

## АНАЛИТИЧЕСКАЯ АППРОКСИМАЦИЯ СПЕКТРА ИМПУЛЬСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ ТРУБОК

*Вавилов С.П., Кошкин Г.М., Удод В.А., Фофанов О.Б.*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Национальный исследовательский Томский государственный университет

Сто двадцать лет назад Вильгельм Рентген совершил одно из величайших открытий современности, которое дало ему титул первого Нобелевского лауреата по физике. Были открыты рентгеновские лучи – излучение квантов с длиной волн, располагающихся между оптическим диапазоном и гамма-излучением. Рентген на феноменологическом уровне изучил все основные свойства рентгеновского излучения, и, в том числе, сделал попытку оценить энергетический спектр открытого излучения на основе проникающей способности излучения. Говоря современным языком, Рентген использовал метод фильтров, который и ныне остается наиболее точным вкпе с использованием современных детекторов импульсного рентгеновского излучения.

Интересно заметить, что в своих первых опытах именно Рентген определил два основных направления применения рентгеновских лучей: медицину и дефектоскопию В литературе и сейчас можно найти ссылки на снимки рук ассистента Рентгена и супруги Рентгена, на которых видно строение кистей рук. Менее известен факт, что одним из первых снимков, полученных Рентгеном, было теневое изображение ствола ружья. Вот как пишет сам исследователь: «Посредством одной трубки...я получил очень хорошую фотографию стволов охотничьего ружья. На ней было ясно и резко видеть все детали патронов и внутренние неправильности дамасских стволов» [1].

В конце 1930-х годов были получены кратковременные импульсы рентгеновского излучения длительностью несколько десятых долей микросекунд, ознаменовав рождение импульсной рентгенотехники. В 1960-е годы началось освоение наносекундного диапазона длительности рентгеновских импульсов. Были созданы первые малогабаритные импульсные рентгеновские аппараты, предложены эмпирические методы расчета основных характеристик импульсных трубок [7, 8, 12].

Среди основных характеристик ИРА наиболее важное значение имеют спектрально-энергетические характеристики: спектральное распределение энергии квантов, эффективная и максимальная энергия квантов, импульсная экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы.

Знать спектральные особенности излучения импульсных источников очень важно при практическом использовании их в неразрушающем контроле. В той или иной мере все дефектоскопические характеристики — толщина контролируемого материала, фокусное расстояние, экспозиция, чувствительность — связаны с энергией излучения и ее распределением. Знание спектрально-энергетических характеристик приобрело важное значение в новых областях использования импульсных рентгеновских источников: для инспекционного и таможенного контроля, в рентгеновской локации и навигации.

Выпуск в конце 1960-х годов первых отечественных аппаратов серий «ИРА» и «МИРА» привел к расширению теоретико-экспериментальных исследований спектра импульсных аппаратов [3–5]. Спектральное распределение в большинстве работ рассчитано из экспериментальных дозовых характеристик. В качестве детекторов использовались кремниевые и термолюминесцентные детекторы [6, 11].

Распределение интенсивности импульсного рентгеновского излучения удовлетворительно описывается зависимостью [2]:

$$F(\lambda) = (\lambda - \lambda_0)^2 / \lambda^4,$$

где  $F(\lambda)$  — плотность интенсивности излучения;  $\lambda$  — длина волны кванта излучения;  $\lambda_0$  — длина волны коротковолновой границы излучения.

Наиболее вероятная длина волны кванта определяется из соотношения:

$$\lambda = 2 \lambda_0. \quad 1$$

Таким образом, спектр импульсных излучателей более длинноволновой, чем спектр рентгеновских аппаратов с синусоидальным и постоянным анодным напряжениями.

Экспериментальные результаты исследования спектра аппаратов с питающими напряжениями в диапазоне 100-500 кВ показывают ряд существенных отклонений от этих зависимостей, что обусловлено рядом причин. Среди них ошибки детекторов, влияние поглощения излучения, вклад рассеянного излучения, особенности питающего напряжения. Значение эффективной энергии может смещаться в сторону более низких энергий, чем это следует из соотношения (1) [2, 9, 10].

Нами была предпринята попытка аналитической аппроксимации спектров ИРТ, полученных в разных работах экспериментально. Были проанализированы данные о спектре ИРТ, начиная с работ, в которых использовались первые серийные модели импульсных рентгеновских аппаратов ИРА, РИНА и подобные им. Уровень питающих напряжений в этих аппаратах не превышал 400–500 кВ.

При проведении дальнейших исследований за основу был взят аппарат МИРА-2. Его энергетическое распределение  $F(x)$  [3], было табулировано значениями, представленными в таблице 1, где  $x$  = шаг табуляции.

Таблица 1.

$x$	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$F(x)$	0	1,6	4,3	7	9,5	11	11,5	12	10,7	9,6	8	6,3	5	3	1,2	0

По приведенному дискретному набору данных, то есть по таблице 1 была поставлена задача - получить оценку аналитического вида функции  $F(x)$ .

Задача решалась для двух вариантов: первый – по приведенной таблице; второй – по той же таблице, но только без первого столбца данных – без пары чисел 0,5 и 0. Такой подход позволяет в некоторой степени «отсечь» коротковолновую границу спектра, для которой наиболее возможна ошибка.

В рамках поставленной задачи аналитический вид функции  $F(x)$  был получен с помощью параметрического и непараметрического подходов. При этом суть параметрического подхода заключалась в аппроксимации функции  $F(x)$  многочленом третьей степени и выборе его параметров методом наименьших квадратов. В результате проведенных вычислений были получены следующие выражения:

$$F_1(x) = 0,01352x^3 - 0,5284x^2 + 5,0642x - 3,0522$$

$$F_2(x) = 0,01546x^3 - 0,581x^2 + 5,4851x - 3,9801$$

– для первого и второго варианта соответственно.

Графики функций  $F_1(x)$  и  $F_2(x)$  приведены на рис. 1.

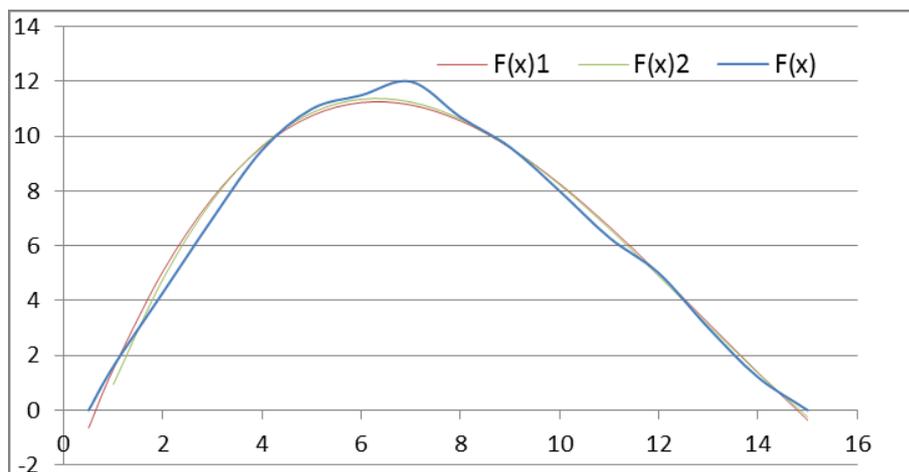


Рис.1. Аппроксимация спектра (параметрический подход)

Для оценки точности полученных параметрических моделей были найдены абсолютные отклонения истинных значений от оценок, вычисленные по формулам:

$$A_1(x) = |F(x) - F_1(x)|;$$

$$A_2(x) = |F(x) - F_2(x)|.$$

Результаты моделирования и величины соответствующих отклонений представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты аппроксимации и величины отклонений.

$x$	$F(x)$	$F_1(x)$	$F_2(x)$	$A_1(x)$	$A_2(x)$
<b>0,5</b>	0	-0,651	-	0,6505	-
<b>1</b>	1,6	1,4971	0,9395	0,1029	0,6605
<b>2</b>	4,3	5,0708	4,7898	0,7708	0,4898
<b>3</b>	7	7,7498	7,6635	0,7498	0,6635
<b>4</b>	9,5	9,6154	9,6536	0,1154	0,1536
<b>5</b>	11	10,749	10,853	0,2514	0,1473
<b>6</b>	11,5	11,23	11,354	0,2695	0,1464
<b>7</b>	12	11,142	11,249	0,8578	0,7509
<b>8</b>	10,7	10,565	10,632	0,1352	0,068
<b>9</b>	9,6	9,5794	9,5951	0,0206	0,0049
<b>10</b>	8	8,267	8,231	0,267	0,231
<b>11</b>	6,3	6,7089	6,6326	0,4089	0,3326
<b>12</b>	5	4,986	4,8927	0,014	0,1073
<b>13</b>	3	3,1795	3,104	0,1795	0,104
<b>14</b>	1,2	1,3705	1,3593	0,1705	0,1593
<b>15</b>	0	-0,36	-0,249	0,36	0,2486

Аппроксимация спектра при использовании непараметрического подхода выполнялась по формулам:

$$F_3(x) = \frac{\sum_{i=1}^n F(x_i) \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{0,084}\right)}{\sum_{i=1}^n \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{0,084}\right)}, n = 16;$$

$$F_4(x) = \frac{\sum_{i=2}^n F(x_i) \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{0,076}\right)}{\sum_{i=2}^n \exp\left(-\frac{(x_i - x)^2}{0,076}\right)}, n = 16$$

- для первого и второго варианта соответственно.

Графики функций  $F_3(x)$  и  $F_4(x)$  приведены на рис. 2.

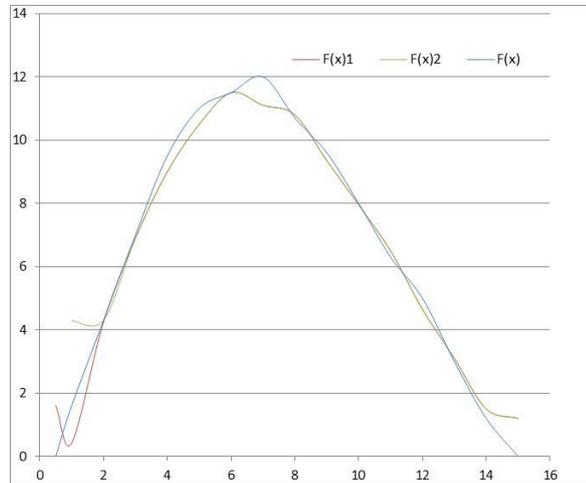


Рис.2. Аппроксимация спектра (непараметрический подход)

Точность полученных непараметрических моделей оценивалась по аналогии с параметрическим подходом по следующим формулам:

$$A_3(x) = |F(x) - F_3(x)|;$$

$$A_4(x) = |F(x) - F_4(x)|.$$

Результаты моделирования и величины соответствующих отклонений представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты моделирования (непараметрический подход).

$x$	$F(x)$	$F_3(x)$	$F_4(x)$	$A_3(x)$	$A_4(x)$
<b>0,5</b>	0	1,607		1,607	-
<b>1</b>	1,6	0,419	4,3	1,181	2,7
<b>2</b>	4,3	4,248	4,3	0,052	0
<b>3</b>	7	6,9	6,9	0,1	0,1
<b>4</b>	9,5	9	9	0,5	0,5
<b>5</b>	11	10,5	10,5	0,5	0,5
<b>6</b>	11,5	11,5	11,5	0	0
<b>7</b>	12	11,1	11,1	0,9	0,9
<b>8</b>	10,7	10,8	10,8	0,1	0,1
<b>9</b>	9,6	9,35	9,35	0,25	0,25
<b>10</b>	8	7,95	7,95	0,05	0,05
<b>11</b>	6,3	6,5	6,5	0,2	0,2
<b>12</b>	5	4,65	4,65	0,35	0,35
<b>13</b>	3	3,1	3,1	0,1	0,1
<b>14</b>	1,2	1,5	1,5	0,3	0,3
<b>15</b>	0	1,2	1,2	1,2	1,2

Как следует из таблиц 2 и 3 полученные аналитические аппроксимации спектральных характеристик имеют вполне приемлемую для практики точность. Вследствие этого они могут быть использованы при проектировании импульсных

рентгеновских аппаратов, а также для оценки эффективного атомного номера исследуемого вещества на основе метода дуальных энергий.

#### **Список использованных источников**

1. Рентген В.К. О новом роде лучей. – М.: Гос.технико-теоретич. изд. – 1933– 116 с.
2. Артемов К.П. и др. Импульсно-периодический источник рентгеновского излучения// Приборы и техника эксперимента– 2004–№ 5– С.166–167
3. Морговский Л.Я., Курбатов В.М. Особенности спектрального состава излучения импульсных рентгеновских генераторов.//Аппаратура и методы рентгеновского анализа– Л.: Машиностроение–1977– вып.18–С.175–179
4. Толченев Ю.М., Чепек А.В. Спектр излучения импульсной рентгеновской трубки с холодным катодом.//Приборы и техника эксперимента– 1972– № 4–С.233–235
5. Чахлов В.Л., Вавилов С.П., Пушин В.С. Характеристики инжектора с взрывным катодом// Приборы и техника эксперимента–1975–№ 2–С. 23–25
6. Джонсон. Система регистрации спектров импульсного испускаемого плазмой длительностью порядка наносекунд// Приборы для научных исследований – 1974–№ 2–С. 47–52
7. Вавилов С.П. Импульсная рентгеновская техника.– М.: Энергия–1985– 120 с.
8. Вавилов С.П., Горбунов В.И. Импульсное рентгеновское излучение в дефектоскопии – М.: Энергоатомиздат – 1985–80 с.
9. Герасимов А.И. и др. Транспортабельный источник мощного импульсного рентгеновского излучения ИЛТИ// Приборы и техника эксперимента– 2007– С.122–130
10. Лавринович И.В. и др. Малогабаритный источник импульсного рентгеновского излучения для высокоскоростной радиографии//Приборы и техника эксперимента– 2013– № 3–С. 90–96
11. Cracnell A.P. The determination of the photon energy spectrum of a flash X-ray tube//Radiation Effects– 1970– vol.2– pp. 233–242
12. Senczyk D. Napiecie i natezenie pradu w impulsowych lampach rentgenowskich// Krajowa konferencja badan radiograficznych –Popov 2003– Poland, Poznan.

### **СПРАВОЧНО-ИНФОРМАЦИОННОЕ ПОСОБИЕ «ВИЗУАЛЬНЫЙ И РАДИАЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ В СИСТЕМЕ СТАНДАРТОВ ISO. EN И ASTM»**

*Гнедин М.М., Усачёв Е.Ю., Галкин Д.И.*

**МГТУ МИРЭА**

Работа распространяется на методы неразрушающего контроля (визуальный и радиационный контроль), устанавливающие соответствие продукции требованиям контракта (договора).

Цель работы – создание справочно-информационного материала, предназначенного для использования :

- при подготовке и сертификации по ISO 9712 «Неразрушающий контроль. Квалификация и сертификация персонала неразрушающего контроля» персонала радиационного и визуального контроля;
- при организационно- технической подготовке производства (монтажа), оборудования по европейским стандартам EN;
- при разработке нормативно-технической документации по радиационному и визуальному контролю;
- при анализе опыта создания единой уровневой системы требований к качеству (классу) разнообразных объектов контроля, изложенной в виде конкретных показателей и