

УДК 004.942:621.386.82

Компьютерное моделирование установки для локализации источника гамма-излучения

Т. В. Малыгина, В. В. Марущенко, А. В. Сакун, Н. Г. Стервиедов
Харьковский национальный университет имени В.Н. Каразина, Украина
Національний технічний університет «ХПИ», Україна

Представлена программа для моделирования ядерно-физических процессов прохождения гамма-квантов через детекторы экспериментальной установки, предназначенной для определения в пространстве направления на источник излучения. Представлены результаты моделирования прохождения гамма-квантов через детекторы, спектры поглощенной энергии в детекторах установки, а также приведен анализ полученных спектров.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, GEANT4, CdTe детекторы

Представлено програму для моделювання ядерно-фізичних процесів проходження гамма-квантів через детектори експериментального пристрою, призначеного для визначення у просторі напряму на джерело випромінювання. У роботі наведено результати моделювання проходження гамма-квантів через детектори, спектри поглиненої в детекторах енергії, а також наведено аналіз отриманих спектрів.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання, GEANT4, CdTe детектори

The program for simulation of nuclear physical processes of radiation passing through detectors of experimental setup designed for localization of gamma-quanta source is presented. Simulation results are present in this work as well as the analysis of the obtained spectra.

Key words: computer simulation, GEANT4, CdTe detectors

1. Общая постановка задачи и её актуальность

Актуальность поиска источника проникающего излучения стала очевидной после Чернобыльской аварии, в результате которой на значительной территории были распространены обломки топливных элементов, и обнаружение их местонахождения было первоочередной задачей во время очистки территории. Также важной задачей является локация ядерных взрывов, при которой определяется местоположение эпицентра, мощности и типа ядерного заряда.

В работах [1, 2] были предприняты попытки создания макетов относительно недорогих приборов для определения направления на источник излучения. Рассматривался вариант определения направления на плоскости с переменной толщиной поглотителя от 2 см до 0 см [1], а также использовался кольцевой поглотитель [2] с двумя детекторами. Однако, данные, полученные в результате экспериментов с макетами разрабатываемых приборов, не позволяли сделать вывод об однозначности определения направления на источник даже в плоскостном варианте.

Следующим этапом решения задачи была разработка макета установки, предложенной в [3]. Для выявления возможности определения направления на источник излучения была проведена серия экспериментов, в которой в качестве источника использовался изотоп Cs-137 (гамма-кванты с энергией 661 кэВ), расположенный на расстоянии 0.8 м от геометрического центра поглотителя.

Измерения производились при шаговом повороте поглотителя на 20° в трех плоскостях. Направление на источник гамма-излучения предложено определять из отношения интенсивностей проникающего излучения, измеренных первым и вторым детектором [3].

Целью данной работы является компьютерное моделирование отклика детекторов экспериментальной установки, предназначенной для определения направления на источник излучения.

Задачей, которую решает моделирование данной установки, является выявление возможности однозначного определения направления прихода гамма-кванта в систему.

2. Описание модели

Для моделирования процессов взаимодействия излучения с веществом наряду с аналитическими методами существуют различные средства, использующие метод Монте-Карло, например FLUKA, PENELOPE, EGS, ETRAN, GEANT3, GEANT4, MCNP и др. Каждый инструмент имеет свою область применения, свои ограничения, а также свои преимущества перед другими средствами. Библиотека классов GEANT4 [4] является вполне подходящей для решения поставленной задачи.

GEANT4 обеспечивает полную систему инструментальных средств для моделирования ядерно-физических процессов взаимодействия излучения с веществом: создание геометрии детекторов и установки в целом, описание частиц и физических процессов; транспорт и прослеживание частиц; отклик детектора; моделирование события; управление треком и т.д. [5, 6]

Библиотека классов GEANT4 имеет большой набор служебных функций, а также имеется возможность использовать модуль визуализации [5, 7].

При проведении компьютерного моделирования были описаны геометрические параметры детекторного блока установки, представленные на рисунке 1.

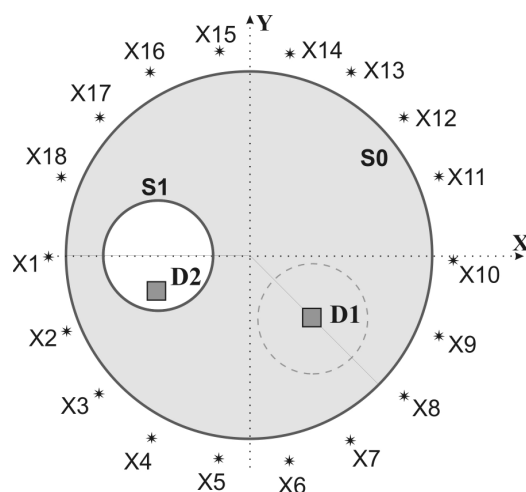


Рис.1. Схема детекторного блока установки, используемого для моделирования.

На рисунке 1 схематично представлены: S0 – алюминиевый шар радиусом 50 мм; S1 – сферическая полость радиусом 15 мм в шаре S0; D1 и D2 – детекторы (CdTe), каждый из которых – куб с ребром 5 мм; X1 – X18 – местоположение источника излучения при различных сериях моделирования. Геометрические параметры модели соответствовали параметрам экспериментальной установки.

3. Используемый метод решения задачи

Задача определения направления прихода гамма-квантов может быть решена методом подсчета разности потоков гамма-квантов в точках D1 и D2, являющейся результатом того, что гамма-кванты до поглощения в детекторах D1 и D2 проходят различный путь в веществе S0 (рис.1).

Для усиления зависимости разности интенсивности сигналов детекторов D1 и D2 от местоположения источника в алюминиевом шаре S0 была сделана полость S1.

Известно, что гамма-кванты с энергией 661 кэВ, использованные для моделирования данной ситуации, при прохождении через вещество испытывают следующие типы взаимодействий: Комpton-эффект, фотоэффект [8, 9]. Комpton-эффект описывается следующими формулами (1 – 3).

Дифференциальное сечение рассеяния определяется формулой Клейна-Нишины-Тамма [6, 8, 9]

$$\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = \pi r_e^2 \frac{m_e c^2}{E_0} Z \left[\frac{1}{\varepsilon} + \varepsilon \right] \left[1 - \frac{\varepsilon \sin^2 \theta}{1 + \varepsilon^2} \right] \quad (1)$$

где r_e – классический радиус электрона,

$m_e c^2$ – масса электрона,

E_0 – энергия налетающего гамма-кванта,

E_1 – энергия рассеянного гамма-кванта,

$\varepsilon = E_0 / E_1$

Z – атомный номер вещества

Угол рассеяния θ определяется по формуле Комптона

$$E_1 = E_0 \frac{m_e c^2}{m_e c^2 + E_0 (1 - \cos \theta)} \quad (2)$$

Важным является то, что гамма-квант, испытавший Комpton-эффект в детекторе, оставляет в нем часть своей энергии в виде электрона отдачи, и эта часть энергии фиксируется детектором.

При этом энергия, зафиксированная детектором, меньше начальной энергии гамма-кванта E_0 (661 кэВ).

Минимальная энергия E_{\min} гамма-кванта (рассеяние назад) определяется по формуле

$$E_{\min} = \frac{1}{1 + \frac{2E}{m_e}} \quad (3)$$

где E – энергия налетающего гамма-кванта

При взаимодействии гамма-кванта с веществом посредством фотоэффекта зафиксированная детектором энергия будет практически равна E_0 [6, 8, 9]. Это объясняется тем, что энергия E_e электрона, выбиваемого из атома посредством фотоэффекта, равна энергии фотона E_0 минус энергия связи E_{ca} электрона на К-оболочке атома.

$$E_e = E_0 - E_{ca} \quad (4)$$

Значение энергии связи E_{na} электрона на К-оболочке – порядка нескольких килоэлектронвольт. Вследствие того, что электроны К-оболочки наиболее сильно связаны в атоме, и эта связь возрастает с атомным номером Z , сечение фотоэффекта (сигма) имеет наибольшее значение для К-электронов и быстро увеличивается при переходе к тяжелым элементам (пропорционально Z^5). Эффективное сечение фотоэффекта $\sigma(E)$ сначала растет с увеличением энергии налетающего фотона, а затем, когда эта энергия становится больше энергии связи электронов на глубоких оболочках атома, $\sigma(E)$ уменьшается.

С учетом вышеизложенного, в качестве материала детекторов выбран CdTe – материал с высоким эффективным атомным номером Z , обеспечивающий достаточно высокое соотношение фотопик/комpton.

4. Компьютерное моделирование установки

Для моделирования ядерно-физических процессов взаимодействия гамма-излучения с веществом детекторов D1, D2 и установки в целом использовалась компьютерная программа Tank, разработанная на языке C++ в ОС Linux SLC4 с использованием библиотеки классов GEANT4 версии 9.3, использовалась модель низких энергий [5, 6]. При описании физических процессов для гамма-квантов учитывались: фотоэффект, комптоновский эффект, эффект рождения пар, т.к. в дальнейшем разработанную программу предполагается использовать для различного диапазона энергий гамма-квантов. А также учитывались необходимые процессы для вторичных частиц. Пороговые энергии E_{cut} были выбраны равными 1 кэВ.

Программа имеет два режима работы: пакетный и интерактивный режим с графическим интерфейсом. Пакетный режим работы программы Tank необходим для моделирования с набором большой статистики событий. Интерактивный режим с графическим интерфейсом предназначен для визуализации модели детекторного блока установки и траекторий частиц для

наиболее полного представления пространственного распределения гамма-квантов во время прохождения через установку. Модуль визуализации использует библиотеку OpenGL-Xlib [7].

На рисунке 2 представлен скрин-шот модели установки, полученный в интерактивном режиме с графическим интерфейсом.

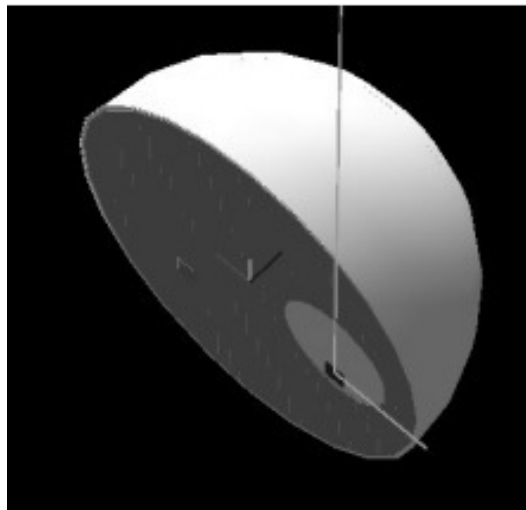


Рис. 2. Визуализация фрагмента установки, используемой при компьютерном моделировании.

Общий вид фрагмента установки (рис. 2) представлен в режиме “solid”. В центре установки изображены координатные оси для наглядного представления взаимного расположения детекторов. Также на рисунке приведен пример визуализации траектории гамма-кванта с энергией 661 кэВ при прохождении через установку.

Разработанная программа Tank в пакетном режиме имеет различные уровни детализации диагностики каждого события: от минимальной диагностики до расширенной детализации по отдельным процессам. При моделировании энергия налетающих гамма-квантов $E_0 = 661 \text{ кэВ}$. Число излученных источником в 4π гамма-квантов задавалось одинаковым и равным 10^8 . Моделирование проводилось для различных относительно геометрического центра детекторного блока положений источника гамма-излучения (рис.1).

5. Результаты моделирования

На рисунке 3 представлены смоделированные спектры поглощенной энергии в детекторах D1 и D2 при расположении источника гамма-квантов с энергией $E_0 = 661 \text{ кэВ}$ в позициях X2 и X8.

На рисунке 3 заметно, что при расположении источника в точке X2 число отсчетов в спектре для детектора D2 $\text{Counts}_{X2(D2)} = 65302$. Число отсчетов в спектре для детектора D1 в несколько раз меньше ($\text{Counts}_{X2(D1)} = 12514$).

В случае расположения источника в точке X8 число отсчетов в спектре для детектора D2 $\text{Counts}_{X8(D2)} = 25106$, а для детектора D1 $\text{Counts}_{X8(D1)} = 103869$.

На рисунке 3 для детекторов D1 и D2 хорошо различимы пики полного поглощения (фотоэффект) и распределения сигналов по энергиям от Комптоновского рассеяния.

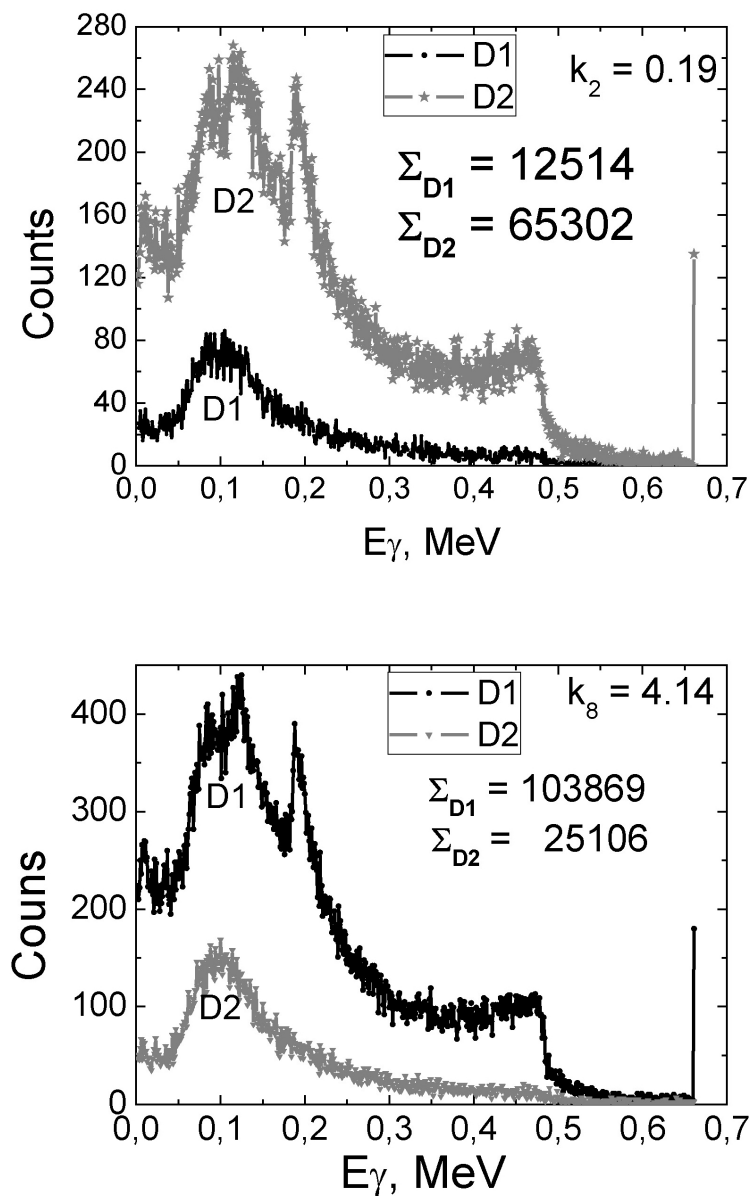


Рис 3. Спектры поглощенной в детекторах D1 и D2 энергии при расположении источника гамма-квантов в позиции X2 и X8

Важным является то, что эти спектры существенно различаются при различном азимутальном положении источника относительно системы детекторов D1, D2. Это объясняется тем, что потоки гамма-квантов до поглощения в детекторах D1 или D2 проходят слои поглощающего вещества различной толщины (в зависимости от положения источника X1 – X18). Следовательно, при изменении азимутального положения источника относительно установки наблюдается отчетливое изменение полного числа отсчетов в спектре, а также числа отсчетов в пике полного поглощения.

Для каждой позиции источника излучения были определены значения общего числа гамма-квантов, зарегистрированных детекторами D1 и D2 и найдены коэффициенты $k_1 - k_{18}$, равные отношению сигналов в детекторах.

График зависимости значения коэффициента от позиции источника излучения представлен на рисунке 4.

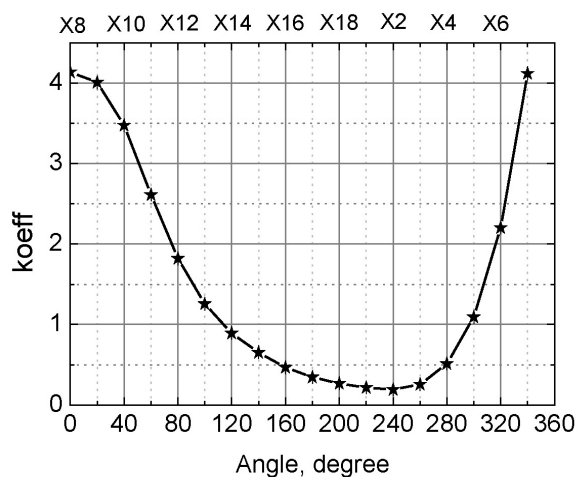


Рис 4. Значения отношения сигналов в детекторах D1 и D2 в зависимости от расположения источника излучения.

В качестве нуля градусов принята точка X8 (рис.1). На рисунке 4 можно заметить однозначную зависимость значения отношения сигналов в детекторах от расположения источника излучения на участке от X8 до X2.

Отмеченная зависимость позволяет, учитывая только лишь отношение сигналов в детекторах D1 и D2, рассчитывать на достаточную угловую чувствительность экспериментальной установки только в части плоскости.

6. Выводы

Проведено компьютерное моделирование экспериментальной установки, в результате которого показана достаточная чувствительность метода измерения двух сигналов из двух независимых детекторов, помещенных в сферический поглотитель (из однородного материала) для определения направления на источник излучения. Изучая видоизменение спектров при азимутальном изменении положения источника излучения, можно сделать вывод о

возможности использования установки для определения направления прихода гамма-квантов.

Результаты могут быть полезны для разработки приборов, предназначенных как для определения точечных гамма-источников на местности, так и для локации термоядерных и ядерных взрывов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беденко Л.Б., Григорьев А.Н. Практичне застосування напівпровідникових детекторів іонізуючих випромінювань: гамма-спектрометр ТДК 10 та пристрій для визначення напряму на джерело випромінювання. // Матеріали науково-практичної конференції «Захист населення і території у надзвичайних ситуаціях». – Харків, 2006. – С. 42.
2. Беденко Л.Б., Григорьев А.Н., Сакун О.В., Коваленко С.М. Дослідження способів локації джерел проникаючих ядерних випромінювань. // Системи озброєння та військова техніка. – 2006. № 4(8). – С. 33–37.
3. Григорьев А.Н., Сакун А.В., Марущенко В.В. Устройство для определения направления в пространстве на точечные источники гамма-излучения. // Материалы международной конференции «Инженерия сцинтилляционных материалов и радиационные технологии ИСМАРТ-2008». – Харьков, 2008.
4. Geant4 – a simulation toolkit. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 2003. A 506. – P. 250-303.
5. Geant4 Physics Reference Manual. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/PhysicsReferenceManual/fo/PhysicsReferenceManual.pdf>. Електрон. версія печ. публікації, 2009. – PDF формат, 534 с.
6. Geant4 User's Guide for Application Developers. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/UserDocumentation/UsersGuides/ForApplicationDeveloper/fo/BookForAppliDev.pdf>. Електрон. версія печ. публікації, 2009. – PDF формат, 329 с.
7. Хилл Ф. OpenGL. Программирование компьютерной графики. – СПб.: Питер, 2002. – 1088 с.
8. Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б.. Квантовая электродинамика. – Москва: Наука, 1969. – 624 с.
9. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П., Теоретическая физика. Том IV. Квантовая электродинамика. – Москва: Наука, 1989. – 724 с.