

УДК 539.16.07

ОЦЕНКА МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ИНТРОСКОПОВ С КОДИРОВАННОЙ АПЕРТУРОЙ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И СМЕШАННОГО ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М.В. Прокуронов, В.Д. Севастьянов, Р.М. Шibaев

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
sevast@vniiftri.ru

В статье приводятся результаты исследования принципов построения и математического моделирования характеристик макета интроскопа с кодированной апертурой.

The article contains the results of the study of the principles of construction and mathematical modeling of the characteristics of the introscope layout of with the coded aperture.

Ключевые слова: ионизирующие излучения, интроскоп, кодированная апертура, регистрация изображения.

Key words: ionizing radiation, introscope, coded aperture, image registration.

Введение

Ядерная энергетика является одним из основных источников выработки энергии, а в перспективе с развитием термоядерных реакторов будет являться основным источником получения энергии в мире. Главным аргументом такого утверждения является формула А. Эйнштейна $E = mc^2$. В результате ядерных реакций возникают радиоактивные излучения, в том числе быстрые нейтроны, а в реакциях деления образуются радиоактивные продукты деления. Поэтому развитие и совершенствование систем регистрации ионизирующих излучений является важной и актуальной задачей в настоящем и обозримом будущем.

В общем случае наиболее полная информация о поле ионизирующего излучения задаётся распределением пространственно-временной, энергетической и угловой плотностью потока частиц $f(\mathbf{r}, t, \mathbf{e}, \nu)$ [1]. Эта функция задаёт распределение частиц (квантов) в пространстве, времени и по энергии, т.е. определяет, сколько частиц, квантов, с какой энергией и в каком направлении приходят в любую точку среды (пространства) в каждый момент времени. Следовательно, и детектирующее устройство в идеальном случае должно измерять функцию $f(\mathbf{r}, t, \mathbf{e}, \nu)$.

Гамма-телескоп (интроскоп) с кодированной апертурой измеряет направление прихода гамма-кванта, энергию, момент времени регистрации, регистрирует изображения рентгеновских и гамма-источников, т.е. позволяет измерять функцию $f(\mathbf{r}, t, \mathbf{e}, \nu)$. Гамма-телескоп (интроскоп) состоит из коллимато-

ра с кодированной апертурой и координатно-чувствительного детектора (КЧД). В коллиматоре имеются отверстия, определённым образом расположенные, каждое из которых строит изображение на поверхности КЧД, подобно камере-обскуре, и таким образом формируется теневое изображение. По массиву токов разрешающих элементов КЧД декодируется и восстанавливается изображение гамма-источников. Такие приборы для решения прикладных задач можно назвать гамма-интроскопом с кодированной апертурой. Под термином «радиационная интроскопия» понимается совокупность методов изучения протекающих в различных средах, в том числе и оптически непрозрачных, процессов при помощи регистрации излучения ионизирующих источников [2]. Это довольно широкий класс различных методов изучения и контроля разнообразных процессов при помощи регистрации ионизирующих излучений, и наиболее важными из них могут считаться рентгеновская томография и вообще радиометрия излучений человека, в том числе при лечении онкологических заболеваний гамма-излучением и протонным излучением. Также к важным методам можно отнести радиационный неразрушающий контроль и дефектоскопию, радиационную безопасность.

Метод кодированных апертур разрабатывался с целью создания гамма-телескопов, предназначенных для исследований в области рентгеновской и гамма-астрономии, и успешно применяется в фундаментальных и прикладных исследованиях порядка 40 лет. Особенно значительные, выдающиеся достижения были получены в рентгеновской и гамма-астрономии, также значительны достижения при решении прикладных задач. Метод развивался и совершенствовался, и было показано, что с помощью этого метода можно получать изображения точечных и протяжённых гамма-источников на расстояниях между источником и интроскопом, сравнимых с расстоянием между маской и детектором интроскопом ($\sim \leq 5$ м). Это позволяет использовать гамма-интроскоп с кодированной апертурой для обнаружения и локализации источников гамма-излучения и для контроля ядерных установок. Проводятся исследования по созданию медицинских томографов на основе интроскопов с кодированной апертурой. Таким образом, для решения широкого круга задач радиационной интроскопии могут применяться гамма-интроскопы с кодированной апертурой.

В настоящее время развитие цифровых электронных систем, АЦП и многоядерных процессоров, позволяющих проводить параллельную регистрацию аналоговых сигналов детекторов ионизирующих излучений, их преобразование в цифровую форму и дальнейшую параллельную цифровую обработку этих сигналов, что делает возможным быстро и оперативно получать информацию о зарегистрированном ионизирующем излучении. Эта возможность быстрого декодирования и восстановления изображения гамма-источников, а также развитие полупроводниковых детекторов ионизирующих излучений, полупроводниковых регистраторов света сцинтилляцион-

ных детекторов позволяет разрабатывать более совершенные модели гамма-интроскопов с кодированной апертурой.

Регистрация гамма-изображения осуществляется гамма-интроскопами с кодированной апертурой при наличии фонового излучения. Причём фон может быть вызван как гамма-излучением, так и нейтронами и тяжёлыми заряженными частицами. Такие эксперименты могут проводиться при исследовании физических процессов при изучении термоядерных реакций, при исследованиях на ускорителях, нейтронных генераторах. Для таких экспериментов нужна оптимизация параметров коллиматора и защиты интроскопа с целью уменьшения фонового излучения и искажений теневого изображения. Использование в таком интроскопе с кодированной апертурой сцинтилляционного КЧД с цифровой идентификацией нейтронов и гамма-квантов по форме импульса или черенковского КЧД, который регистрирует только электроны (протоны с высоких энергий), в том числе и в импульсном режиме, позволяет реализовать возможность избирательной регистрации частиц. А такая избирательная регистрации типа частиц позволяет рассматривать возможное создание на основе этих детекторов интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников смешанного гамма-нейтронного излучения.

1. Основные характеристики и типы интроскопов с кодированной апертурой

1.1. Принципы построения интроскопов с кодированной апертурой

Гамма-кванты невозможно фокусировать, так же как оптические или инфракрасные, в небольшое пятно в фокальной плоскости телескопа, поэтому для получения изображения гамма-источников существует единственный метод — формирование изображения источника (S, рис. 1) камерой-обскурой (K, рис. 1) и регистрация этого теневого изображения КЧД (D, рис. 1). Геометрические параметры интроскопа с камерой-обскурой определяют две его основные характеристики — угловое разрешение и поле зрения.

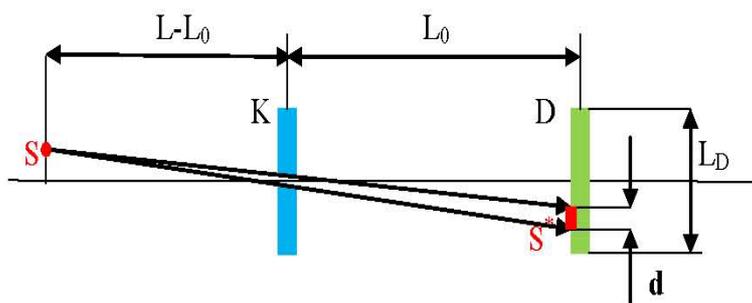


Рис. 1. Формирование изображения гамма-источника (S) камерой-обскурой (K) и регистрация этого изображения КЧД (D)

Угловое разрешение γ и поле зрения α определяются по формулам:

$$\gamma = \arctg(d / L_o); \quad \alpha = 2 \times \arctg(L_D / (2 \times L_o)),$$

L_o — расстояние между коллиматором и входным окном координатно-чувствительного детектора; d — диаметр отверстия камеры-обскуры; L_D — диаметр входного окна координатно-чувствительного детектора.

Следует отметить, что существует взаимно-однозначное соответствие между теньвым изображением и положением источника в поле зрения. При смещении источника будет меняться теньвое изображение. Это довольно простое и ясное свойство камеры-обскуры, но оно весьма важно, так как оно также распространяется и на метод регистрации изображения при помощи коллиматора с кодированной апертурой.

Гамма-интроскоп с кодированной апертурой состоит из коллиматора с кодированной апертурой и КЧД (рис. 2) [3, 4]. Коллиматор с кодированной апертурой — это маска, состоящая из прозрачных и непрозрачных элементов, расположенных перед координатно-чувствительным детектором, каждая из отверстий в маске, подобно камере-обскуре, строит изображение на поверхности КЧД. Излучение падает на коллиматор, проходит через отверстия коллиматора и строит изображение на поверхности КЧД.

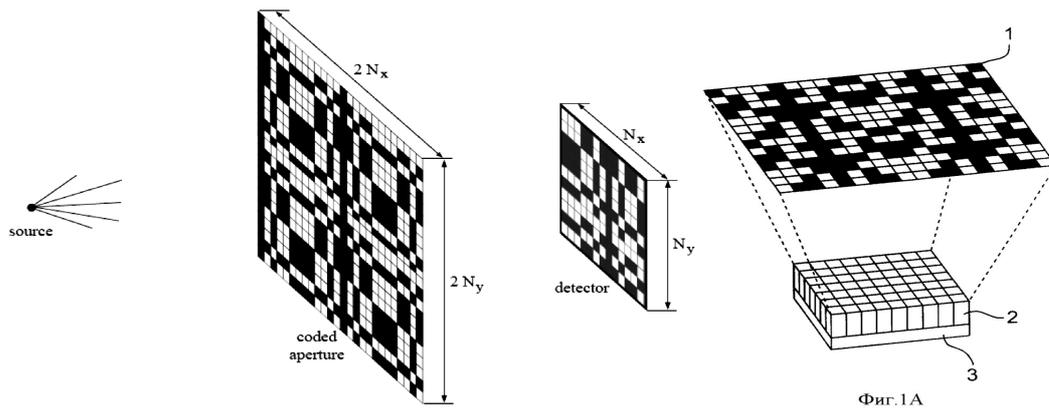


Рис. 2. Система формирования изображений с кодированной апертурой

Формируемое кодированной маской изображение может быть представлено в виде:

$$P = (O * A) + N; \quad P(k, l) = \sum_i \sum_j O(i, j) A(i + k, j + l) + N(k, l),$$

где $P(k, l)$ — элемент изображения P , регистрируемый разрешающим детекторным модулем КЧД, с координатами k, l ; $O(i, j)$ — элемент источника O ; $A(i + k, j + l)$ — элемент матрицы кодирующей маски A , описывающей распределение отверстий в маске; $N(k, l)$ — элемент помехи в зарегистрированном элементе изображения $P(k, l)$; $*$ — оператор свёртки (корреляции).

Для восстановления изображения гамма-источников вводится обратная матрица G , такая, что её свёртка с матрицей кодирующей маски A , близка к д-функции, т.е. $A * G$ д. Тогда восстанавливаемый источник \hat{O} может быть найден с помощью соотношения: $\hat{O} = P * G = O * A * G + N * G$;

$\hat{O}(i, j) = \sum_k \sum_l P(k, l) * G(k + i, l + j)$, которое, в случае выполнения соотношения $A * G$ д, приводится к виду $\hat{O} = O + N * G$, где $N * G$ — некоторая матрица шума в восстановленном источнике \hat{O} , отличная от матрицы шума N в изображении P .

Выбор формы расположения отверстий на маске A , т.е. типа маски A , и соответственно G определяется многими факторами. Это в первую очередь выполнение соотношения $A * G$ д, т.е. наилучшее совпадение зарегистрированного и восстановленного изображения с исходным, обеспечение максимальной чувствительности и соотношения сигнал/шум. С этой точки зрения оптимальным является такое расположение отверстий в кодированной маске коллиматора, которое строится с использованием циклических двоичных последовательностей, в том числе псевдослучайных периодических, нулей и единиц, носящих название равномерно избыточных массивов URAs [3, 4]. Они имеют длину периода — c , и имеют вид $c = 2^n - 1$, где n — натуральное число. Единица на i -м месте последовательности означает наличие отверстия в i -й позиции маски: $A(i) = 1$. Для построения двухмерной маски определённое выше число n выбирается равным чётному числу. Тогда длина периода может быть разложена на множители $c = r \cdot s$, где $r = 2^{n/2} + 1$; $s = 2^{n/2} - 1$. Числа r и s определяют размеры матрицы, которая является основой кодированной маски и носит название базовой маски. Поэтому при построении кодированной маски коллиматора сначала создаётся базовая матрица $Ab(x, y)$, которая и является массивом URAs, обладающая определёнными свойствами. Эта маска имеет размеры $r \times s$, где r и s — простые числа. Для этой маски $Ab(x, y)$ периодическая автокорреляционная функция определяется как [4]:

$$\tilde{\mu}_{AA}(l, k) = \sum_{x=0}^{r-1} \sum_{y=0}^{s-1} Ab(x, y) Ab(x + l, y + k),$$

и она равна

$$\tilde{\mu}_{aa}(l, k) = \begin{cases} K \text{ if } (l, k) = (0, 0) \\ \text{л в противном случае.} \end{cases}$$

Сама же кодированная маска коллиматора (рис. 3) состоит из мозаики рисунка базовой маски (рис. 4), и её размеры определяются числом неповторяющихся циклических перестановок базовой маски, которое равно произ-

ведению $r \times s$. Тогда кодированная маска коллиматора будет иметь размер $(2r-1) \times (2s-1)$ и будет содержать все циклические перестановки базовой маски.

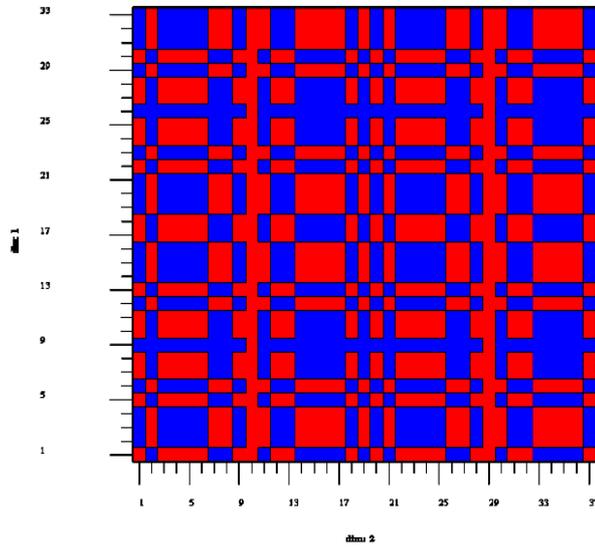


Рис. 3. Кодированная маска коллиматора

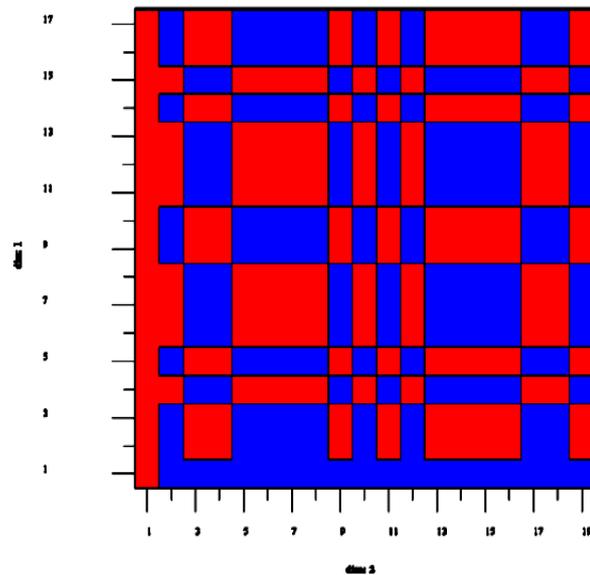


Рис. 4. Базовая кодированная маска

В модели формирования изображения кодированной апертурой предполагается разбиение поля зрения на $r \times s$ элементарных излучающих пикселей,

и на такое же число $r \times s$ разрешающих элементов должен иметь КЧД. Излучение источника, который может находиться в каждом пикселе поля зрения, проходя через кодированную маску коллиматора, создаёт теневое изображение на детекторе, которое представляет собой циклически сдвинутую версию рисунка базовой маски. Таким образом, устанавливается взаимнооднозначное соответствие между пикселом поля зрения, в котором находится источник, и циклически сдвинутой версией рисунка базовой маски. При проведении восстановления изображения источника корреляционная функция между этим теневым изображением источника и соответствующей версией рисунка базовой маски будет равна количеству квантов от источника, зарегистрированных в КЧД (без учёта фона), и нулю, если теневое изображение источника и версия рисунка базовой маски не совпадают (без учёта статистических флуктуаций счёта импульсов в КЧД). Этим и обеспечивается наилучшее совпадение зарегистрированного и восстановленного изображения с исходным.

Гамма-интроскоп с камерой-обскурой обладает малой чувствительностью, т.к. размеры отверстия камеры-обскуры должны быть малы по сравнению с размерами детектора. А использование метода кодирующих апертур позволяет повысить соотношение сигнал/фон по сравнению с одной камерой-обскурой в $\sim (N_0/2)^{0.5} \sqrt{0.5 \cdot N}$, N — число отверстий в коллиматоре с кодированной апертурой.

1.2. Основные характеристики интроскопов с кодированной апертурой

Фактором, определяющим технические характеристики гамма-интроскопа с кодированной апертурой, являются характеристики ионизирующего излучения, для измерения которых предназначен интроскоп с кодированной апертурой. А он позволяет решать широкий спектр задач, связанных с регистрацией изображения источников ионизирующего излучения и измерением спектральных, временных и дозовых характеристик ионизирующего излучения. То есть такой интроскоп позволяет измерять функцию распределения пространственно-временной, энергетической и угловой плотности потока частиц $f(r, t, e, v)$, которой задаётся наиболее полная информация о поле ионизирующего излучения.

Следовательно, характеристики гамма-интроскопа отражают физические параметры измеряемого ионизирующего гамма-излучения. Это амплитудные, временные, спектральные, пространственно-угловые характеристики.

Весьма важными характеристиками интроскопа являются пространственно-угловые характеристики: это угловое поле зрения и угловое разрешение. На рис. 5 изображена геометрическая схема гамма-интроскопа с кодирован-

ной апертурой. Угловое разрешение определяется как $\gamma = \arctg(c/b)$. Полем зрения является угол α , равный $\alpha = 2 \arctg(a/2b)$. Также изображены углы β и Ω , при углах падения больших $\alpha/2$, но меньших $\beta/2$, излучение регистрируется отдельными модулями КЧД, но полностью не создаётся теневое изображение на детекторе, которое представляет собой циклически сдвинутую версию рисунка базовой маски. Поэтому при восстановлении изображения образуются искажения этого изображения. Такие области называются областями неполного кодирования.

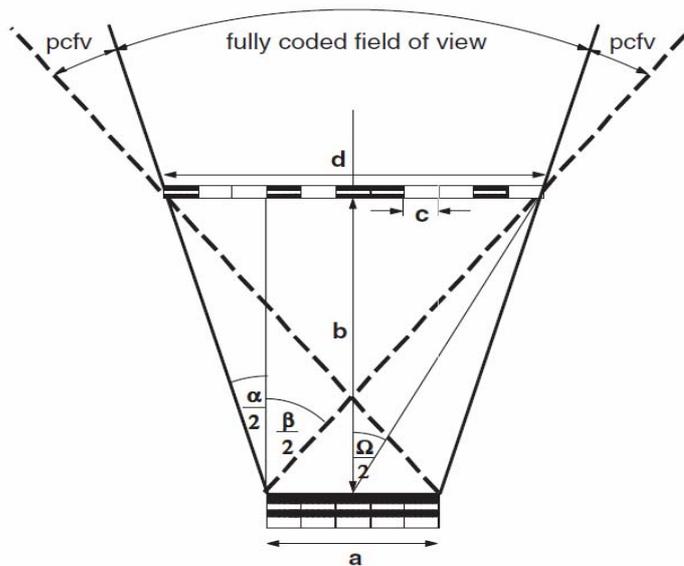


Рис. 5. Геометрическая схема гамма-интроскопа

Основные геометрические параметры гамма-интроскопа определяются по следующему алгоритму, описанному в литературе [3, 4].

1) Определяется коэффициент масштабирования $m = (L + L_0) / L$, где L — расстояние от источника излучения до плоскости кодирующей маски; L_0 — расстояние от кодирующей маски до КЧД (рис. 1). Соответственно, если $L_0 \ll L$, $m \approx 1$.

2) Для координатно-чувствительного детектора с собственным пространственным разрешением g размер элемента кодирующей маски будет равен $d \geq g / m$.

3) При заданном угловом разрешении γ определяем $L_0 \approx d / \gamma$.

4) При заданном поле зрения α и угловом разрешении γ определяются числа r и s :

$$r \geq \alpha / \gamma; \quad s = r - 2.$$

5) Размер входного окна координатно-чувствительного детектора должен быть не менее $m \cdot r \cdot d \times m \cdot s \cdot d$.

6) Кодированная маска должна иметь размеры $d \cdot (2r - 1) \times d \cdot (2s - 1)$.

7) Количество отверстий в кодированной маске составляет: $N_0 \approx (s \cdot r) / 2$.

Геометрические параметры гамма-интроскопа, характеристики коллиматора с кодированной апертурой — коэффициент ослабления падающего излучения, толщина коллиматора, размеры отверстий в коллиматоре, а также характеристики КЧД — пространственное разрешение, толщина, эффективность регистрации излучения в заданном энергетическом диапазоне должны обеспечивать минимальные искажения в регистрируемом КЧД теновом изображении источника излучения. Это теновое изображение должно соответствовать определённой циклически сдвинутой версии рисунка базовой маски. Соответственно, чем меньше искажения в теновом изображении, тем меньше искажения в восстановленном изображении.

Характеристики гамма-интроскопа с кодированной апертурой исследовались путём статистического моделирования, была разработана программа аналогового моделирования по методу Монте-Карло. В ней разыгрываются основные процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом — фотоэффект, комптоновское рассеяние, образование пар, длина свободного пробега гамма-кванта, изотропное распределение излучения гамма-квантов, в заданных угловых интервалах, из определённого сектора поля зрения гамма-интроскопа. Она позволяет моделировать изображение, регистрируемое КЧД и восстановленное изображение, а также численные оценки основных характеристик гамма-интроскопа с кодированной апертурой.

Существенным фактором, определяющим искажения в теновом изображении, являются параметры поля зрения интроскопа. Это весьма важно при оценке возможности разработки высокочувствительного гамма-интроскопа, предназначенного для динамического панорамного контроля радиационной обстановки на местности и в атмосфере путём получения изображения окружающей среды в гамма-излучении. Чувствительность интроскопа определяется как отношение скорости счёта КЧД к плотности потока падающего излучения, которое попадает на КЧД через коллиматор интроскопа.

Для решения задачи панорамного контроля радиационной обстановки на местности и в атмосфере путём получения изображения окружающей среды интроскоп должен обладать максимально возможным широким полем зрения. Считается, что в системах с кодированной апертурой иметь поле зрения более $\sim 40\text{--}50$ градусов нецелесообразно, так как при больших углах уменьшается количество зарегистрированных квантов за счёт увеличения угла падения ($\cos \varphi$) и увеличиваются искажения тенового изображения КЧД, что и приводит к искажениям в восстанавливаемом изображении. Однако поле зрения — это очень важный параметр, и поэтому целесообразно

исследовать его увеличение до $\sim 90^\circ$ и уточнить, какие при этом возникают проблемы, и исследовать методы решения этих проблем.

Такое моделирование теневого и восстановленного изображения проводилось при увеличении поля зрения интроскопа до $\sim 90^\circ$. При этом энергетический диапазон регистрации гамма-квантов выбирался предельно большим ~ 30 КэВ – 7 МэВ, т.е. энергетический диапазон спектра деления. При таком энергетическом диапазоне можно оценить материал и толщину коллиматора гамма-интроскопа с кодированной апертурой, за первоначальную оценку можно принять материал вольфрам, а толщину в пределах ~ 2 – 5 см, положим толщину равной 3 см. Размеры входных отверстий в коллиматоре, а они являются квадратными, для того чтобы вносить меньшие искажения в теневую картину, регистрируемую КЧД при прохождении гамма-излучения через коллиматор с кодированной апертурой, должны превышать толщину коллиматора. За первоначальную оценку типа и размеров отверстия в коллиматоре принимался квадрат со стороной $\sim 5 \times 5$ см.

Предполагалось, что КЧД будет состоять из матрицы отдельных сцинтилляционных детекторов CsI (Tl) с размерами $5 \times 5 \times 10$ см. Кристаллы CsI (Tl) обладают довольно высоким Z , что обеспечивает большую величину сечения взаимодействия с гамма-квантами и высокую плотность, что даёт при такой толщине ~ 10 см — эффективность регистрации гамма-квантов, близкую к единице, во всём диапазоне ~ 30 КэВ – 7 МэВ. Размеры входного окна такого сцинтилляционного модуля в виде квадрата 5×5 см определяются размером входного отверстия в коллиматоре, которые также равны 5×5 см. По размерам входного окна сцинтилляционного модуля можно оценить размеры матрицы детекторов, т.е. их количество в КЧД. Полагаем также, что КЧД имеет площадь $\sim 10^4$ см², т.е. ~ 1 м², и, соответственно, с размерами $\sim 1 \times 1$ м. Следовательно, количество строк и столбцов не должно превышать двадцати. Тогда, используя методы построения псевдослучайных периодических равномерно избыточных массивов URAs и соответственно кодированной базовой маски, получим $r = 19$, $s = 17$. Количество сцинтилляционных модулей составит 323 штуки. Размер кодированной маски коллиматора $2r - 1$; $2s - 1$ (37, 33).

На рис. 6 представлено смоделированное, восстановленное изображение источника, расположенного в граничном угловом секторе поля зрения, при угле падения излучения $\sim 40^\circ$ – 45° . На этом рисунке имеются значительные искажения восстановленного изображения источника. Основной причиной появления таких искажений является то, что при увеличении угла падения, гамма-кванты проходят тот элементарный детектор КЧД, на входное окно которого они упали, и попадают в соседний детектор, и в нем регистрируются. Также искажения вызываются взаимодействием гамма-квантов со стенками коллиматора при больших углах. В результате гамма-кванты могут

регистрироваться, кроме одного, основного, детектора, по крайней мере, ещё в трёх, что вызывает искажение теневого изображения, и соответственно искажается и восстановленное изображение. Если при моделировании увеличить плотности коллиматора и КЧД в $\sim 10^3$ относительно реальных плотностей, то в этом случае процессы взаимодействия гамма-излучения с веществом будут происходить, как при взаимодействии света с поверхностью без отражения, попал–поглотился. Это подтверждается изображением, приведённым на рис. 7, источника, расположенного в том же граничном угле сектора поля зрения, но в этом случае моделирование выполнено при увеличенной плотности коллиматора и КЧД в 10^3 . На этом рисунке искажений не наблюдается, отсутствуют они и в теновом изображении.

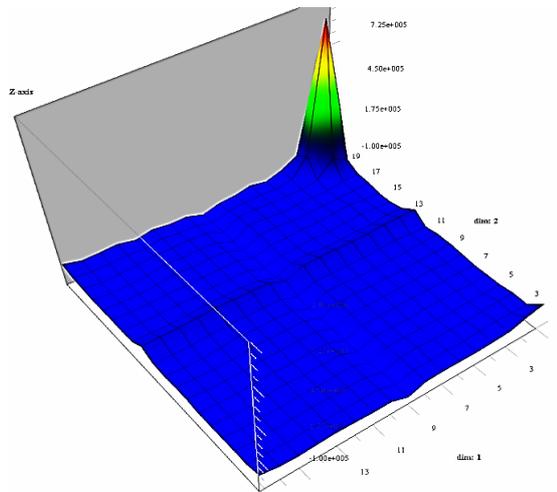


Рис. 6. Восстановленное изображение источника

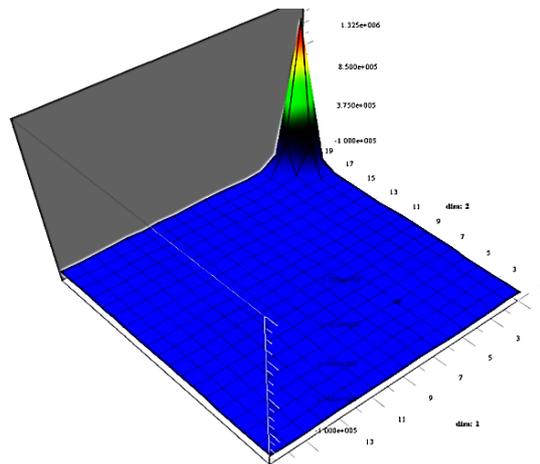


Рис. 7. Восстановленное изображение источника при повышенной плотности КЧД и коллиматора

Для устранения таких искажений в восстановленном изображении, вызванных большими углами падения, можно воспользоваться методом маска–антимаска (в антимаске по сравнению с маской отверстия заменены сплошным массивом, а сплошной массив — отверстиями). В маске количество открытых элементов, т.е. число отверстий на одно превышает число закрытых непрозрачных элементов, а в антимаске, наоборот, число отверстий на одно меньше, чем закрытых непрозрачных элементов. А это приводит к тому, что при восстановлении изображения в корреляционной сумме число положительных слагаемых на одно больше, чем отрицательных в маске, а в антимаске число отрицательных слагаемых на одно больше, чем положительных. Это и позволяет уменьшать число искажений в восстанавливаемом изображении при суммировании изображений, полученных КЧД при регистрации гамма-излучения, в случае использования коллиматора с маской и антимаской. Иллюстрацией этого метода служат рисунки 8 и 9, на рис. 9 изображено восстановленное изображение с использованием метода маска–антимаска, на рис. 8 — исходное изображение источника, при этом поле зрения $\sim 90^\circ$.

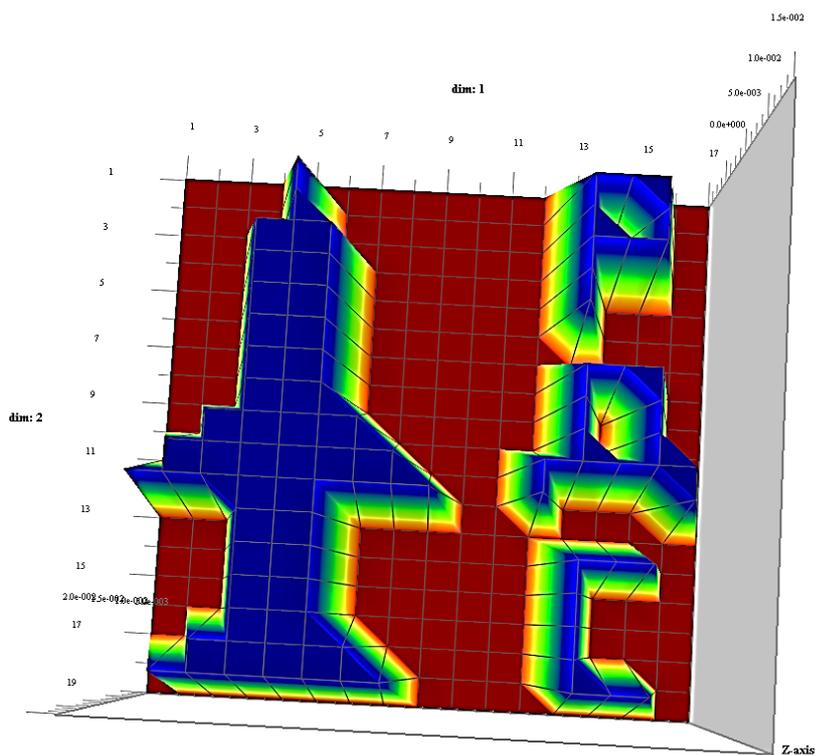


Рис. 8. Исходное изображение источника

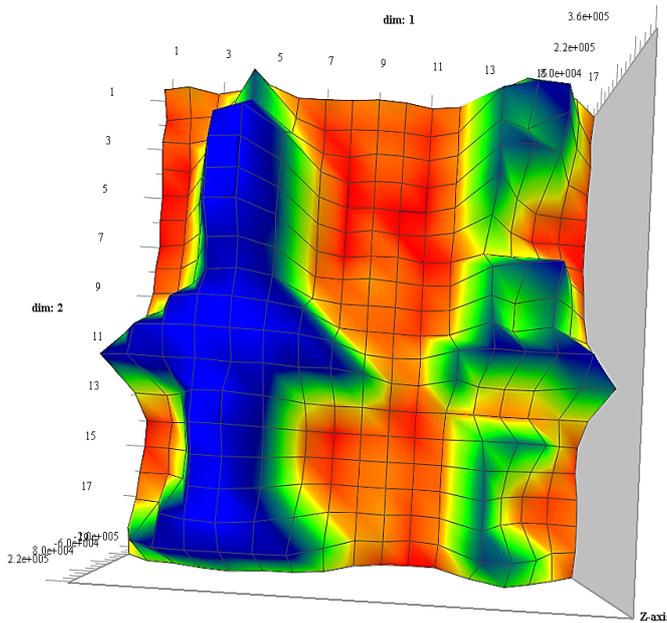


Рис. 9. Восстановленное изображение источника с использованием метода маска-антимаска

1.3. Оценка возможности построения интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников смешанного гамма-нейтронного излучения

Достаточно актуальной проблемой при исследованиях в современной ядерной физике является измерение спектральных и временных характеристик смешанных гамма-нейтронных полей. Такие задачи возникают при исследованиях физических процессов при изучении термоядерных и ядерных реакций, при исследованиях на адронных и лептонных ускорителях, нейтронных генераторах, при проведении лучевой терапии онкологических заболеваний при помощи протонных или ионных пучков. На адронных ускорителях проводятся исследования взаимодействия интенсивных протонных или ионных пучков с материалами различных мишеней. При этом исследуются состояние плазмы и вообще материи в уникальных экстремальных условиях. При таких экспериментах мишень может излучать смешанное излучение в основном гамма-нейтронное. Поэтому наибольшую информацию в таких экспериментах можно получить, используя детекторы, которые позволяют проводить избирательную регистрацию электронов и протонов. К ним относятся сцинтилляционные детекторы с цифровой идентификацией частиц по форме импульса и черенковские детекторы, которые

регистрируют только электроны, а протоны отдачи начинают регистрировать с пороговой энергии 326 МэВ, также черенковские детекторы могут работать в импульсном режиме [5, 6].

Помимо регистрации спектральных и временных характеристик смешанных гамма-нейтронных полей, можно рассмотреть возможность регистрации изображения источников смешанного гамма-нейтронного излучения. Причём для такой регистрации целесообразно рассмотреть возможность использования интроскопов с кодированной апертурой на основе указанных детекторов, которые позволяют проводить избирательную регистрацию электронов и протонов. Такие интроскопы с кодированной апертурой при выборе соответствующего детектора будут обладать высоким временным разрешением до 1 нс и позволят регистрировать импульсные процессы.

Регистрация изображения источников смешанного гамма-нейтронного излучения может осуществляться путём регистрации смешанного гамма-нейтронного излучения, только гамма-излучения и только нейтронного. Это зависит от цели эксперимента.

В случае регистрации гамма-излучения, регистрация гамма-изображения будет осуществляться гамма-интроскопом с кодированной апертурой при наличии фонового излучения. Причём фон может быть вызван как гамма-излучением, так и нейтронами и тяжёлыми заряженными частицами. Для таких экспериментов нужна оптимизация коллиматора и защиты интроскопа с целью уменьшения искажений теневого изображения путём уменьшения фонового излучения гамма-квантов, которые будут возникать при взаимодействии нейтронов с коллиматором и защитой. Но главным в таком интроскопе является возможность блокировки регистрации нейтронов за счёт использования сцинтилляционного детектора с цифровой идентификацией нейтронов и гамма-квантов по форме импульса или черенковского детектора. Использование черенковского КЧД позволяет регистрировать изображение импульсных источников смешанного гамма-нейтронного излучения.

Для регистрации изображения источников тепловых нейтронов применяются интроскоп с кодированной апертурой. В нем в качестве коллиматора используются тонкие маски кадмия, а в качестве КЧД тепловых нейтронов — пропорциональная позиционно-чувствительная камера ^3He .

При использовании интроскопа с кодированной апертурой для регистрации быстрых нейтронов, т.е. для получения изображения источников быстрых нейтронов, следует оптимизировать параметры коллиматора и защиты интроскопа с целью уменьшения искажений теневого изображения, регистрируемого КЧД, которые будут вызываться рассеянием нейтронов и их регистрацией в соседних детекторах. Толщина коллиматора при использовании лёгких материалов (полиэтилен) должна составлять не менее 5 см, также, в зависимости от энергии и состава излучения, возможна и комбина-

рованная защита из лёгких и тяжёлых материалов. Но принципиальной возможностью создания интроскопа с кодированной апертурой для регистрации быстрых нейтронов и получения изображения источника быстрых нейтронов является использование в интроскопе сцинтилляционного детектора с цифровой идентификацией нейтронов и гамма-квантов по форме импульса. Такой КЧД позволяет в процессе регистрации смешанного излучения одновременно получать изображения в гамма-квантах и нейтронах.

Таким образом, возможность создания интроскопов с кодированной апертурой для регистрации изображения источников смешанного гамма-нейтронного излучения определяется возможностью разработки и оптимизации коллиматора, защиты интроскопа и КЧД с целью минимизации искажений теневого изображения, чтобы они не превышали допустимых при массе и габаритах интроскопа, также не превышающих допустимых.

2. Основные характеристики и типы КЧД для интроскопов с кодированной апертурой

2.1. КЧД для регистрации гамма-излучения

КЧД, предназначенный для регистрации гамма-излучения, определения координат зарегистрированного гамма-кванта, его энергии, момента времени регистрации, в принципе может быть использован в интроскопе с кодированной апертурой. Поэтому в телескопах и интроскопах с кодированной апертурой, в зависимости от технических требований, могут применяться газовые, сцинтилляционные, полупроводниковые КЧД. Но в основном в энергетическом диапазоне $\sim 0.05\text{--}3$ МэВ используются сцинтилляционные КЧД. Это определяется тем, что в указанном энергетическом диапазоне сцинтилляционные детекторы могут обладать высокой эффективностью регистрации и иметь большую площадь входного окна КЧД и, соответственно, высокую чувствительность. Исходя из этих критериев, наиболее оптимальным сцинтилляционным КЧД будет являться матрица сцинтилляционных модулей (пикселей) на основе фотодиодов. Также большую площадь входного окна может иметь сцинтилляционная гамма-камера. Для регистрации света из сцинтилляторов меньших размеров могут использоваться электронно-оптические преобразователи (ЭОП) с ПЗС-матрицами.

Основными метрологическими характеристиками сцинтилляционных КЧД являются чувствительность, пространственное и энергетическое разрешение, однородность и линейность изображения.

Рассмотрим определение этих характеристик и методы их измерения на основе экспериментальных результатов определения этих характеристик гамма-камеры SGK338160. Эта гамма-камера разработана сотрудниками ВНИИМП под руководством С.Д. Калашникова [7]. Гамма-камера SGK338160

выполнена на основе сцинтиляционного детектора NaI (Тl) в форме плоского диска $\varnothing 312 \cdot 12$ мм. С торца через световод $\varnothing 312 \cdot 12$ мм детектор просматривается тридцатью семью ФЭУ–184. Этот набор ФЭУ образует на поверхности световода гексагональную плотно упакованную структуру. Световод служит для формирования пространственной зависимости сигналов ФЭУ и уменьшения потерь света. Гамма-кванты, взаимодействуя в кристалле, образуют световые вспышки, которые регистрируются через световод ФЭУ. Благодаря световоду, отделяющему фотокатоды ФЭУ от сцинтиллятора, зоны чувствительности различных ФЭУ перекрываются. Поэтому каждую сцинтилляцию регистрируют сразу несколько ФЭУ. Амплитуды импульсов зависят как от расположения ФЭУ относительно сцинтилляции, так и от её интенсивности. Сигналы ФЭУ усиливаются предусилителями, а затем из них в виде линейных комбинаций формируются координатные X, Y и энергетический E сигналы гамма-камеры. В цифровом виде сигналы X, Y, E передаются в вычислительный комплекс, где происходит их обработка. Гамма-камера функционирует как позиционно-чувствительный детектор, так и как спектрометр энергии гамма-квантов.

За чувствительность гамма-камеры принимается отношение скорости счёта к плотности потока падающего гамма-излучения. Измерение чувствительности гамма-камеры SGK338160 проводилось для моноэнергетического гамма-излучения трёх радиоактивных источников: ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs из набора ОСГИ с энергиями 60 КэВ, 122 КэВ, 662 КэВ. Источник гамма-излучения располагался по центру входного окна гамма-камеры на расстоянии 1240 мм от него. Значения чувствительности S и фона $N_{\text{ф}}$ составили:

$$S = 193 \text{ имп} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{кв}^{-1}, N_{\text{ф}} = 38.9 \text{ имп} \cdot \text{с}^{-1} \quad - \quad ^{241}\text{Am}, E_{\gamma} = 60 \text{ КэВ},$$

$$S = 155 \text{ имп} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{кв}^{-1}, N_{\text{ф}} = 120.6 \text{ имп} \cdot \text{с}^{-1} \quad - \quad ^{57}\text{Co}, E_{\gamma} = 122 \text{ КэВ},$$

$$S = 98 \text{ имп} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{кв}^{-1}, N_{\text{ф}} = 21.5 \text{ имп} \cdot \text{с}^{-1} \quad - \quad ^{137}\text{Cs}, E_{\gamma} = 662 \text{ КэВ}.$$

Пространственное разрешение определяется как ширина на половине максимальной высоты пика амплитудного распределения координатного сигнала, полученного при регистрации гамма-излучения точечного коллимированного источника, помещённого непосредственно на входное окно гамма-камеры. Пространственное разрешение гамма-камеры SGK338160 измерялось для двух радиоактивных источников: ^{241}Am и ^{57}Co . Измерение пространственного разрешения проводилось в центральной области входного окна гамма-камеры. Значения измеренных величин пространственного разрешения — Δl , полученного при регистрации гамма-излучения точечного коллимированного источника, составили:

$$\Delta l = 4.9 \pm 0.8 \text{ мм для радиоактивного источника } ^{241}\text{Am}, E_{\gamma} = 60 \text{ КэВ},$$

$$\Delta l = 4.2 \pm 0.8 \text{ мм для радиоактивного источника } ^{57}\text{Co}, E_{\gamma} = 122 \text{ КэВ}.$$

Результаты измерения пространственного разрешения показаны на рис. 10.

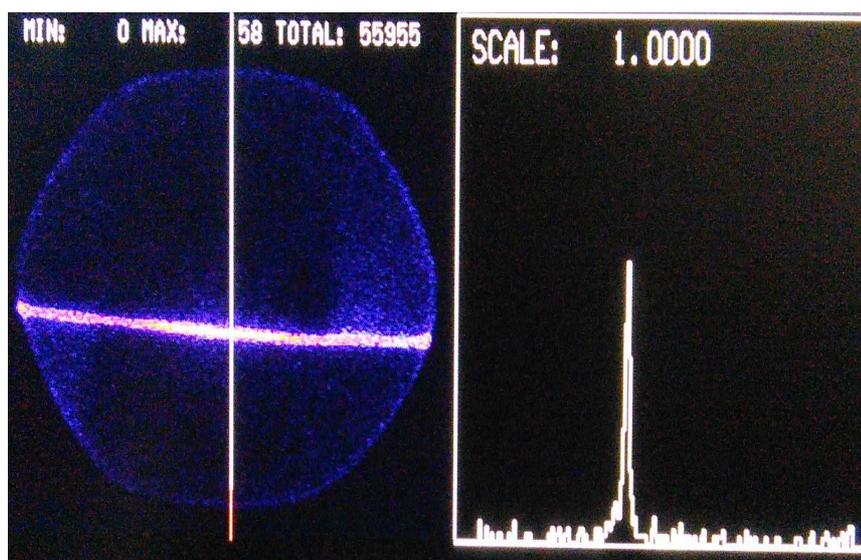


Рис. 10. Пространственное разрешение сцинтилляционной гамма-камеры при регистрации гамма-излучения радиоактивного источника ^{57}Co , $E_\gamma = 122$ КэВ

За энергетическое разрешение сцинтилляционной гамма-камеры, как и детектора, принимается отношение ширины на полувысоте пика амплитудного распределения к положению максимума фотопика. Энергетическое разрешение измерялось при расположении радиоактивного источника по центру гамма-камеры на расстоянии 500 мм от входного окна. Регистрировалось гамма-излучение р.а. источников: ^{241}Am , ^{57}Co , ^{137}Cs . Значения энергетического разрешения ε составили:

$\varepsilon = 23$ % для радиоактивного источника ^{241}Am , $E_\gamma = 60$ КэВ;

$\varepsilon = 19$ % радиоактивного источника ^{57}Co , $E_\gamma = 122$ КэВ;

$\varepsilon = 14$ % радиоактивного источника ^{137}Cs , $E_\gamma = 662$ КэВ.

Изображение сцинтилляционной гамма-камеры характеризуется неоднородностью и нелинейностью. Геометрические искажения изображения количественно оцениваются показателем пространственной нелинейности. Этот параметр определяется как абсолютное максимальное отклонение изображения щели шириной 1 мм в свинцовой маске, полностью закрывающее входное окно гамма-камеры, от прямой линии, выраженное в миллиметрах. Показатель пространственной нелинейности составил не более 5 мм.

Неоднородность изображения гамма-камеры характеризует различие в скорости счёта, наблюдаемой на отдельных участках входного окна гамма-камеры, при регистрации излучения открытого точечного радиоактивного источника. Показатель U неоднородности определяется как: $U = (n_{\max} - n_{\min}) / (n_{\max} + n_{\min})$, где n_{\max} , n_{\min} — соответственно максимальное и мини-

мальное значение скорости счёта в элементе матрицы изображения. Показатель неоднородности измерялся при регистрации гамма-излучения радиоактивного источника ^{57}Co из набора ОСГИ, расположенного на расстоянии 100 см от входного окна гамма-камеры, и его величина составила 27.5 %.

Приведённые методы измерения и экспериментальные результаты могут использоваться при разработке метрологического обеспечения измерений характеристик сцинтилляционных КЧД модульного типа, причём при регистрации и гамма-излучения, и нейтронного излучения.

2.2. КЧД для регистрации смешанного гамма-нейтронного излучения

КЧД для интроскопов с кодированной апертурой, которые предназначены для регистрации смешанного нейтронного и гамма-излучения и получения изображения этих источников, должны обладать максимальным соотношением сигнал/фон и возможностью регистрации изображения при максимально высоких плотностях потока падающего излучения. При регистрации в КЧД гамма-кванта или нейтрона должны определяться пространственные координаты и момент времени регистрации, энергия выделенная частицей при взаимодействии с детектором, а также в сцинтилляционном КЧД тип частицы. Модульный принцип построения КЧД, когда КЧД является матрицей отдельных детекторов (модулей) и регистрация импульсов детекторов производится одновременно, параллельно и независимо друг от друга, является оптимальным для повышения быстродействия, увеличения загрузки КЧД, т.е. увеличения максимальных значений плотностей потока регистрируемого излучения. В этом случае основные характеристики КЧД будут определяться характеристиками отдельных модулей детекторов и их количеством. Следовательно, эти детекторные модули должны обладать высоким временным разрешением и высокой эффективностью регистрации нейтронов и гамма-квантов. Помимо этого, они должны обладать высокой избирательной чувствительностью регистрации нейтронного и гамма-излучения. Так, при регистрации нейтронного излучения и получения изображения этого источника детектор должен обладать высокой чувствительностью к нейтронному излучению и высоким коэффициентом блокировки гамма-квантов.

Сцинтилляционные детекторы с цифровой идентификацией нейтронов и гамма-квантов по форме импульса строятся на основе органических монокристаллов стибена, паратерфина и некоторых жидких сцинтилляторов. В них форма сцинтилляционного импульса существенно зависит от удельных ионизационных потерь и различна для протонов отдачи и комптоновских электронов. Наличие такой разницы в форме импульса и положено в основу цифрового метода оптимального фильтра идентификации нейтронов и гамма-квантов. В детекторах также используются ФЭУ с высоким

временным и энергетическим разрешением, типа Hamamatsu R6095, временное разрешение которого составляет $\tau_{0.5} \approx 4.5$ нс ($\tau_{\phi} = 4$ нс), а энергетическое $< 9\%$ (^{57}Co , NaI (Tl)), это позволяет получить высокое временное и энергетическое разрешение детектора и обеспечить предельно высокие параметры идентификации нейтронов и гамма-квантов. Для преобразования аналоговых сигналов детектора в цифровую форму используются АЦП с частотой дискретизации 1 ГГц, полосой пропускания 300 МГц.

Такой вариант построения КЧД на основе сцинтилляционных модулей с цифровой идентификацией нейтронов и гамма-квантов по форме импульса позволяет обеспечить следующие характеристики.

Энергетические диапазоны регистрации и измерения спектрального состава нейтронного и γ -излучения в смешанных полях составляют: для нейтронов — ~ 0.2 –15 МэВ, для гамма-квантов — ~ 0.015 –7 МэВ. Коэффициент блокировки фона гамма-квантов радиоактивного источника ^{60}Co с порога — 0,015 МэВ (по энергии комптоновских электронов (0,2 МэВ — нейтронов)) при загрузке детектора до $\sim 10^5$ имп/с составляет не менее 10^3 . Энергетическое разрешение по энергии гамма-излучения 0,662 МэВ (^{137}Cs) составляет не хуже 9%. Эффективность регистрации нейтронов детектором на основе стиблена толщиной четыре сантиметра составляет ~ 0.6 –0.15 в диапазоне энергий 0.5–10 МэВ.

Однако следует учитывать, что при малых энергиях (~ 0.2 –0.5 МэВ) и высокой загрузке модульного детектора ($\sim 10^5$ имп/с) из-за режекции наложений и плохой статистики возможно отбрасывание части зарегистрированных импульсов, что может привести к искажению зарегистрированного (теневое) изображения в КЧД и соответственно восстановленного изображения.

Значительно увеличить загрузку модульного детектора при регистрации изображения источников в гамма-квантах можно, используя черенковские КЧД. Такой КЧД также является матрицей отдельных модульных черенковских детекторов. В черенковских детекторах используют излучение Черенкова — Вавилова, испускаемое релятивистскими частицами, когда их скорость превышает световую. Важнейшими особенностями таких детекторов является высокое временное разрешение и то, что излучение начинается с определённой пороговой энергии. Благодаря этому они и обладают высокой избирательной чувствительностью регистрации нейтронного и гамма-излучения. Пороговая энергия для комптоновских электронов составляет 178 кэВ [7], а это обеспечивает возможность эффективной регистрации γ -квантов с энергией большей нескольких сотен кэВ. Относительно регистрации нейтронного излучения, то для типичных гамма-нейтронных полей спектр протонов отдачи от нейтронов расположен ниже пороговой энергии черенковского детектора для протонов — 326 МэВ.

Временное разрешение черенковского детектора, выполненного на основе окрашенного краской ВЛ-548 цилиндрического радиатора из оргстекла диаметром $\varnothing 50$ мм и высотой 100 мм и ФЭУ НАМАМАТСУ R1828-01, составляет $\tau_{0.5} \approx 2.5$ нс, и оно определяется импульсными характеристиками радиатора и ФЭУ. Для радиатора $\tau_{0.5} \leq 1$ нс, поэтому временное разрешение детектора определяется временным разрешением ФЭУ. Особенностью черенковского радиатора является малый световыход в ~ 10 – 100 раз меньше, чем в пластмассовом сцинтилляторе (в зависимости от типа и окраски сцинтиллятора) [7]. Поэтому в ЧД был выбран ФЭУ НАМАМАТСУ R1828-01 с двенадцатью диодами и большим коэффициентом усиления. Временное разрешение этого ФЭУ составляет $\tau_{0.5} \approx 2.5$ нс.

Такой черенковский детектор, который может являться модульным элементом черенковского КЧД, позволяет осуществлять регистрацию гамма-квантов при загрузках детектора $\sim 2 \cdot 10^8$ имп/с. Черенковский КЧД может использоваться для регистрации импульсного излучения. При этом следует учитывать, чтобы максимальный линейный ток модульного черенковского детектора соответствовал плотностям потока регистрируемого излучения, т.е. генерируемые токи были не больше максимального линейного тока.

Регистрация импульсов модульных детекторов черенковского КЧД производится параллельно и независимо друг от друга АЦП с высокой частотой дискретизации ≥ 1 ГГц [7].

Заключение

Полученные результаты исследования принципов построения и математического моделирования характеристик макета интроскопа с кодированной апертурой на основе сцинтилляционного КЧД с высокой чувствительностью и интроскопа с кодированной апертурой и использованием сцинтилляционного детектора с цифровой идентификацией нейтронов и гамма-квантов по форме импульса и черенковского детектора являются основанием для дальнейших исследований в этом перспективном направлении разработки приборов для получения изображения источников ионизирующего излучения.

Литература

1. Гусев Н.Г., Машкович В.П., Суворов А.П. Физические основы защиты от излучений. М.: Атомиздат, 1980.
2. Федоров Г.А. Радиационная интроскопия. Кодирование информации и оптимизация эксперимента. М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Fenimore E.E., Cannon T.M. Coded aperture imaging with redundant arrays // J. Appl. Opt. 1978. V. 17. № 22. P. 3562.

4. Busboom A., Elders-boll H., Schotten H. Uniformly redundant arrays // *Experimental Astronomy* 8: 97–123. 1998.
5. Прокуронов М.В., Шаболин А.Н. Цифровая идентификация нейтронов и гамма-квантов по форме импульса при высокой загрузке детектора и низкой энергии регистрируемого излучения // *ПТЭ*. 2007. № 3. С. 1–15
6. Прокуронов М.В., Голубев А.А., Демидов В.С., Канцырев А.В., Костин А.Б., Рудской И.В., Смирнов Г.Н., Фертман А.Д. Метод измерения спектральных и временных характеристик смешанных полей сцинтилляционным и черенковским детекторами с наносекундным временным разрешением // *ПТЭ*. 2008. № 4. С. 1–15.
7. Калашников С.Д. Физические основы проектирования сцинтилляционных гамма-камер. М.: Энергоатомиздат, 1985.