

**ЦВЕТОВАЯ ВИЗУАЛИЗАЦИЯ В РЕНТГЕНОВСКОМ ДИАПАЗОНЕ СПЕКТРА****Балухо И. Н., Дудчик Ю. И., Кольчевский Н. Н.***НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко» БГУ  
Минск, Республика Беларусь»*

**Аннотация.** Предложена создание цветных рентгеновских изображений на основе применения широкополосных рентгеновских источников. Разработано программное обеспечение «X-ray-RGB-tube» по формированию цветных рентгеновских спектров. Выполнены численные моделирование по формированию белого источника и получения цветных спектров в рентгеновском диапазоне длин волн.

**Ключевые слова:** рентгеновское излучение, цветовая визуализация, рентгеновские спектры.

**COLOR IMAGING IN THE X-RAY SPECTRUM RANGE****Balukho I., Dudchik Y., Kolchevsky N.***<sup>1</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems BSU  
Minsk, Republic of Belarus*

**Abstract.** Proposed the creation of color X-ray images based on the use of broadband X-ray sources. Developed software “X-ray-RGB-tube” for the formation of color X-ray spectra. Performed numerical simulations on the formation of a white source and obtaining color spectra in the X-ray wavelength range.

**Key words:** X-ray, color imaging, X-ray spectra.

*Адрес для переписки: Кольчевский Н. Н., ул. Курчатова 7–403, г. Минск 220045, Республика Беларусь  
e-mail: kolchevsky@bsu.by*

Создание и разработка функционально новых, усовершенствованных и уникальных объектов рентгенооптических систем связано с широким развитием направлений исследований в области рентгеновской физики. Экспериментальные изображения в рентгеновских исследованиях представляются в виде монохромных изображений, из чего также возникает задача по «раскраске» рентгеновских изображений, для визуализации и получения информации об изображении и объекте. Известны патенты предлагающие различные модификации рентгеновских трубок, рентгенооптических компонентов, детекторов и многие другие способы формирования рентгеновского цветных изображений на основе рентгеновских экспериментальных данных. Метод генерирования рентгеновского цветного изображения включает выбор трех наборов рентгеновских изображений в градации серого, полученных с помощью рентгеновских лучей, имеющих различные энергетические спектры, присвоение базовых цветов RGB этим трем наборам и отображение рентгеновского цветного изображения с помощью генерируемых сигналов RGB [1].

В работе рассматривается идея создания цветных рентгеновских изображений на основе применения широкополосных рентгеновских источников [2].

Широкополосный источник рентгеновского излучения может представлять собой источник со сложным анодом или источник, который состоит

из нескольких источников: параллельных, которые одновременно облучают объект в эксперименте; последовательных, которые будут представлять собой послойное облучение, в результате которого и будет формироваться широкополосный источник. Как для источника со сложным анодом, так и нескольких источников, формирование спектра широкополосного источника представляет собой суммирование спектров (1).

$$\Delta I(\lambda) = \sum_i k_i \cdot \frac{(\lambda - \lambda_i)}{\lambda 3_i}, \quad (1)$$

Таким образом, суммируя спектральные интенсивности, происходит смешения интенсивностей. Широкополосный источник рентгеновского излучения, с точки зрения цветовой рентгенографии, представляет собой «белый» источник. Следовательно, формирование широкополосного источника заключается в смешении интенсивностей таким образом, чтобы в результате получения интегрального цвета он был «белым» и интенсивность спектра была равномерной.

Ширина спектра  $i$ -того источника представляет собой следующую зависимость:

$$\Delta E_{12} = \Delta y_{12} E_0, \quad \frac{E_1}{E_{01}} = y_1 \frac{E_2}{E_{01}} = y_2, \quad (2)$$

где  $E_{01}$  – задаваемое начальное значение энергии для построения спектра, равное 100 кэВ.

В результате преобразований формул (1) и (2) получаем следующее уравнение:

$$\left(\frac{E}{E_0}\right)^3 - \left(\frac{E}{E_0}\right)^2 + \frac{4X}{27} = 0, \quad (3)$$

где  $X$  – параметр, определяющий допуск на однородность спектра.

Для заданного источника параметр  $X$  определяет полосу энергий  $[E_1; E_2]$ , которая формирует результирующий спектр. Решение данного уравнения, заданное формулой (3), позволяет рассчитать многофокусный рентгеновский источник с широкополосным спектром (рисунок 1).

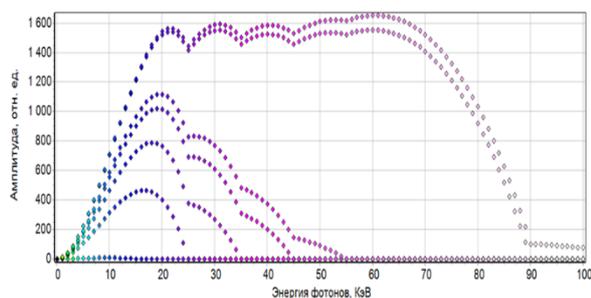


Рисунок 1 – Широкополосный источник рентгеновского излучения

Цветные изображения объектов формируются в зависимости от спектра рентгеновского излучения. На основе метода разработана и создана программа «X-ray-RGB-tube» [2]. Для цветовой визуализации рентгеновского спектра и анализа спектра рентгеновского источника, каждой энергии спектра сопоставляется RGB вектор, который представляет собой значение интенсивности красного, зеленого и голубого цвета:

$$(RX_1, GX_2, BX_3), \quad (4)$$

где  $RX_1, GX_2, BX_3$  – числа из диапазона от 0 до 255.

Диапазон энергий для рентгеновского излучения составляет от 0,1 КэВ до 100 КэВ. Преобразуем диапазон по формуле:

$$\begin{aligned} \min: \log_{10}(\text{КэВ}), \\ \max: 3 + \log_{10}(\text{КэВ}) \end{aligned} \quad (5)$$

Далее задаем цветовую гамму для спектра. Зная диапазон энергий, необходимо разбить его на интервалы, которые будут описывать номер цвета в соответствии с интервалом. Всего интервалов будет 7, в соответствии с цветами радуги (оптическим спектром): Красный, Оранжевый, Желтый, Зеленый, Голубой, Синий, Фиолетовый. Минимальные значения RGB вектора, выходящие за диапазон, будут приниматься за черный цвет, а максимальные – за белый.

Так как в раскладке RGB оранжевый цвет является смешением красного и желтого (оттенком), то основные интервалы будут выглядеть следующим образом (таблица 1).

Таблица 1 – RGB вектора цветов

Цвет	$RX_1$	$GX_2$	$BX_3$
Черный	0	0	0
Красный	255	0	0
Желтый	255	255	0
Зеленый	0	255	0
Голубой	0	255	255
Синий	0	0	255
Фиолетовый	255	0	255
Белый	255	255	255

Как видно из таблицы, при переходе от одного цвета к другому изменяется определенная координата RGB. Таким образом число шагов по оттенку составляет 255. Разбив энергетический диапазон рентгеновского излучения на интервалы в соответствии с переходами от цвета к цвету, получим граничные значения энергии, которые и будут сортировать спектральные линии по цветам (таблица 2):

Таблица 2 – Цветовые интервалы и их граничные энергии

Интервал	Переход	Энергия, КэВ
1	Ч-К	0,269
2	К-Ж	0,708
3	Ж-З	1,905
4	З-Г	5,129
5	Г-С	13,804
6	С-Ф	37,153
7	Ф-Б	100

Таким образом будет реализовываться алгоритм, при котором будет передаваться номер интервала и в зависимости от него идти расчет цвета. Как итог на выходе программы получаем цветное отображение графика спектральной интенсивности тормозного спектра. При различных значениях энергии тормозной спектр будет иметь радужную окраску.

При использовании такого принципа раскраски спектра, возможна реализации по получению цветных изображений на детекторе. Детектор воспринимает излучение от объекта в широком спектре, в результате видит цветную картинку, которая соответствует смещению всех цветов спектра в каждом пикселе, соответственно мы получаем цветное изображение объекта.

**Благодарности.** Работа частично поддержана Министерством образования Республики Беларусь в рамках задания 3.12 ГПНИ «Механика, металлургия, диагностика в машиностроении», подпрограмма «Техническая диагностика».

#### Литература

- X-ray System And Method For Generating X-ray Image In Color // 11,116,462US Patent. – 2021 г.
- Balukho, I. N. Colour visualization method of X-Ray spectra / I. N. Balukho, Y. I. Dudchik, N. N. Kolchevsky // Приборостроение–2023: материалы 16 Международной научно-технической конференции, 15–17 ноября 2023 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2023. – С. 187–189.