

С. А. ДУШКИН, А. М. КУРОВ, В. А. ОДИНЕЦ,
к. ф.-м. н. А. Н. ОРОБИНСКИЙ

Украина, г. Харьков, Нац. науч. центр «Институт метрологии»;
Ин-т медицинской радиологии им. С. П. Григорьева
E-mail: orobin@mail.ru; imr@online.kharkiv.net

Дата поступления в редакцию
08.07 2008 г.

Оппонент к. т. н. Б. А. ДЕМЬЯНЧУК
(ОНУ им. И. И. Мечникова, г. Одесса)

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведен алгоритм расчета характеристик рентгеновского излучения: спектрального разрешения, средней энергии, коэффициента гомогенности, первого и второго слоя половинного ослабления.

Режимы работы рентгеновских установок, которые определяют характеристики рентгеновского излучения, заданы нормативными документами [1, с. 8—10] и [2, с. 9—12].

Актуальность данной работы связана со следующими аспектами.

При лечении онкологических заболеваний и медицинских обследованиях применяется рентгеновское излучение. Для эффективного лечения или обследования, а также для безопасности пациентов и медицинского персонала, который обслуживает рентгеновские установки, необходимо знать разрешение, среднюю энергию, коэффициент гомогенности, толщину первого и второго слоя половинного ослабления (СПО1 и СПО2) рентгеновского излучения. Кроме того, нужно знать поглощенные дозы рентгеновского излучения, которые отпускают пациентам при той или иной процедуре, и эффективные дозы [3, табл. 5.1], которые получает персонал.

Необходимость расчета характеристик рентгеновского излучения возникает при создании нового оборудования:

- медицинских рентгеновских установок с заданными характеристиками;
- дозиметров рентгеновского излучения с минимальной энергетической зависимостью показаний дозы;
- метрологических рентгеновских установок с заданными характеристиками для настройки, аттестации и проверки дозиметров рентгеновского излучения;
- средств противорадиационной защиты медицинского персонала.

В [4, 5] приведены результаты расчета спектров рентгеновского излучения в диапазоне напряжений на аноде рентгеновской трубки от 30 до 140 кВ с помощью алгоритма TASMIP, который основан на полиномиальной интерполяции экспериментальных спектров рентгеновской трубки с вольфрамовым анодом.

Научная новизна данной работы состоит в том, что:

— на основе теоретических исследований разработан алгоритм, позволяющий рассчитать спектральное разрешение, среднюю энергию, коэффициент гомогенности, СПО1 и СПО2 при помощи построения спектров тормозного рентгеновского излучения и определения средних энергий без учета и с учетом фильтра, необходимого для определения СПО1;

— при построении спектров применялись аналитические зависимости линейных коэффициентов ослабления воздуха, материалов фильтров и слоев половинного ослабления от энергии независимо от материала анода рентгеновской трубки;

— теоретически исследованы характеристики спектров рентгеновского излучения в более широком энергетическом диапазоне (от 12 до 300 кВ), чем приведено в [4, 5];

— расчет выполнен с помощью стандартных математических пакетов типа MathCAD и Origin Pro, что значительно упрощает процедуру расчета по сравнению с [4, 5];

— определен критерий применимости разработанного алгоритма.

Спектр рентгеновского излучения

Флюэнс частиц пропорционален интенсивности тормозного рентгеновского излучения, а максимальная энергия рентгеновского излучения в кВ численно равна напряжению на аноде рентгеновской трубки в кВ ($E_{\max, \text{кВ}} = U_{\text{а, кВ}}$ [6, с. 12]). С учетом этого, флюэнс частиц тормозного рентгеновского излучения в зависимости от энергии частиц, начиная с энергии $E \approx 12$ кВ, без учета фильтрации на заданном расстоянии от фокуса рентгеновской трубки можно представить в виде [6, с. 16—17]

$$\Phi(E, U_a) = \Phi_{\max} \left(1 - \frac{E}{U_a} \right) \text{ при } E \geq 12 \text{ кВ.} \quad (1)$$

Нормированное к энергии $E=300$ кВ значение флюэнса запишем в виде

$$\Phi_N(E) = \Phi_N(E, U_a) = \frac{\Phi(E, U_a)}{\Phi_{\max} \big|_{U_a=300 \text{ кВ}}} = \left(1 - \frac{E_{\text{кВ}}}{U_{\text{а, кВ}}} \right) \frac{U_{\text{а, кВ}}}{300} \text{ при } E \geq 12 \text{ кВ.} \quad (2)$$

Для получения спектров рентгеновского излучения с заданной средней энергией применяются фильтры. Общая фильтрация образуется из собственной

(фиксированной) фильтрации плюс дополнительная фильтрация.

Обычно, для собственной фильтрации рентгеновской трубки применяют бериллиевый фильтр толщиной 1 мм, дополнительно могут применять фильтры из алюминия толщиной до 4 мм [2, табл. 3].

Для дополнительной фильтрации рентгеновского излучения применяются фильтры из Al, Cu, Sn и Pb. Кроме этого, при расчете средней энергии рентгеновского излучения необходимо учитывать фильтрацию, получаемую за счет воздуха.

Измерение средней энергии выполняют, как правило, на расстоянии $R=1$ м от фокуса рентгеновской трубки.

Нормированное значение флюэнса частиц рентгеновского тормозного излучения с учетом собственной и дополнительной фильтрации определим как

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = \Phi_N(E) \cdot K_{\text{ocn}}(E), \quad (3)$$

где $K_{\text{осл}}(E)$ — коэффициент ослабления рентгеновского излучения, прошедшего через фильтры [7, с. 218] — $K_{\text{осл}}(E) = \exp[-\mu(E)d]$;

d — толщина фильтров;

$\mu(E)$ — линейный коэффициент ослабления для энергий, меньших 1500 кэВ [7, с. 220] —

$$\mu(E) = \tau(E) + \sigma_{\text{кор}}(E) + \sigma_{\text{некор}}(E);$$

$\tau(E)$ — линейный коэффициент ослабления за счет фотоэффекта;

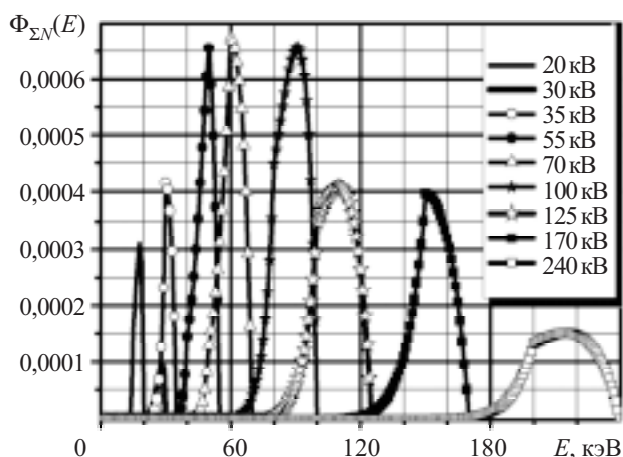


Рис. 1. Спектры рентгеновского излучения серии L

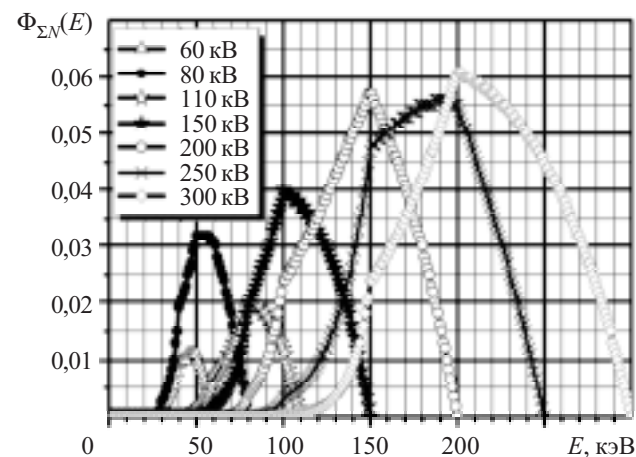


Рис. 3. Спектры рентгеновского излучения серии W

$\sigma_{\text{кор}}(E), \sigma_{\text{некор}}(E)$ — линейный коэффициент ослабления за счет рэлеевского и комптоновского рассеяния, соответственно;

$$\sigma_{\text{некор}}(E) = \sigma_{\text{некор}k}(E) + \sigma_{\text{некор}c}(E);$$

k, s — индексы, указывают на истинное поглощение и рассеяние, соответственно.

Коэффициент ослабления рентгеновского излучения, прошедшего через фильтры, представим в виде

$$K_{\text{OCL}}(E) = e^{-\mu_{\text{Be}}(E) \cdot d_{\text{Be}}} \cdot e^{-\mu_{\text{B}}(E) \cdot R} \cdot e^{-\mu_{\text{Al}}(E) \cdot d_{\text{Al}}} \times \\ \times e^{-\mu_{\text{Cu}}(E) \cdot d_{\text{Cu}}} \cdot e^{-\mu_{\text{Sn}}(E) \cdot d_{\text{Sn}}} \cdot e^{-\mu_{\text{Pb}}(E) \cdot d_{\text{Pb}}}, \quad (4)$$

где μ_{Be} , μ_{B} , μ_{Al} , μ_{Cu} , μ_{Sn} и μ_{Pb} — линейные коэффициенты ослабления Be, воздуха, Al, Cu, Sn и Pb;

$d_{\text{Be}}, d_{\text{Al}}, d_{\text{Cu}}, d_{\text{Sn}}$ и d_{Pb} — толщина фильтров из Be, Al, Cu, Sn и Pb.

Зная линейные коэффициенты ослабления для воздуха, Be, Al, Cu, Sn и Pb [1, с. 17; 7, с. 222, 226, 234, 246, 266, 267], при помощи кусочно-линейной аппроксимации получим зависимости этих коэффициентов в диапазоне энергий от $E_0=1$ кэВ до $E_\infty=300$ кэВ:

[illegible]

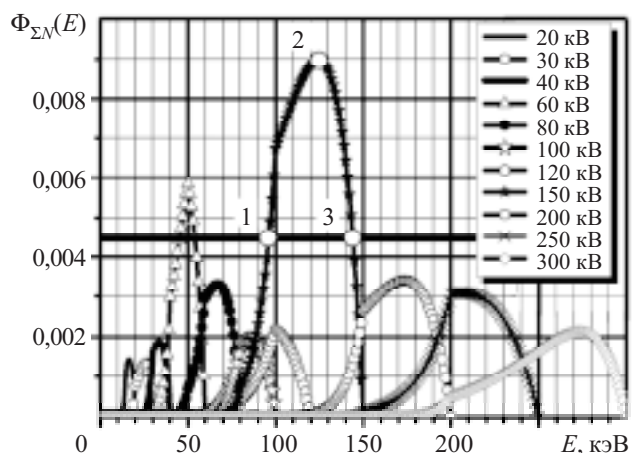


Рис. 2. Спектры рентгеновского излучения серии N

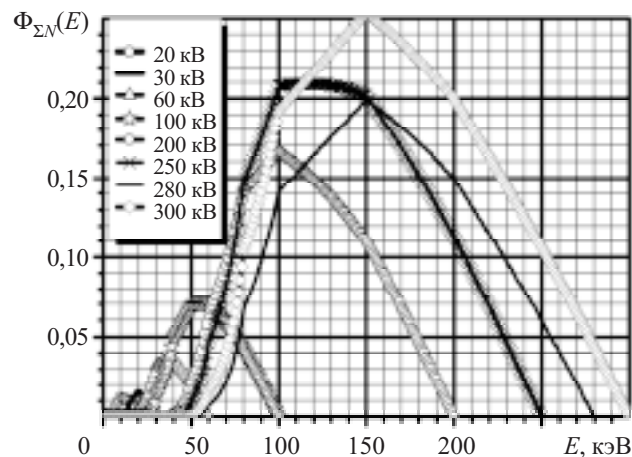


Рис. 4. Спектры рентгеновского излучения серии H

Таблица 1

Характеристики рентгеновского излучения серии L

U_a , кВ	R_E , % [2]	R_{Ep} , %	δR_{Ep} , %	$\bar{E}$, кэВ [2]	$\bar{E}_\delta$, кэВ	$\bar{E}_{d_{1/2}}$, кэВ	$\delta \bar{E}_\delta$, %	h_p
20	21	24,5	16,7	17	17,3	17,6	1,8	0,965
30	21	13,8	-34,2	26	26,9	27,3	3,5	0,965
35	21	16,7	-20,6	30	30,8	31,1	2,7	0,977
55	22	17,5	-20,3	48	47,9	48,7	-0,2	0,948
70	22	20,2	-8,0	60	60,3	61,1	0,5	0,973
100	22	21,1	-4,1	87	87,3	88,2	0,3	0,978
125	21	22,5	7,2	109	107,9	108,7	-1,0	0,986
170	18	13,8	-23,3	149	152,1	153,2	2,1	0,990
210	18	12,8	-28,7	185	188,1	189,1	1,7	0,994
240	18	18,3	1,4	211	212,3	212,9	0,6	0,998

Таблица 2

Характеристики рентгеновского излучения серии N

U_a , кВ	R_E , % [2]	R_{Ep} , %	δR_{Ep} , %	$\bar{E}$, кэВ [2]	$\bar{E}_\delta$, кэВ	$\bar{E}_{d_{1/2}}$, кэВ	$\delta \bar{E}_\delta$, %	h_p	h	δh_p , %
15	33	32,4	-1,9	12	12,3	12,7	2,5	0,914	0,875	4,4
20	34	29,2	-14,2	16	16,5	17,0	3,1	0,935	0,895	4,5
25	33	26,4	-20,0	20	20,3	20,8	1,5	0,938	0,904	3,8
30	32	35,6	11,2	24	24,5	25,2	2,1	0,917	0,885	3,7
40	30	28,2	-5,9	33	33,5	34,1	1,5	0,948	0,923	2,7
60	36	33,6	-6,5	48	48,2	49,8	0,4	0,895	0,923	-3,1
80	32	31,5	-1,6	65	65,4	66,9	0,6	0,939	0,935	-0,4
100	28	24,4	-12,7	83	84,4	85,9	1,7	0,963	0,949	1,5
120	27	23,1	-14,5	100	100,4	101,8	0,4	0,968	0,966	0,2
150	37	38,6	4,3	118	118,6	121,5	0,5	0,952	0,955	-0,4
200	30	27,4	-8,6	164	168,1	169,8	2,5	0,987	0,985	0,2
250	28	24,8	-11,3	208	210,0	211,4	1,0	0,994	0,992	0,2
300	27	23,8	-11,8	250	254,7	256,5	1,9	0,995	0,995	0

Таблица 3

Характеристики рентгеновского излучения серии W

U_a , кВ	R_E , % [2]	R_{Ep} , %	δR_{Ep} , %	$\bar{E}$, кэВ [2]	$\bar{E}_\delta$, кэВ	$\bar{E}_{d_{1/2}}$, кэВ	$\delta \bar{E}_\delta$, %	h_p	h	δh_p , %
60	48	39,8	-17,2	45	45,6	47,8	1,3	0,861	0,857	0,5
80	55	59,5	8,1	57	57,6	61,1	1,1	0,896	0,853	5,0
110	51	42,9	-15,9	79	82,4	86,3	4,3	0,903	0,865	4,4
150	56	56,0	0	104	107,7	112,7	3,6	0,917	0,886	3,6
200	57	48,2	-15,5	137	143,3	150,1	4,6	0,936	0,931	0,6
250	56	46,2	-17,5	173	181,1	186,7	4,7	0,966	0,959	0,8
300	57	54,2	-4,9	208	215,2	220,5	3,5	0,978	0,974	0,5

Таблица 4

Характеристики рентгеновского излучения серии H

U_a , кВ	R_{Ep} , %	$\bar{E}$, кэВ [2]	$\bar{E}_\delta$, кэВ	$\bar{E}_{d_{1/2}}$, кэВ	$\delta \bar{E}_\delta$, %	h_p	h	δh_p , %
20	101,7	12,9	13,8	15,2	7,0	0,820	0,750	10,9
30	57,3	19,7	20,4	22,0	3,6	0,832	0,725	14,8
60	66,4	37,3	38,7	42,3	3,8	0,796	0,745	6,9
100	84,5	57,4	60,8	65,6	5,9	0,905	0,815	11,0
200	96,1	102	116,1	130,9	13,8	0,788	0,708	11,3
250	113,7	122	140,4	159,1	15,1	0,839	0,751	11,7
280	92,1	146	162,6	179,7	11,4	0,881	0,845	4,3
300	101,8	147	167,3	187,3	13,8	0,873	0,819	6,6

4. Погрешность аппроксимации $\mu(E)$ и $d_{1/2, Al, Cu}(E)$ зависит от интервала дискретизации по энергии рентгеновского излучения (ΔE_d) при аппроксимации линейных коэффициентов ослабления.

С использованием данного алгоритма, численными методами были рассчитаны характеристики стандартных рентгеновских излучений серий L , N , W и H , которые приведены в табл. 1—4. При этом принималось во внимание, что для серии L не нормируется коэффициент гомогенности, а следовательно, и СПО2; для серии H не нормируется спектральное разрешение [2, с. 9—12].

Для анализа полученных результатов вычислены значения δR_{Ep} , $\delta \bar{E}_p$ и δh_p — отклонения рассчитанных значений R_{Ep} , $\bar{E}_p$ и h_p от R_E , $\bar{E}$ и h , приведенных в [2].

Проанализировав рассчитанные характеристики стандартных рентгеновских излучений серий L , N , W и H , и сравнив их с характеристиками, приведенными в [2] (табл. 1—4), определим критерий применимости алгоритма расчета характеристик рентгеновского излучения с учетом выражений, приведенных в данной работе.

Для рентгеновских установок коэффициент гомогенности h , как правило, должен быть в пределах $0,8 \leq h < 1$ [2]. Поэтому за критерий применимости алгоритма расчета характеристик рентгеновского излучения примем коэффициент h .

Как видно из табл. 1—4,

— при $0,9 \leq h_p < 1$ $|\delta \bar{E}_p| \leq 5,0\%$ и $|\delta h_p| \leq 5,0\%$;

— при $0,8 \leq h_p \leq 0,9$ $|\delta \bar{E}_p| \leq 15,0\%$ и $|\delta h_p| \leq 15,0\%$;

— $|\delta R_{\max Ep}| \leq 35\%$.

Для более точного определения спектрального разрешения необходимо уменьшать интервал дискретизации по энергии рентгеновского излучения ΔE_d , который можно определить как $\Delta E_a \leq |\delta R_{Ep}| \cdot \bar{E}$ (рис. 2).

Выводы

1. На основе теоретических исследований разработан алгоритм расчета характеристик рентгеновского излучения — спектрального разрешения, средней энергии, первого слоя половинного ослабления, второго слоя половинного ослабления и коэффициента гомогенности. Эти характеристики можно определить, построив спектр рентгеновского излучения для заданной комбинации фильтров и напряжения на аноде, рассчитав среднюю энергию заданного спектра и среднюю энергию заданного спектра с учетом фильтра, необходимого для определения первого слоя половинного ослабления.

2. Рассчитать характеристики рентгеновского излучения можно, зная аналитические зависимости линейных коэффициентов ослабления воздуха и материалов фильтров от энергии и зависимости толщины слоев половинного ослабления от энергии, что мож-

но получить при помощи кусочно-линейной аппроксимации этих функций.

3. Чем меньше интервал дискретизации по энергии рентгеновского излучения при аппроксимации линейных коэффициентов ослабления и чем более однороден, применительно к средней энергии, спектр рентгеновского излучения, тем ближе к истинным рассчитанные значения спектрального разрешения, средней энергии, коэффициента гомогенности, толщины СПО1 и СПО2.

4. Критерием применимости алгоритма расчета характеристик рентгеновского излучения является коэффициент гомогенности h_p . В диапазоне энергий от 12 до 300 кэВ:

— при $0,9 \leq h_p < 1$ $|\delta \bar{E}_p| \leq 5\%$ и $|\delta h_p| \leq 5\%$;

— при $0,8 \leq h_p \leq 0,9$ $|\delta \bar{E}_p| \leq 15\%$ и $|\delta h_p| \leq 15\%$.

5. По спектру рентгеновского излучения можно оценить значение флюэнса (мощности дозы) рентгеновского излучения.

6. Рассчитав спектральное разрешение и коэффициент гомогенности по алгоритму, приведенному в данной работе, можно определить, является ли спектр рентгеновского излучения стандартным [2], и если да, то к какой серии этот спектр относится: с низким содержанием кермы в воздухе, узким спектром, широким спектром или с высоким содержанием кермы в воздухе.

7. Приведенный алгоритм расчета не учитывает нестабильности напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки и особенности каждой рентгеновской установки (геометрические размеры, место расположения, диаметр однородного поля) с точки зрения коэффициентов рассеяния рентгеновского излучения. Поэтому окончательно определить характеристики рентгеновского излучения и их погрешности можно только экспериментальным путем при их измерениях.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

- ГОСТ 8.087—2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Установки поверочные дозиметрические фотонного и электронного излучений. Методы и средства поверки.
- ДСТУ ISO 4037-1:2006. Стандартні рентгеновське та гамма-випромінювання для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та для визначення їх чутливості в залежності від енергії фотонів. Частина 1. Характеристики випромінень та методи, що їх створюють.
- ГГН 6.6.1-6.5.001—98. Нормы радиационной безопасности Украины. НРБУ-97.
- Sanchez del Rio M., Dejus R. J. XOP: recent developments // SPIE proceedings.— 1998.— Vol. 3448.— P. 340—345.
- Boone J. M., Seibert J. A. An accurate method for computer-generating tungsten anode X-ray spectra from 30 to 140 kV // Medical Physics.— 1997.— Vol. 24, N 11.— P. 1661—1670.
- Рентгеновские лучи: Пер. с нем. и англ. Л. Н. Бронштейн / Под ред. М. А. Блохина.— М.: Издательство иностранной литературы, 1960.
- Немец О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике.— Киев: Наукова думка, 1975.
- Кронгауз А. Н., Петров В. А., Линчевская Г. А., Палладиева Н. М. Измерение и расчет поглощенных доз при внешнем и внутреннем облучении.— М.: Медгиз, 1963.