

МЕТОД МОДЕЛИРОВАНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ШД

В. Г. Батий¹, Д. В. Федорченко², И. М. Прохорец³, С. М. Прохорец³, М. А. Хажмурадов³

¹*Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль*

²*Харьковский национальный автомобильный университет, Харьков*

³*Национальный научный центр "Харьковский физико-технический институт", Харьков*

Предложен метод моделирования процесса измерений при помощи устройства ШД (шар детекторный) с учетом свойств симметрии. Представлен последовательный алгоритм моделирования нескольких источников излучения. Показано, что результаты моделирования имеют хорошее согласие с калибровочными измерениями.

Введение

Устройство ШД представляет собой многодетекторную установку, которая применяется для исследования углового распределения гамма-излучения в условиях объекта «Укрытие» ЧАЭС. В настоящей работе рассматривается метод моделирования процесса измерения угловых распределений от источников различной мощности, расположенных в произвольных точках пространства.

Предлагаемый метод основан на использовании функций отклика устройства ШД. В данном случае функции отклика определяют показания детекторов ШД для точечного источника с заданным расположением. При этом каждому конкретному расположению источника соответствует своя функция отклика.

Расчет функций отклика дает возможность, в частности, произвести уточнение коэффициентов ослабления и проверку результатов калибровки. С этой целью была создана математическая модель установки ШД. Эта модель была введена и просчитана в ИФВЭЯФ (Институт физики высоких энергий и ядерной физики) ННЦ ХФТИ при помощи программы GEANT-3.

Полученные в результате математического моделирования функции отклика могут быть использованы для более точного определения угловых координат точечного источника, а также для моделирования процесса измерения углового распределения в случае нескольких источников разной интенсивности. Для решения этих задач необходим достаточно большой набор функций отклика, соответствующих всевозможным положениям точечного источника. Прямой расчет большого набора функций для всего полного телесного угла отклика сопряжен с большими вычислительными затратами. Существенное сокращение объема расчетов может быть достигнуто за счет использования свойств симметрии детекторного блока.

Математическая модель

С математической точки зрения каждая функция отклика представляет собой вектор значений показаний детекторов ШД.

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i(\theta_i, \varphi_i) \equiv \begin{pmatrix} H_1^{(i)} \\ \vdots \\ H_{32}^{(i)} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Симметрия детекторного блока ШД соответствует пространственной группе симметрии икосаэдра. Это означает, что применяя преобразование симметрии к функции отклика для одного направления на источник, можно получить функцию отклика для другого направления. Для этого необходимо определить представление группы симметрии

икосаэдра в пространстве 32-мерных векторов. Иными словами, нужно задать набор операторов, действующих на вектора \mathbf{F}_i и реализующих представление группы икосаэдра

$$\mathbf{F}'_i = \widehat{G}\mathbf{F}_i, \quad (2)$$

где \widehat{G} – оператор, соответствующий элементу группы симметрии икосаэдра. Очевидно, что действие оператора \widehat{G} на вектор \mathbf{F}_i сводится к некоторой перестановке элементов последнего. С формальной точки зрения, операторы \widehat{G} реализуют подгруппу группы перестановок [1]. В соответствии с теоремой Кэли, любая точечная группа симметрии изоморфна некоторой группе перестановок. В данном случае имеет место взаимно однозначное соответствие между элементами кристаллографической группы симметрии икосаэдра Y_h и операторами перестановки \widehat{G} . Таким образом, задача сводится к построению операторов перестановки \widehat{G} для всех элементов группы симметрии икосаэдра.

Рассмотрим конструктивный алгоритм, который реализует задачу построения оператора перестановки для любого вращения, принадлежащего группе симметрии Y_h . Прежде всего заметим, что детекторный блок можно рассматривать как икосаэдр, в вершинах которого и в центрах граней расположены коллимирующие отверстия детекторов. При вращениях, принадлежащих группе симметрии Y_h , очевидно, каждая грань икосаэдра будет переходить в другую его грань. Для построения соответствующего оператора перестановок достаточно рассмотреть преобразование одной фиксированной грани икосаэдра, например грани, в центре которой находится детектор 2 (табл.1).

Таблица 1. Координаты расположения центров отверстий (в сферической системе координат)

№	θ , градус	φ , градус	№	θ , градус	φ , градус
1	0	0	17	100,8	36
2	37,4	0	18	100,8	108
3	37,4	72	19	100,8	180
4	37,4	144	20	100,8	252
5	37,4	216	21	100,8	324
6	37,4	288	22	116,6	0
7	63,4	36	23	116,6	72
8	63,4	108	24	116,6	144
9	63,4	180	25	116,6	216
10	63,4	252	26	116,6	288
11	63,4	324	27	142,6	36
12	79,2	0	28	142,6	108
13	79,2	72	29	142,6	180
14	79,2	144	30	142,6	252
15	79,2	216	31	142,6	324
16	79,2	288	32	180	0

Для исследования преобразования грани необходимо зафиксировать как ее положение, так и ее ориентацию. Для этого, кроме указания центра грани, достаточно указать также еще и одну из вершин, принадлежащих этой грани. В нашем случае это будет вершина 1 (см. табл. 1). Легко увидеть, что любое вращение, принадлежащее группе симметрии, может быть задано указанием номеров отверстий, в которые переходят отверстия 1 и 2 при вращении. Пусть в результате вращения отверстие 1 переходит в отверстие p , а отверстие 2 – в отверстие q . Возможные значения номеров p и q определяются в соответствии с табл. 2.

Таблица 2. Центры граней и соответствующие вершины граней

№ грани	Центр грани	Вершины
1	2	1, 7, 11
2	3	1, 7, 8
3	4	1, 8, 9
4	5	1, 9, 10
5	6	1, 11, 10
6	12	7, 11, 22
7	13	8, 7, 23
8	14	9, 8, 24
9	15	10, 9, 25
10	16	11, 10, 26
11	17	7, 23, 22
12	18	8, 24, 23
13	19	9, 25, 24
14	20	10, 26, 25
15	21	11, 22, 26
16	27	22, 23, 32
17	28	23, 24, 32
18	29	24, 25, 32
19	30	25, 26, 32
20	31	22, 26, 32

Обозначим \vec{n}_p и \vec{n}_q - единичные векторы, проведенные из геометрического центра блока в направлении соответствующих отверстий. При помощи этих векторов можем построить матрицу соответствующего вращения в обычном декартовом пространстве. Для этого построим три взаимно ортогональных единичных вектора \vec{e}_x , \vec{e}_y , \vec{e}_z , задающих новую систему координат:

$$\begin{aligned} \vec{e}_z &= \frac{\vec{n}_p}{|\vec{n}_p|}, \\ \vec{e}_y &= \frac{\vec{e}_z \times \vec{n}_q}{|\vec{e}_z \times \vec{n}_q|}, \\ \vec{e}_x &= \vec{e}_y \times \vec{e}_z. \end{aligned} \tag{2}$$

Матрица поворота G в этом случае определяется координатами векторов \vec{e}_x , \vec{e}_y и \vec{e}_z :

$$G = \begin{pmatrix} e_{x1} & e_{y1} & e_{z1} \\ e_{x2} & e_{y2} & e_{z2} \\ e_{x3} & e_{y3} & e_{z3} \end{pmatrix} \tag{3}$$

Определенная таким образом матрица поворота G задает преобразование координат детекторов к новой системе координат. Очевидно, что данная матрица изоморфна оператору перестановки \hat{G} .

Используя матрицу вращения G , легко получить явный вид оператора перестановки. Для этого необходимо при помощи матрицы G найти декартовы координаты отверстий после поворота

$$n'_i = G_{ik} n_k \tag{4}$$

и установить соответствие между новыми координатами и исходными координатами (см. табл. 1). В результате сопоставления получим 32 правила перестановки $\{r \rightarrow r'; r, r' = 1, \dots, 32\}$, где r задает номер отверстия, и тем самым определим оператор перестановки \hat{G} .

Результаты моделирования

Используя рассмотренный выше алгоритм и набор функций отклика для грани 1 (см. табл. 2), найденный в ИФВЭЯФ ННЦ ХФТИ при помощи программы GEANT-3, можно осуществить моделирование процесса измерений углового распределения гамма-излучения при наличии нескольких источников.

Каждый модельный источник излучения, при моделировании, задается соответствующей функцией отклика. Необходимый набор функций отклика можно получить, применяя соответствующие операторы перестановок \hat{G} , рассмотренные выше. Результа-

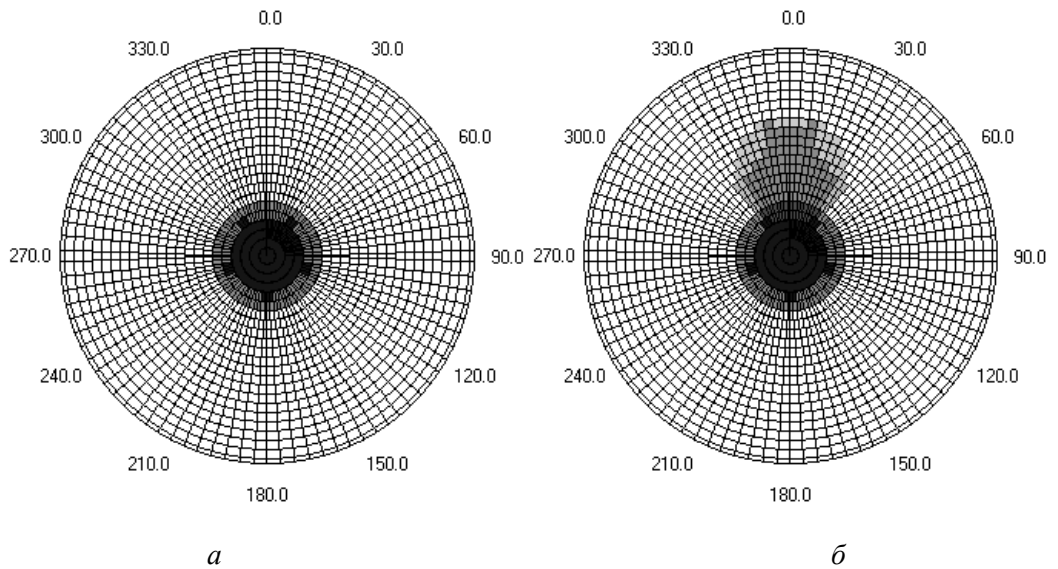


Рис. 3. Угловое распределение излучения для источника с координатами $\varphi = 0$, $\theta = 0$ и источника с координатами $\varphi = 0$, $\theta = 10$ (a); $\varphi = 0$, $\theta = 20$ (б).

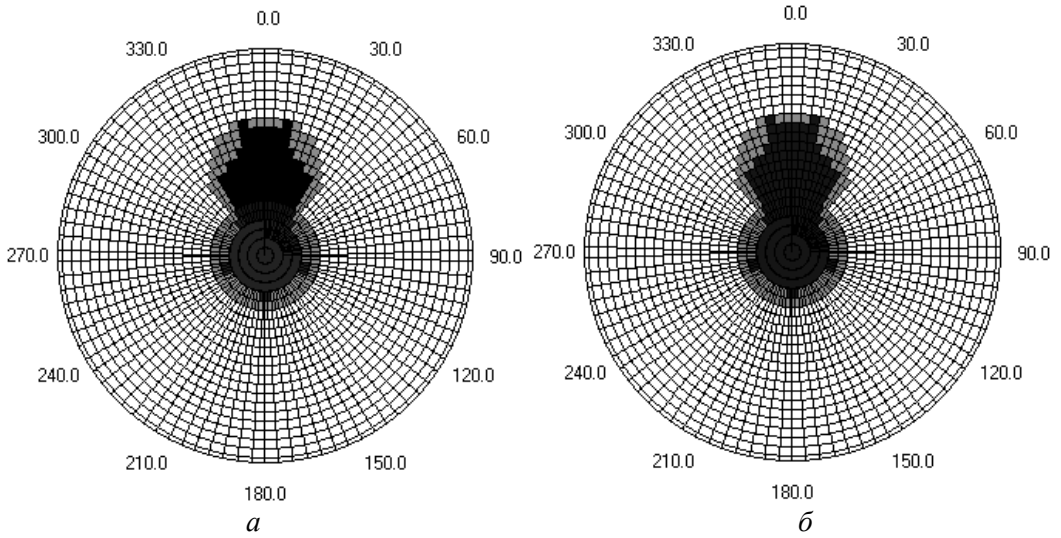


Рис. 4. Угловое распределение излучения для источника с координатами $\varphi = 0$, $\theta = 0$ и источника с координатами $\varphi = 0$, $\theta = 30$ (a); $\varphi = 0$, $\theta = 50$ (б).

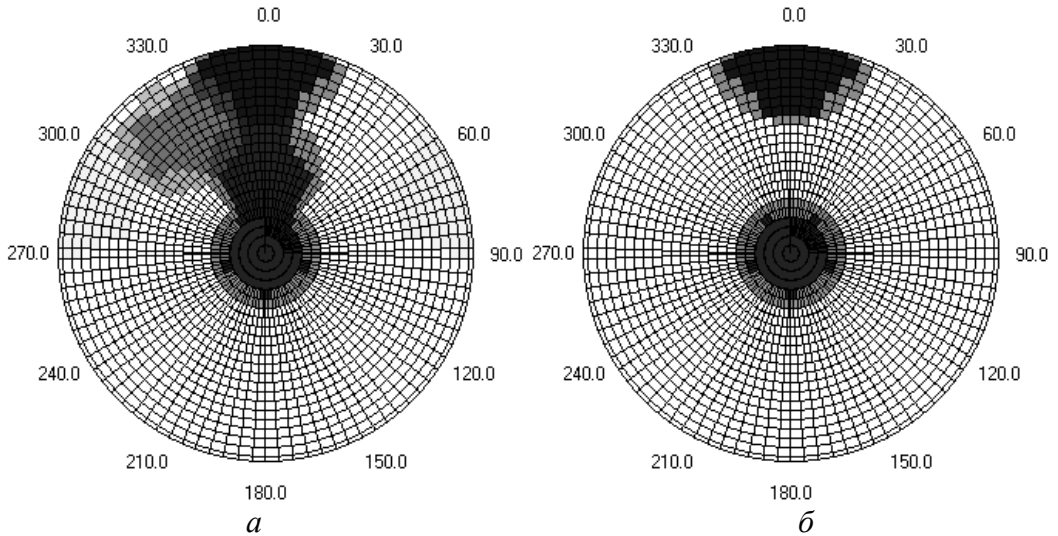


Рис. 5. Угловое распределение излучения для источника с координатами $\varphi = 0$, $\theta = 0$ и источника с координатами $\varphi = 0$, $\theta = 60$ (a); $\varphi = 0$, $\theta = 70$ (б).

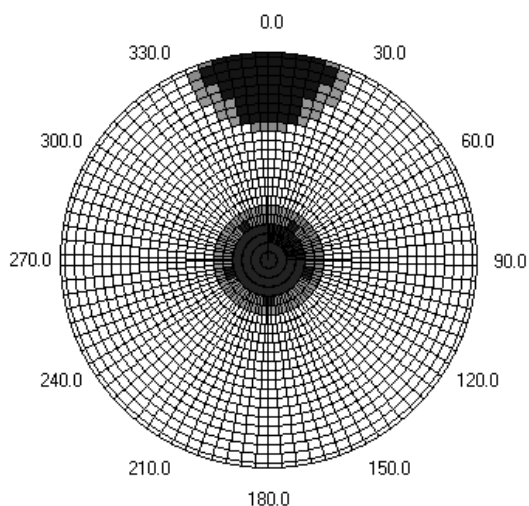


Рис.6. Угловое распределение излучения для источника с координатами $\varphi = 0$, $\theta = 0$ и источника с координатами $\varphi = 0$, $\theta = 90$.

на основании полученных результатов следует, что угловое разрешение устройства ШД составляет приблизительно 20 - 30°.

Выводы

Расчеты с использованием вычислительной программы продемонстрировали хорошее согласие с результатами калибровочных измерений для устройства ШД, что свидетельствует об адекватности примененной методики моделирования. Это позволяет использовать программу для более точной калибровки устройства ШД, оценки углового разрешения детекторного блока и разработки методики аттестации устройства ШД.

Кроме того, результаты моделирования позволяют получить оценку углового разрешения устройства ШД, которая находится в пределах 20 - 30°, что чрезвычайно важно для практических целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Элиот Дж., Добер П.* Симметрия в физике. Т. 2 – М.: Мир, 1983. – 410 с.
2. МПК7 G01T 1/28. Декларацийний патент на винахід № 51989 А від 13.12.2001 г. Спосіб вимірювання кутового розподілу інтенсивності гамма-випромінювання / В.Г. Батій, В.В. Єгоров, О.О. Ключников та ін. - Опубл. в бюл. "Промислова власність", № 12, 16.12.02.
3. МПК7 G01T 1/28. Декларацийний патент на винахід № 51987 А від 13.12.2001 г. / В.Г. Батій, В.В. Єгоров, Ю.А. Закревський та ін. Пристрій для вимірювання кутового розподілу інтенсивності гамма-випромінювання. - Опубл. в бюл. "Промислова власність", № 12, 16.12.02.
4. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М: Наука, 1984.

Поступила в редакцию 21.12.05

**22 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРИСТРОЮ ШД З УРАХУВАННЯМ СИМЕТРІЇ
ДЕТЕКТОРНОГО БЛОКА****В. Г. Батій, Д. В. Федорченко, І. М. Прохорець, С. М. Прохорець, М. А. Хажмуратов**

Запропоновано метод моделювання процесу вимірювань за допомогою пристрою ШД (шар детекторний) з рахуванням властивостей симетрії. Представлено послідовний алгоритм моделювання процедури вимірювань за наявності декількох джерел випромінювання. Показано, що результати моделювання добре узгоджуються з калібрувальними вимірюваннями.

**SH-D DEVICE MATHEMATICAL MODELING WITH ACCOUNT TO DETECTION MODULE
SYMMETRY****V. G. Batiy, D. V. Fedorchenko, I. M. Prokhorets, S. M. Prokhorets, M. A. Khazhmuradov**

Method for Sh-D device measurements simulation with account for symmetry properties is proposed. Exact algorithm for simulation of measurements procedure with multiple radiation sources developed. Modelling results are shown to have perfect agreement with calibration measurement.