

Повышение точности расчета радиационных параметров рентгеновского аппарата по спектру его излучения

Аннотация

Выявлены недостатки и предложен вариант развития представленного ранее метода расчета значений суммарной фильтрации пучка рентгеновского излучения, первого и второго слоев половинного ослабления и коэффициента гомогенности излучения по известному спектру излучения рентгеновского аппарата. Изложен порядок проведения расчета, получено соответствующее выражение, и оценена возможность его использования для обработки экспериментальных данных. Показано, что применение предложенного варианта метода позволяет уменьшить максимальные отличия экспериментальных и расчетных значений определяемых радиационных параметров аппарата.

Введение

Определение радиационных параметров рентгеновских аппаратов остается требованием действующих в РФ нормативных документов в области обеспечения радиационной безопасности [1], [2]. В работе [3] был предложен метод расчета значений суммарной фильтрации пучка рентгеновского излучения, первого и второго слоев половинного ослабления (СПО) и коэффициента гомогенности излучения по известному спектру излучения рентгеновского аппарата. Для оценки возможности применения предложенного метода использовались экспериментально полученные спектры, приведенные в справочнике [4]. В табл. 1 приведены параметры излучения при различных значениях анодного напряжения, приведенные в справочнике [4] и полученные в результате расчета [3].

Таблица 1

Экспериментальные [4] и расчетные [3] значения первого и второго СПО, коэффициента гомогенности и суммарной фильтрации излучения

Анодное напряжение, кВ	Первый СПО, мм Al		Второй СПО, мм Al		Коэффициент гомогенности излучения		Суммарная фильтрация, мм Al
	[4]	[3]	[4]	[3]	[4]	[3]	
50	1,35	1,44	1,93	1,95	1,43	1,35	2,27
60	1,68	1,77	2,6	2,50	1,52	1,41	2,47
70	1,97	2,06	3,1	3,02	1,59	1,47	2,59
80	2,3	2,31	3,9	3,51	1,66	1,52	2,65
90	2,4	2,43	4,1	3,86	1,70	1,59	2,53
100	3,0	2,75	5,2	4,45	1,73	1,62	2,70
110	3,3	3,00	5,7	4,96	1,74	1,65	2,76
120	3,6	3,23	6,3	5,45	1,74	1,69	2,79

Из табл. 1 видно, что отличия значений первого и второго СПО превышают соответственно 10 % (при анодном напряжении $U_a = 120$ кВ) и 14 % (при $U_a = 100$ кВ), а величин коэффициента гомогенности излучения – 8 % (при $U_a = 80$ кВ). Можно предположить, что такие существенные отличия вызваны использованием для расчетов только малой части спектра, а именно квантов с энергиями 20 и 30 кэВ, суммарная доля которых составляет примерно от 2 % при $U_a = 120$ кВ до 7 % при $U_a = 50$ кВ от общего числа квантов соответствующих спектров [3]. Кроме того, остается открытым вопрос оптимальности выбора значений энергии квантов 20 и 30 кэВ.

Применение для расчетов квантов только двух энергий продиктовано самой сущностью предложенного в [3] метода. Для более полного использования информации об излучении, содержащейся в его спектре, представляется целесообразным учитывать весь спектр целиком. В этом случае для определения параметров излучения необходимо осуществить виртуаль-

ное преобразование спектра этого излучения при помощи дополнительного фильтра и последующую совместную обработку исходного и полученного спектров.

Материалы и методы

Для осуществления такой обработки по исходному и преобразованному некоторой величиной дополнительного фильтра спектрам, соответствующим определенному значению анодного напряжения, сначала необходимо определить коэффициент пропускания излучения K как отношение мощности экспозиционной дозы P_d излучения после прохождения дополнительного фильтра к мощности экспозиционной дозы P_0 исходного излучения [5]:

$$K = P_d / P_0. \quad (1)$$

Затем полученное значение коэффициента K используется для расчета суммарной фильтрации излучения d_f при помощи способа, представленного в работе [5]. Указанный способ основан на применении полученного в [5] выражения, однозначно связывающего значение коэффициента пропускания излучения K с величинами суммарной фильтрации d_f и анодного напряжения U_a рентгеновского аппарата. При помощи этого выражения по известным значениям K и анодного напряжения может быть найдена единственная неизвестная величина суммарной фильтрации, что позволит далее, в соответствии с предложенным в [6] методом, определить значения первого и второго СПО и по ним рассчитать коэффициент гомогенности излучения для определенной величины анодного напряжения.

Как известно, мощность экспозиционной дозы P рентгеновского излучения с максимальной энергией квантов E_{max} определяется следующим выражением [4]:

$$P = \int_0^{E_{max}} N(E) \cdot E \cdot \mu_K(E) \cdot dE, \quad (2)$$

где $N(E)$ – число квантов излучения с энергией E ; $\mu_K(E)$ – массовый коэффициент электронного преобразования энергии для воздуха, соответствующий энергии E . Разбив весь диапазон энергий от 0 до E_{max} на n равных интервалов $\Delta E = E_{max} / n$, интеграл в выражении (2) можно заменить суммой. Тогда мощность экспозиционной дозы P_0 исходного излучения будет определяться следующим выражением:

$$P_0 = \sum_{i=1}^n N_{0i} \cdot E_i \cdot \mu_{Ki} \cdot \Delta E, \quad (3)$$

где N_{0i} – число квантов с энергией E_i в исходном спектре; μ_{Ki} – массовый коэффициент электронного преобразования энергии для воздуха, соответствующий энергии E . Аналогично, мощность экспозиционной дозы P_d излучения после прохождения дополнительного фильтра толщиной d из вещества с плотностью ρ может быть найдена по формуле

$$P_d = \sum_{i=1}^n N_{di} \cdot E_i \cdot \mu_{Ki} \cdot \Delta E, \quad (4)$$

где N_{di} – число квантов с энергией E_i в преобразованном спектре:

$$N_{di} = N_{0i} \cdot e^{-\mu_i p d}, \quad (5)$$

где μ_i – массовый коэффициент ослабления излучения с энергией E_i веществом дополнительного фильтра.

С учетом выражений (3)-(5) формулу (1) можно записать в следующем виде:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n N_{0i} \cdot E_i \cdot \mu_{Ki} \cdot e^{-\mu_i p \cdot d}}{\sum_{i=1}^n N_{0i} \cdot E_i \cdot \mu_{Ki}}. \quad (6)$$

В ГОСТ Р МЭК 60601-1-3-2013 [2] сказано, что первый СПО излучения должен соответствовать величине суммарной фильтрации излучения, поэтому логично определять суммарную фильтрацию, соответствующую первому СПО. Для этого толщина дополнительного фильтра должна быть равна значению первого СПО для данного спектра. Поскольку указанный СПО для исходного спектра неизвестен, определение суммарной фильтрации можно начать с любого близкого к ожидаемому значению первого СПО нулевого приближения толщины дополнительного фильтра d_0 . По найденным для этой толщины d_0 величинам коэффициента пропускания K_0 и суммарной фильтрации d_{f0} нужно найти соответствующее значение первого СПО Δ_0 . Затем, приняв его за новую толщину дополнительного фильтра $d_1 = \Delta_0$, определить коэффициент пропускания K_1 и суммарную фильтрацию d_{f1} для первого приближения. По значению последней вновь найти первый СПО Δ_1 , принять толщину дополнительного фильтра $d_2 = \Delta_1$ и продолжать расчеты до тех пор, пока коэффициент пропускания не при-

близится с требуемой погрешностью к значению 0,500, характеризующему по определению первый СПО. Для j -го приближения толщина дополнительного фильтра принимается равной значению первого СПО для $(j-1)$ -го приближения:

$$d_j = \Delta_{j-1}, \quad (7)$$

а коэффициент пропускания K_j , в соответствии с формулой (6), определяется выражением

$$K_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_{0i} \cdot E_i \cdot \mu_{Ki} \cdot e^{-\mu_i p \cdot d_j}}{\sum_{i=1}^n N_{0i} \cdot E_i \cdot \mu_{Ki}}. \quad (8)$$

Результаты

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчетов значений коэффициента пропускания K_j по формуле (8), а также величин суммарной фильтрации d_{fj} и первого СПО излучения Δ_j по полученным соответствию в работах [5] и [6] выражениям согласно изложенному выше варианту метода с использованием представленных в [4] сведений о спектральном составе излучений, генерируемых при разных условиях. Нулевое приближение толщины дополнительного фильтра при различных значениях анодного напряжения для табл. 2 принято равным $d_0 = 1$ мм, а для табл. 3 – $d_0 = 10$ мм. Номера приближений j изменялись от 0 до 4. Поскольку виртуальная фильтрация излучения осуществлялась алюминиевым дополнительным фильтром, в формуле (8) использовались полученные из [7] значения плотности и массовых коэффициентов ослабления излучения для алюминия. Кроме того, при расчетах использовались представленные в стандарте ГОСТ 8.087–2000 [8] и аппроксимиро-

Таблица 2

Расчетные величины коэффициента пропускания, суммарной фильтрации и первого СПО излучения при нулевом приближении толщины дополнительного фильтра 1 мм

Анодное напряжение, кВ	Коэффициент пропускания, $\times 10^{-3}$, для номера приближения					Суммарная фильтрация, мм Al, для номера приближения					Первый СПО, мм Al, для номера приближения				
	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
50	566	505	501	499	499	1,85	1,90	1,91	1,91	1,91	1,26	1,28	1,29	1,29	1,29
60	622	512	501	499	499	2,06	2,18	2,20	2,20	2,20	1,56	1,63	1,64	1,64	1,64
70	644	519	502	501	500	2,03	2,23	2,25	2,26	2,26	1,73	1,85	1,86	1,87	1,87
80	681	525	502	501	500	2,23	2,53	2,56	2,57	2,57	2,04	2,24	2,25	2,26	2,26
90	687	524	502	500	500	2,12	2,39	2,41	2,42	2,42	2,13	2,33	2,35	2,35	2,35
100	734	529	503	501	501	2,58	2,98	3,00	3,01	3,01	2,66	2,96	2,99	2,99	2,99
110	740	534	503	501	500	2,50	2,97	3,01	3,03	3,03	2,79	3,17	3,21	3,22	3,22
120	759	533	506	501	500	2,65	3,08	3,17	3,18	3,18	3,11	3,48	3,56	3,57	3,57

Таблица 3

Расчетные величины коэффициента пропускания, суммарной фильтрации и первого СПО излучения при нулевом приближении толщины дополнительного фильтра 10 мм

Анодное напряжение, кВ	Коэффициент пропускания, $\times 10^{-3}$, для номера приближения					Суммарная фильтрация, мм Al, для номера приближения					Первый СПО, мм Al, для номера приближения				
	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
50	48,4	469	497	499	499	2,27	1,93	1,91	1,91	1,91	1,44	1,30	1,29	1,29	1,29
60	81,4	475	498	499	499	2,54	2,23	2,20	2,20	2,20	1,80	1,65	1,64	1,64	1,64
70	110	473	497	500	500	2,63	2,29	2,26	2,26	2,26	2,08	1,89	1,87	1,87	1,87
80	147	472	497	499	500	3,02	2,61	2,58	2,57	2,57	2,53	2,29	2,27	2,26	2,26
90	158	480	498	500	500	2,69	2,44	2,42	2,42	2,42	2,55	2,37	2,35	2,35	2,35
100	205	479	498	501	501	3,40	3,06	3,03	3,01	3,01	3,26	3,02	2,99	2,99	2,99
110	224	481	499	500	500	3,36	3,04	3,03	3,03	3,03	3,47	3,23	3,22	3,22	3,22
120	246	486	499	500	500	3,44	3,20	3,18	3,18	3,18	3,78	3,58	3,57	3,57	3,57

ванные для недостающих значений энергии E_i величины массового коэффициента электронного преобразования энергии для воздуха.

Из табл. 2 и 3 видно, что для любого из двух использованных нулевых приближений толщины дополнительного фильтра уже после третьего приближения полученные значения суммарной фильтрации и первого СПО излучения, соответствующие некоторому анодному напряжению, перестают изменяться. Коэффициент пропускания при этом имеет значение в пределах от 0,499 до 0,501, что соответствует отклонению $\pm 0,2\%$ от величины 0,500. Заметна тенденция сходимости приведенных в этих таблицах значений одноименных параметров, соответствующих одному и тому же анодному напряжению, к одинаковым величинам при росте номера приближения.

В табл. 4 приведены параметры излучения при различных значениях анодного напряжения, приведенные в справочнике [4] и полученные в результате расчета предложенным вариантом метода. Анализ данных табл. 4 показывает, что максимальные отличия экспериментальных [4] и расчетных значений первого и второго СПО, а также коэффициента однородности излучения существенно уменьшились по сравнению с результатами расчета в [3] и не превышают соответственно 5 % (при $U_a = 70$ кВ), 10 % (при $U_a = 80$ кВ) и 7 % (при $U_a = 100$ кВ).

Заключение

Использование при определении радиационных параметров рентгеновского аппарата всего спектра излучения, а не только его небольшой части положительно сказывается на результатах расчетов. Наиболее существенно уменьшилось отклонение расчетных значений от экспериментальных для первого СПО излучения, являющегося одним из основных эксплуатационных параметров рентгеновского аппарата, подлежащих контролю [1].

Характерное увеличение полученных при использовании предложенного варианта метода величин суммарной фильтрации излучения с ростом анодного напряжения рентгеновского аппарата является нормой [9]. Несоответствие этому правилу значения суммарной фильтрации при величине анодного напряжения 90 кВ повторяет отмеченное в работе [3] исключение и, возможно, является следствием отличия условий генерирования спектра при этой величине анодного напряжения от условий генерирования других спектров, приведенных в [4].

Список литературы:

1. СанПиН 2.6.1.1192–03 Гигиенические требования к устройству и эксплуатации рентгеновских кабинетов, аппаратов и проведению рентгенологических исследований.
2. ГОСТ Р МЭК 60601-1-3–2013 Изделия медицинские электрические. Часть 1-3. Общие требования безопасности с учетом основных функциональных характеристик. Дополнительный стандарт. Защита от излучения в диагностических рентгеновских аппаратах.
3. Петрушанский М.Г. Расчет радиационных параметров рентгеновского аппарата по спектру его излучения // Медицинская техника. 2012. № 5. С. 29-31.
4. Васильев В.Н., Лебедев Л.А., Сидорин В.П., Ставицкий Р.В. Спектры излучения рентгеновских установок / Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 144 с.
5. Петрушанский М.Г. Расчет коэффициента пропускания тормозного рентгеновского излучения тестовым фильтром // Медицинская техника. 2008. № 6. С. 27-31.
6. Петрушанский М.Г. К вопросу определения первого слоя половинного ослабления рентгеновского излучения // Медицинская техника. 2009. № 5. С. 16-18.
7. Berger M.J., Hubbell J.H. XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer. Version 3.1. – National Bureau of Standards, 1999.
8. ГОСТ 8.087–2000 Установки дозиметрические рентгеновского и гамма-излучений эталонные. Методика поверки по мощности экспозиционной дозы и мощности кермы в воздухе.
9. Петрушанский М.Г. Сравнительный анализ требований государственных стандартов к величинам суммарной фильтрации пучка рентгеновского излучения рентгенодиагностических аппаратов // Медицинская техника. 2011. № 5. С. 11-14.

Михаил Георгиевич Петрушанский,
канд. техн. наук, доцент,
кафедра промышленной электроники
и информационно-измерительной техники,
ФГБОУ ВО «Оренбургский
государственный университет»,
г. Оренбург,
e-mail: pmg74@inbox.ru

Таблица 4

Экспериментальные [4] и расчетные значения первого и второго СПО, коэффициента однородности и суммарной фильтрации излучения

Анодное напряжение, кВ	Первый СПО, мм Al		Второй СПО, мм Al		Коэффициент однородности излучения		Суммарная фильтрация, мм Al
	[4]	расчет	[4]	расчет	[4]	расчет	расчет
50	1,35	1,29	1,93	1,78	1,43	1,38	1,91
60	1,68	1,64	2,6	2,35	1,52	1,43	2,20
70	1,97	1,87	3,1	2,81	1,59	1,50	2,26
80	2,3	2,26	3,9	3,51	1,66	1,55	2,57
90	2,4	2,35	4,1	3,77	1,70	1,60	2,42
100	3,0	2,99	5,2	4,80	1,73	1,61	3,01
110	3,3	3,22	5,7	5,24	1,74	1,63	3,03
120	3,6	3,57	6,3	5,84	1,74	1,64	3,18