согласуется с экспериментальным.

Анализ эффективности регистрации КГС. Были смоделированы спектры от точечных источников γ -квантов с диапазоном энергий от 50 до 1500 кэВ. Проанализирована эффективность регистрации моделируемого КГС. Эффективность реального детектора определялась с помощью γ -источников из набора ОСГИ (^{57}Co , ^{60}Co , ^{133}Ba , ^{137}Cs и ^{241}Am). Сравнение представлено на рис. 3. В области малых энергий имеется расхождение, что, вероятно, связано с недостаточной точностью описания конструкции виртуального детектора.

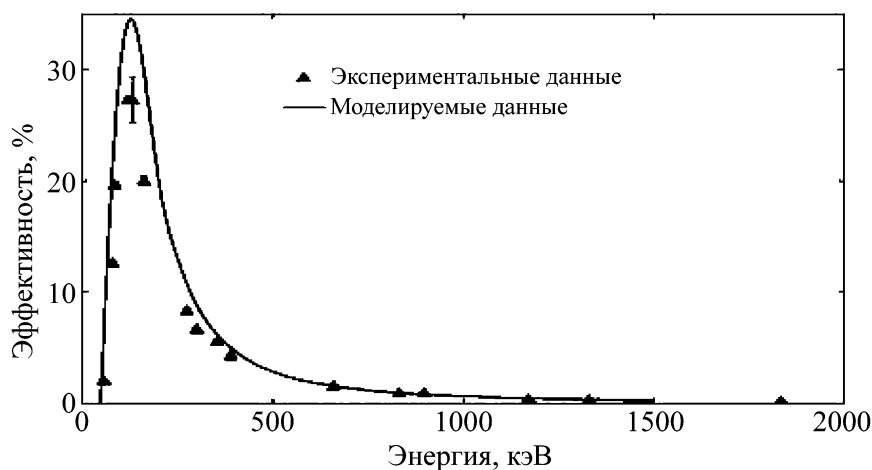


Рис. 3: Сравнение эффективности регистрации моделируемого и реального КГС.

Проведено моделирование спектров γ -излучения от объемного γ -источника различных энергий. Источник представляет собой шар с радиусом 1 см, состоящий из песка с равномерной объемной активностью. Сравнение эффективностей регистрации точечного и объемного источников представлено на рис. 4. Эффективность регистрации определялась по формуле (1)

$$\eta = \frac{4\pi I}{\Omega N_{\text{emitted}}}, \quad (1)$$

где I — количество зарегистрированных событий, N_{emitted} — количество испущенных источником гамма-квантов, Ω — телесный угол детектора.

Для анализа и определения минимальной концентрации ^{152}Eu , которую КГС способен зарегистрировать в смеси ^{60}Co , ^{137}Cs , были промоделированы спектры объемного источника, расположенного в промышленном контейнере объемом 0.86 м^3 . Размеры

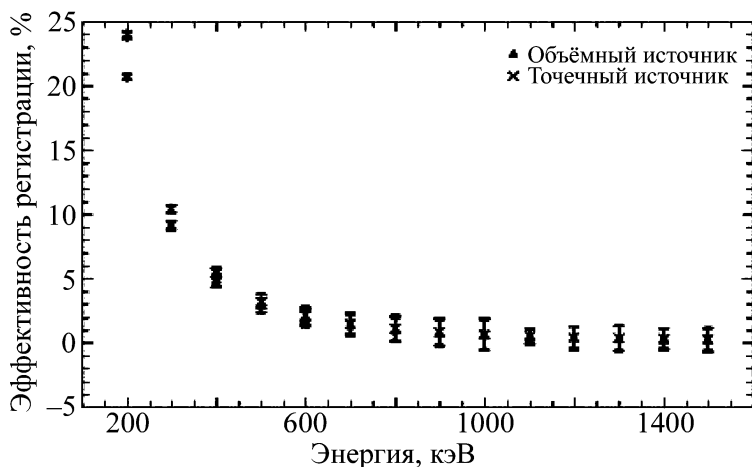
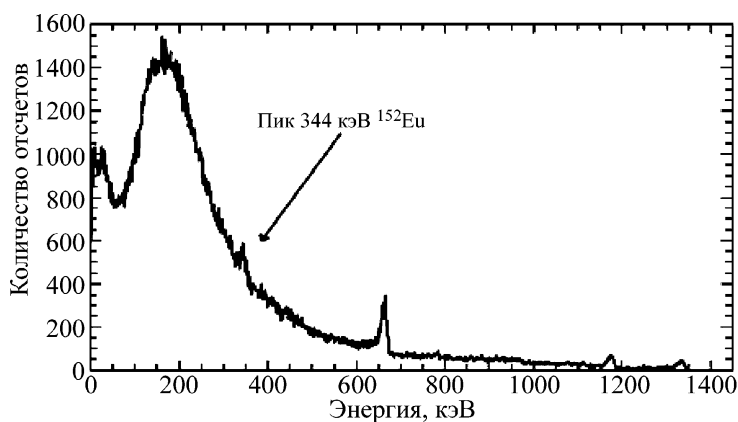


Рис. 4: Сравнение эффективности регистрации точечного и объёмного источников.

контейнера $1320 \times 1032 \times 660$ мм.

Для определения возможности идентификации изотопа ^{152}Eu в смеси ^{137}Cs и ^{60}Co проведен анализ спектров от γ -источника. Определялся уровень значимости пика 344 кэВ в спектре. Пример одного из спектров представлен на рис. 5.

Рис. 5: Спектр смеси ^{152}Eu 35%, ^{137}Cs 50%, ^{60}Co 15%.

Для оценки минимальной концентрации европия в смеси с цезием и кобальтом, в которой можно идентифицировать радионуклид, проводился анализ спектров и находился уровень значимости для пика 344 кэВ. Уровень значимости [3] определялся как отношение числа событий под пиком к флуктуациям фоновой подложки:

$$S = \frac{I}{\sigma_{\text{background}}}, \quad (2)$$

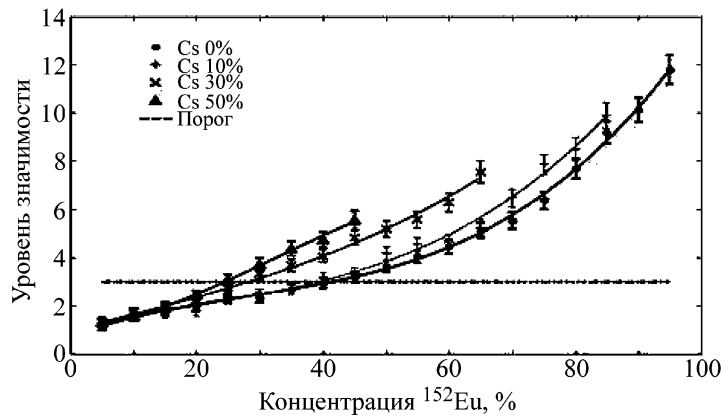


Рис. 6: Уровни значимости пика 344 кэВ в смеси ^{60}Co и ^{137}Cs .

где I – площадь пика за вычетом фона, $\sigma_{\text{background}}$ – флуктуация фона в области пика.

На рис. 6 представлены зависимости уровней значимости пика от концентрации (по активности) изотопа ^{152}Eu в смеси. Пик ^{152}Eu можно обнаружить в смесях с концентрацией более 40% (по массе).

Заключение. С помощью созданной на основе GEANT4 программы промоделированы спектры, регистрируемые КГС. Проанализированы γ -спектры от набора источников ОСГИ для реального детектора и проведено сравнение эффективности регистрации реального и моделируемого детекторов. Проведены оценка и сравнение эффективностей регистрации для моделируемых точечного и объёмного γ -источников. Проанализированы спектры от КГС для определения минимальной концентрации радионуклида ^{152}Eu в смеси ^{137}Cs и ^{60}Co . Установлено, что КГС способен зарегистрировать изотоп при концентрации более 40% (массовых) в смеси.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] К. Ф. Власик, В. М. Грачев, В. В. Дмитренко и др., ПТЭ, № 5, 114 (1999).
- [2] В. В. Дмитренко, К. Ф. Власик, В. М. Грачев, и др., ПТЭ, № 4, 3 (2012).
- [3] S. Bityukov, JHEPh **09**, 060 (2002).
- [4] GEANT4 TOOLKIT [Электронный ресурс]: Пакет моделирования взаимодействия частиц с веществом. URL <http://geant4.cern.ch>.

Печатается по материалам III Международной молодежной научной школы-конференции “Современные проблемы физики и технологий”, Москва, МИФИ, апрель 2014 г.

Поступила в редакцию 19 июня 2014 г.

РЕШЕНИЕ УРАВНЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ (ЛУЧИСТОЙ) ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ СИЛЬНОТОЧНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ В ПЛОТНЫХ ГАЗАХ

У. Юсупалиев

Предложена модель начальной стадии расширения цилиндрических импульсных сильноточных электрических разрядов в плотных газах в приближении лучистой теплопроводности. На основе однородного распределения давления плазмы в разрядном канале и его постоянства на этой стадии дифференциальные уравнения с частными производными (уравнения непрерывности, Эйлера и нелинейной теплопроводности) этой модели сведены к обыкновенным дифференциальным уравнениям, из решений которых определены пространственно-временные зависимости температуры и плотности плазмы в канале от начальных параметров. Полученные зависимости в пределах ошибки измерения согласуются с опытными данными.

Ключевые слова: импульсные сильноточные электрические разряды в плотных газах, уравнение нелинейной теплопроводности.

К цилиндрическим импульсным сильноточным электрическим разрядам в газах высокого давления $p_0 \geq 10^5$ Па (ИСЭР в плотных газах, далее разряды) относятся мощные искровые разряды (длиной $l_0 = 0.3 - 50$ см) [1–7] и длинные излучающие разряды ($l_0 \leq 100$ см) [8–11]. Последние разряды создаются с помощью электрического взрыва достаточно тонких проволочек (диаметром $\varnothing \leq 0.1$ мм).

Структура таких разрядов экспериментально изучалась в работах [1, 7, 9]. В нашей работе [12] на опыте проведено уточнение структуры разрядов: исследовано влияние их УФ-излучения (фотодиссоциации, фотоионизации, фотовозбуждения) на окружающий газ с целью установления механизма их расширения по плотному газу. На основе