

цифровую модель, которую можно наблюдать на видеомониторе в режиме 3D. Объемное изображение внутренней структуры объекта съемки, дополненное точными цифровыми рентгено топографическими данными, повышает информативность и надежность рентгенодиагностики как в медицине, так и при контроле безопасности пассажиров на транспорте.

*Список литературы:*

1. Основы рентгенодиагностической техники / Под ред. Н.Н. Блинова. – М.: Медицина, 2002. 392 с.
2. Зеликман М.И. Цифровые системы в рентгенодиагностике. – М.: Медицина, 2007. 208 с.
3. Черный А.Н. Рентгено топография. – М.: Недра, 1981. 161 с.

Александр Николаевич Черный,  
д-р техн. наук, гл. научный сотрудник,  
НИИ фтизиопульмонологии,  
Первый московский государственный  
университет им. И.М. Сеченова,  
Алексей Вячеславович Потемкин,  
директор по развитию,  
ООО «СКБ «Медрентех»,  
г. Москва,  
e-mail: alexcherny@bk.ru

М.Г. Петрушанский

## РАСЧЕТ РАДИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕНТГЕНОВСКОГО АППАРАТА ПО СПЕКТРУ ЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**Аннотация**

В статье описан и обоснован метод, позволяющий по известному спектру излучения рентгеновского аппарата рассчитать значения суммарной фильтрации пучка рентгеновского излучения, первого и второго слоев половинного ослабления и коэффициента гомогенности излучения. Приведено выражение для расчета, и оценена возможность его использования для обработки экспериментальных данных.

Согласно СанПиН 2.6.1.1192-03 [1], первый слой половинного ослабления (СПО) и суммарная фильтрация пучка рентгеновского излучения относятся к основным контролируемым параметрам рентгеновских аппаратов. При известном спектре излучения указанные параметры можно определить посредством соответствующей обработки данных. Один из вариантов такой обработки предложен в работе [2], где по экспериментально полученным для разных анодных напряжений спектрам рентгеновского излучения произведено определение первого и второго СПО и коэффициента гомогенности излучения. Однако в указанной работе отсутствуют рекомендации и примеры определения величины суммарной фильтрации излучения. Одним из методов нахождения данной величины является ее определение по известным или измеренным величинам первого СПО и анодного напряжения рентгеновского аппарата [3]. Аналогично, используя полученное в указанной работе выражение, можно определить значение суммарной фильтрации излучения по известным или измеренным величинам второго СПО и анодного напряжения рентгеновского аппарата. Нужно лишь учесть, что для второго СПО найденное с помощью указанного выражения значение общей толщины

фильтра является суммой величин первого СПО и суммарной фильтрации излучения.

Для оценки возможности применения указанного выражения можно воспользоваться экспериментальными результатами, полученными в работе [4]. По этим данным были аппроксимированы значения первого и второго СПО излучения и для них рассчитаны величины суммарной фильтрации излучения при разных значениях анодного напряжения. Полученные результаты представлены в *табл. 1*.

Анализ данных *табл. 1* показывает, что значения суммарной фильтрации излучения, рассчитанные по величинам первого и второго СПО для заданного значения анодного напряжения, отличаются не более чем на  $\pm 1,3\%$ , что не превышает полученное в работе [3] значения погрешности.

Таким образом, используя полученное в работе [3] выражение, можно приведенным в работе [2] величинам первого и второго СПО сопоставить значения соответствующей суммарной фильтрации пучка рентгеновского излучения. В *табл. 2* представлены значения коэффициента гомогенности, первого и второго СПО [2] и рассчитанные по ним величины суммарной фильтрации излучения при различных значениях анодного напряжения.

Из табл. 2 видно, что рассчитанные по значениям первого и второго СПО величины суммарной фильтрации оказались разными, причем отличие существенно превышает полученное в работе [3] значение погрешности, составляющее 3 %. Возможно, это различие явилось следствием большой погрешности метода, использованного в работе [2] для определения величин первого и второго СПО по экспериментально полученным спектрам рентгеновского излучения.

Таблица 1

**Экспериментальные значения первого и второго СПО [4] и рассчитанные по ним величины суммарной фильтрации излучения при различных значениях анодного напряжения**

Анодное напряжение, кВ	Первый СПО, мм Al	Второй СПО, мм Al	Суммарная фильтрация излучения по первому СПО, мм Al	Суммарная фильтрация излучения по второму СПО, мм Al
72,4	1,40	2,31	1,49	1,51
98,8	1,92	3,43	1,72	1,74

Таблица 2

**Экспериментальные значения коэффициента гомогенности, первого и второго СПО [2] и рассчитанные по ним величины суммарной фильтрации излучения при различных значениях анодного напряжения**

Анодное напряжение, кВ	Первый СПО, мм Al	Второй СПО, мм Al	Коэффициент гомогенности излучения	Суммарная фильтрация излучения по первому СПО, мм Al	Суммарная фильтрация излучения по второму СПО, мм Al
50	1,35	1,93	1,43	2,05	2,29
60	1,68	2,6	1,52	2,29	2,85
70	1,97	3,1	1,59	2,43	2,88
80	2,3	3,9	1,66	2,63	3,62
90	2,4	4,1	1,70	2,48	3,08
100	3,0	5,2	1,73	3,03	4,14
110	3,3	5,7	1,74	3,13	4,05
120	3,6	6,3	1,74	3,22	4,19

Однако, как указывалось выше, по спектру излучения можно непосредственно определить суммарную фильтрацию. Из-за зависимости коэффициента ослабления излучения в веществе суммарного фильтра от энергии конкретного компонента спектра рентгеновского излучения суммарная фильтрация неодинаково преобразует разные компонен-

ты спектра, что приводит к изменению его формы. Это обстоятельство можно использовать для определения величины суммарной фильтрации по известному спектру излучения.

Как известно [5], количество квантов  $N_1$  с энергией  $E_1$ , испускаемых за единицу времени в единицу телесного угла, в спектре излучения с граничной энергией  $E_0$  после прохождения этого излучения через общий фильтр толщиной  $d_f$  из вещества с плотностью  $\rho$  и массовым коэффициентом ослабления для этой энергии  $\mu_1$  определяется следующим выражением:

$$N_1 = C \cdot i_a \cdot Z \cdot \left( \frac{E_0}{E_1} - 1 \right) \cdot e^{-\mu_1 \cdot \rho \cdot d_f}, \quad (1)$$

где  $C$  – постоянная величина;  $i_a$  – анодный ток;  $Z$  – атомный номер материала анода. Аналогично, количество квантов  $N_2$  с энергией  $E_2$  определяется выражением

$$N_2 = C \cdot i_a \cdot Z \cdot \left( \frac{E_0}{E_2} - 1 \right) \cdot e^{-\mu_2 \cdot \rho \cdot d_f}, \quad (2)$$

где  $\mu_2$  – массовый коэффициент ослабления излучения для энергии  $E_2$ .

Деление выражения (2) на выражение (1) дает следующее равенство:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{E_0 - E_2}{E_0 - E_1} \cdot \frac{E_1}{E_2} \cdot e^{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \rho \cdot d_f},$$

откуда

$$d_f = \frac{\ln \left( \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{E_0 - E_1}{E_0 - E_2} \cdot \frac{E_2}{E_1} \right)}{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \rho},$$

или, с учетом  $E_0 = e \cdot U_a$ , где  $e$  – элементарный заряд;  $U_a$  – анодное напряжение, получим окончательное выражение для расчета величины суммарной фильтрации пучка рентгеновского излучения

$$d_f = \frac{\ln \left( \frac{N_2}{N_1} \cdot \frac{e \cdot U_a - E_1}{e \cdot U_a - E_2} \cdot \frac{E_2}{E_1} \right)}{(\mu_1 - \mu_2) \cdot \rho}. \quad (3)$$

Табл. 3 содержит экспериментальные данные, представленные в работе [2] (значения анодного напряжения и количества квантов с энергиями 20 и 30 кэВ), и результаты расчетов величины суммарной фильтрации излучения с помощью полученного выражения (3).

Поскольку величины суммарной фильтрации излучения рассчитывались в алюминиевом эквиваленте, в выражении (3) использовались значения плотности и массовых коэффициентов ослабления излучения с энергиями 20 и 30 кэВ для алюминия:  $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$ ,  $\mu_1 = 3,442 \text{ см}^2/\text{г}$  и  $\mu_2 = 1,128 \text{ см}^2/\text{г}$  соответственно [6].

Анализ данных *табл. 3* показывает, что расчетные значения суммарной фильтрации излучения увеличиваются с ростом величины анодного напряжения, что соответствует нормальной зависимости [7]. Исключение составляет лишь значение суммарной фильтрации излучения, соответствующее величине анодного напряжения 90 кВ. Однако, как видно из приведенных в *табл. 2* значений первого и второго СПО, полученных в работе [2] для рассматриваемых спектров, при указанной величине анодного напряжения наблюдается явное замедление роста величин первого и второго СПО. Вероятно, все эти отклонения от нормы вызваны отличиям условий набора спектра при величине анодного напряжения 90 кВ от условий набора остальных спектров.

Таблица 3

**Экспериментальные значения количества квантов с энергиями 20 и 30 кэВ [2] и расчетные величины суммарной фильтрации излучения при различных значениях анодного напряжения**

Анодное напряжение, кВ	Количество квантов с энергией 20 кэВ	Количество квантов с энергией 30 кэВ	Суммарная фильтрация излучения, мм Al
50	6434	11778	2,27
60	8264	19368	2,47
70	5810	15595	2,59
80	4266	12447	2,65
90	4131	11463	2,53
100	2966	9366	2,70
110	2539	8446	2,76
120	2177	7463	2,79

Таблица 4

**Расчетные величины первого и второго СПО и коэффициента гомогенности излучения при различных значениях анодного напряжения**

Анодное напряжение, кВ	Первый СПО, мм Al	Второй СПО, мм Al	Коэффициент гомогенности излучения
50	1,44	1,95	1,35
60	1,77	2,50	1,41
70	2,06	3,02	1,47
80	2,31	3,51	1,52
90	2,43	3,86	1,59
100	2,75	4,45	1,62
110	3,00	4,96	1,65
120	3,23	5,45	1,69

Используя приведенные в *табл. 3* расчетные значения суммарной фильтрации излучения, можно с помощью найденного в работе [8] выражения определить величины первого и второго СПО и по ним рассчитать коэффициент гомогенности излучения при различных значениях анодного напряжения. Полученные данные представлены в *табл. 4*.

Итак, предложен метод, позволяющий по известному спектру излучения рентгеновского аппарата рассчитывать значения суммарной фильтрации пучка рентгеновского излучения, первого и второго СПО и коэффициента гомогенности излучения.

*Список литературы:*

1. СанПиН 2.6.1.1192-03 Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований.
2. Васильев В.Н., Лебедев Л.А., Сидорин В.П., Ставицкий Р.В. Спектры излучения рентгеновских установок. Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 144 с.
3. Петрушанский М.Г. Метод расчета суммарной фильтрации пучка рентгеновского излучения рентгеновского аппарата / III Евразийский конгресс по медицинской физике и инженерии «Медицинская физика-2010». Сб. Том 1. – М., 2010. С. 66-67.
4. Козловский Э.Б. Измерение динамического диапазона цифровых систем визуализации рентгеновских изображений // Медицинская техника. 2000. № 5. С. 26-28.
5. Рентгенотехника. Справочник. В 2-х кн. Кн.2 / Под общ. ред. В.В. Ключева. – М.: Машиностроение, 1992. 368 с.
6. Berger M.J., Hubbell J.H. XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer, National Bureau of Standards. 1999. Version 3.1.
7. Петрушанский М.Г. Сравнительный анализ требований государственных стандартов к величинам суммарной фильтрации пучка рентгеновского излучения рентгенодиагностических аппаратов // Медицинская техника. 2011. № 5. С. 11-14.
8. Петрушанский М.Г. К вопросу определения первого слоя половинного ослабления рентгеновского излучения // Медицинская техника. 2009. № 5. С. 16-18.

*Михаил Георгиевич Петрушанский,*  
канд. техн. наук, доцент,  
кафедра проектирования и технологии  
радиоэлектронных средств,  
ФГБОУ ВПО «Оренбургский  
государственный университет»,  
г. Оренбург,  
e-mail: pmg74@inbox.ru