

А. Н. ОРОБИНСКИЙ

Украина, г. Харьков, Национальный научный центр «Институт метрологии»
E-mail: orobin@mail.ru

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКИХ УСТАНОВОК

Установлена взаимосвязь основных характеристик рентгеновских установок: средней энергии, напряжения на аноде, тока анода рентгеновской трубки, спектрального разрешения, толщины фильтров и их материалов. Разработан алгоритм расчета этих характеристик при известных значениях средней энергии и мощности кермы в воздухе с учетом спектрального разрешения с целью получения рентгеновского излучения заданного качества.

Ключевые слова: рентгеновская установка, рентгеновская трубка, рентгеновское излучение, напряжение на аноде, ток анода, спектральное разрешение, средняя энергия, мощность кермы в воздухе.

В медицине применяют терапевтические (для лечения заболеваний), диагностические (для выявления заболеваний, определения диагноза, при различных травмах и т. д.) и метрологические (для настройки, аттестации и поверки дозиметров рентгеновского излучения) рентгеновские установки (**РУ**), которые имеют строго заданные характеристики в зависимости от области применения [1]. Качество рентгеновского излучения (средняя энергия $\bar{E}$ и мощность кермы в воздухе K) определяются назначением РУ [2–4].

Поскольку процесс разработки и изготовления рентгеновской установки связан с радиационной опасностью для людей, время, необходимое для ее настройки и регулировки, а значит,

и доза облучения при их проведении зависят от точности расчетов РУ.

При разработке РУ с учетом области ее применения необходимо выбрать рентгеновскую трубку (**РТ**) и дополнительные фильтры (далее по тексту — фильтры), исходя из напряжения (U_a) и тока (I_a) анода РТ, материала фильтров и их толщины (d_i), т. е. рассчитать эти характеристики при заданном качестве рентгеновского излучения. В известной автору литературе решение данной задачи отсутствует.

В [5–7] выполнен расчет характеристик рентгеновского излучения: $\bar{E}$, коэффициента гомогенности (h), первого слоя половинного ослабления СПО1, второго слоя половинного

Таблица 1
Параметры излучения, применяемого в терапевтических и диагностических РУ [2–4]

Код качества излучения	Назначение	$\bar{E}$, кэВ	$\dot{K}$, мГр/ч*	Материал мишени РТ
RQR2 ... RQR10 [2]	Излучение на пациента при флюорографии	28,4–64,5	57,5–720,0	W
RQA2 ... RQR10 [2]	Излучение, ослабленное пациентом, при флюорографии	31,5–88,6	7,0–26,5	W
RQT8 ... RQT10 [2]	Излучение при томографии	58,2–74,3	136–295	W
RQR-M1 ... RQR-M4 [2]	Излучение на пациента при маммографии	16,1–18,1	108–266	Mo
RQA-M1 ... RQA-M4 [2]	Излучение, ослабленное пациентом, при маммографии	18,8–23,2	4,35–18,0	Mo
T7,5 ... T100 [3]	Излучение при рентгеновской терапии с низкой энергией	6,13–51,9	1410–4900	W
T120 ... T280 [4]	Излучение при рентгеновской терапии со средней энергией	59,5–147,7	295–495	W

* Значения $\dot{K}$ приведены для расстояния 1 м от фокуса РТ при токе анода 1 мА.

Таблица 2
Характеристики различных серий стандартного рентгеновского излучения метрологических РУ (мишень РТ – вольфрамовая) [8, табл. 2]

Серия	R_E , %	h	$\dot{K}$, мГр/ч**
L (с низким содержанием кермы в воздухе)	18–20	$h \rightarrow 1$	0,3
N (с узким спектром)	27–37	0,75–1,0	1–10
W (с широким спектром)	48–57	0,67–0,98	10–100
H (с высоким содержанием кермы в воздухе)	(57–115)*	0,64–0,86	10–5000

* Рассчитано в [5] (R_E не нормируется для серии H).

** Значения $\dot{K}$ приведены для расстояния 1 м от фокуса РТ при токе анода 1 мА.

ослабления СПО2 и спектрального разрешения (R_E) при заданных значениях U_a и d_i ; радиационного выхода H и $\dot{K}$ при заданном значении I_a .

Целью настоящей работы было установление взаимозависимости между основными характеристиками РУ, такими как средняя энергия, напряжение и ток анода рентгеновской трубки, спектральное разрешение, толщина и материал фильтров, для решения обратной задачи – расчета напряжения и тока анода РТ, а также толщины фильтров (выбрав их материал) при заданных значениях средней энергии и мощности кермы в воздухе на выходе РУ с учетом спектрального разрешения.

Параметры рентгеновского излучения в наиболее распространенных терапевтических и диагностических РУ приведены в табл. 1.

По классификации [8, табл. 3–7] стандартное рентгеновское излучение, которое применяется в метрологических РУ, подразделяется на серии в зависимости от содержания кермы в воздухе и ширины спектра (табл. 2).

Расчет напряжения на аноде рентгеновской трубки

Анализ характеристик стандартных спектров тормозного рентгеновского излучения, приведенных в [5, рис. 1–4], позволяет сделать вывод о том, что их форма близка к симметричной, т. е. коэффициент гомогенности $h \rightarrow 1$. Поэтому для расчета РУ представим спектр рентгеновского излучения при заданном значении R_E в виде параболы (рис. 1), описываемой выражением

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = -k(E - E_0)^2 + 1, \quad (1)$$

где E – энергия рентгеновского излучения;
 $\Phi_{\Sigma N}(E)$ – нормированный флюэнс рентгеновского излучения, $\Phi_{\Sigma N}(E) = \Phi(E) / \Phi(E_0)$;
 k – коэффициент параболы.

Как видно из рис. 1, $\Phi_{\Sigma N}(E) = 1$ при $E = E_0$; $\Phi_{\Sigma N}(E) = 0,5$ при $E = E_1$ и $E = E_2$.

Спектральное разрешение [5] представим в виде

$$R_E = (E_2 - E_1) / E_0,$$

откуда с учетом того, что $\Delta E = E_2 - E_1$ и $E_2 = E_0 + \Delta E / 2$ (см. рис. 1), найдем

$$E_1 = E_0(1 - 0,5R_E).$$

Таким образом, формула (1) при $E = E_1$ будет выглядеть следующим образом:

$$0,5 = -k(E_0(1 - 0,5R_E) - E_0)^2 + 1.$$

Отсюда, учитывая что $E_0 \approx \bar{E}$ [5, рис. 2, кривая при $U_a = 150$ кВ и табл. 2 ($\bar{E}$ при $U_a = 150$ кВ)], найдем

$$k = \frac{2}{(R_E \bar{E})^2}.$$

Теперь с учетом некоторых преобразований выражение (1) можем записать как

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = -2 \left(\frac{E - \bar{E}}{R_E \bar{E}} \right)^2 + 1. \quad (2)$$

При $\Phi_{\Sigma N}(E) = 0$ получим формулу для максимального и минимального значений энергии:

$$E_{\max}^{\min} = (1 \pm 0,7R_E) \bar{E}.$$

Поскольку $E_0 \approx \bar{E}$, а максимальная энергия рентгеновского излучения в кэВ численно равна напряжению на аноде РТ в кВ [9, с. 12] (т. е. $E_{\max, \text{кэВ}} = U_{a, \text{кВ}}$), можем из формулы для $E_{\max}$ найти среднюю энергию:

$$\bar{E} = \frac{U_a}{1 + 0,7R_E}. \quad (3)$$

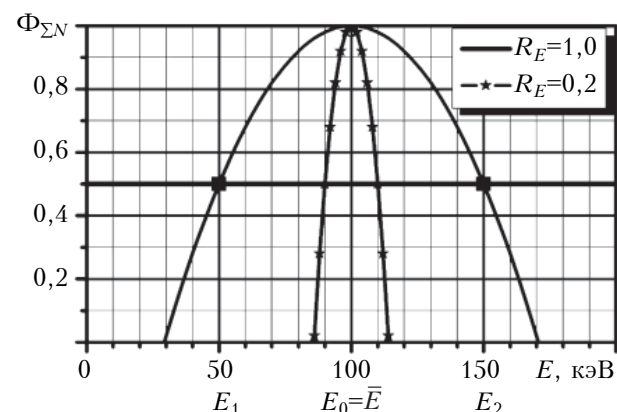


Рис. 1. Спектр рентгеновского излучения при различных значениях R_E

При изменении R_E от 0,18 до 1,15 (табл. 2) $\bar{E}$ находится в диапазоне $(0,90 - 0,55)U_a$.

Подставив формулу (3) в (2), окончательно получим

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = -2 \left(\frac{E(1 + 0,7R_E) - U_a}{R_E U_a} \right)^2 + 1,$$

откуда найдем

$$E_1 = \frac{1 \mp 0,5R_E}{1 + 0,7R_E} U_a. \quad (4)$$

Форма спектра тормозного рентгеновского излучения и его средняя энергия определяют-

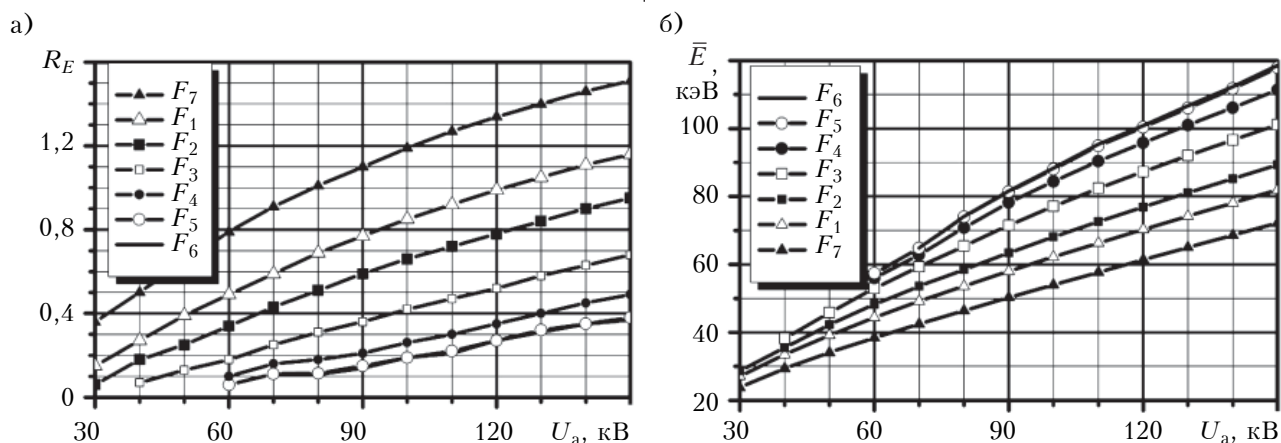


Рис. 2. Зависимости спектрального разрешения (а) и средней энергии (б) от напряжения на аноде, полученные для различных фильтров $F_1 \dots F_7$ (см. табл. 3)

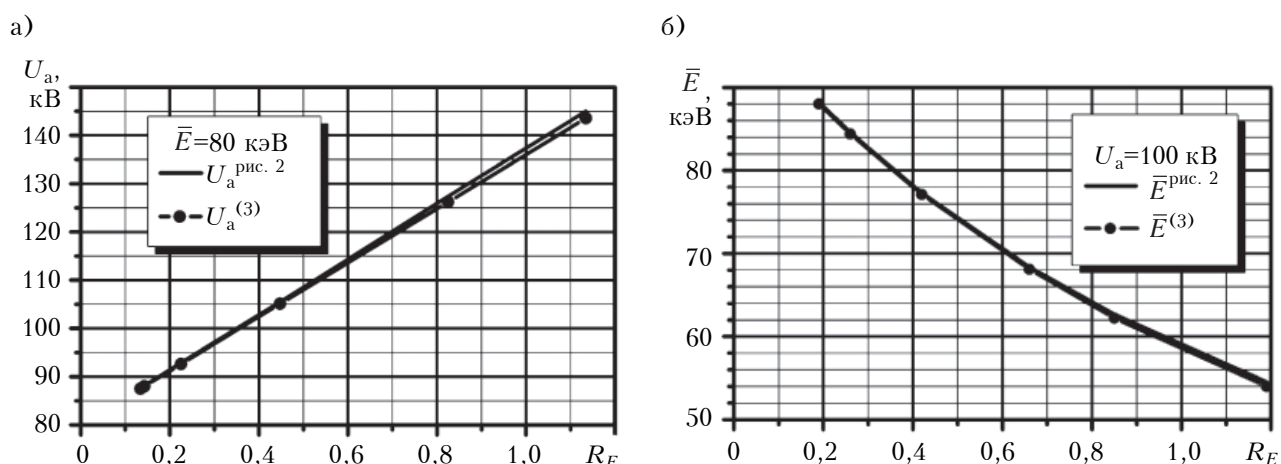


Рис. 3. Зависимости напряжения на аноде при $\bar{E}=80$ кэВ (а) и средней энергии при $U_a=100$ кВ (б) от спектрального разрешения, построенные по формуле (3) ($U_a^{(3)}$, $\bar{E}^{(3)}$) и на основании данных рис. 2 ($U_{a \text{ рис. 2}}$, $\bar{E}_{\text{рис. 2}}$)

Таблица 3

Значения энергии и напряжения на аноде РУ PANTAK HF160

Режим работы*	Фильтр (F)	$\bar{E}$, кэВ [8]	R_E [8]	E_1 , кэВ	E_2 , кэВ	U_{a0} , кВ [8]	U_{ap} , кВ	δU_{ap} , %
Q_7	3,0Al (F_7)	24	0,32	20,6	28,3	30	29,4	2,0
Q_1	0,21Cu+4,0Al** (F_1)	33	0,30	28,1	38,0	40	39,9	0,3
Q_2	0,6Cu+4,0Al** (F_2)	48	0,36	39,3	56,6	60	60,1	0,2
Q_3	2,0Cu+4,0Al** (F_3)	65	0,32	54,9	75,8	80	79,6	0,5
Q_4	5,0Cu+4,0Al** (F_4)	83	0,28	71,9	95,3	100	99,3	0,7
Q_5	1,0Sn+5,0Cu+4,0Al** (F_5)	100	0,27	87,3	114,6	120	118,9	0,9
Q_6	2,5Sn+4,0Al** (F_6)	118	0,37	97,1	141,2	150	148,6	0,9

* Режим работы РУ определяется напряжением на аноде РТ и фильтрами [1, табл. 2].

** Здесь и далее указана толщина фильтра в мм.

*** 4,0Al — собственная фильтрация.

ся напряжением на аноде РТ и спектральным разрешением.

В табл. 3 приведены значения E_1 и E_2 , рассчитанные по формуле (4), значения напряжения на аноде U_{ap} , рассчитанные из (3), а также данные из [8, табл. 1] для рентгеновской установки PANTAK HF160 (серия N).

Из табл. 3 видно, что отклонение δU_{ap} рассчитанных значений напряжения на аноде U_{ap} от значений U_{a0} , приведенных в [8], не превышает 2%.

Для оценки взаимовлияния U_a , $\bar{E}$ и R_E на рис. 2 приведены рассчитанные методом, описанным в [5], зависимости спектрального разрешения и средней энергии от напряжения на аноде РТ для различных фильтров для установки PANTAK HF160.

На рис. 3 приведены зависимости напряжения на аноде и средней энергии от спектрального разрешения, построенные по формуле (3) — $U_a^{(3)}$, $\bar{E}^{(3)}$ и по данным рис. 2 — $U_a^{\text{рис.2}}$, $\bar{E}^{\text{рис.2}}$. Здесь видно, что значения искомых величин, полученные двумя этими способами, отличаются между собой не более чем на 1%, а значит, определять напряжение на аноде РТ и спектральное разрешение можно из формулы (3), что намного проще, чем рассчитывать методом, приведенным в [5].

Радиационный выход

Одной из характеристик РУ является радиационный выход [7]

$$H(U_a) = \dot{K}(U_a) R^2 / I_a,$$

где R — расстояние между фокусом РТ и точкой, в которой измерена $\dot{K}$.

Из этой формулы следует, что $\dot{K}$ линейно зависит от тока анода РТ при заданном фильтре и постоянных значениях U_a и R , поскольку в таком случае $H = \text{const}$.

Экспериментальные зависимости мощности кермы от тока анода РУ PANTAK HF160 (серия N) приведены на рис. 4.

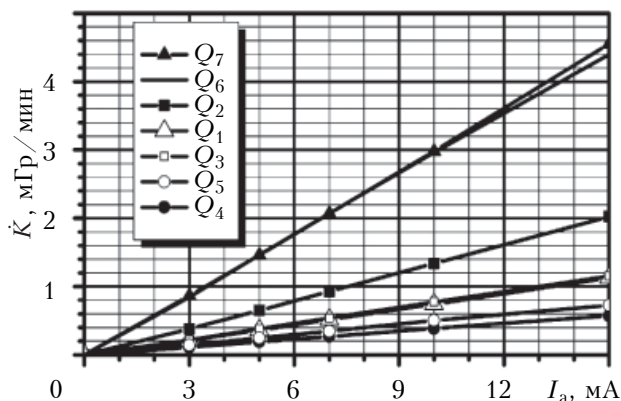


Рис. 4. Зависимости мощности кермы воздуха от тока анода при различных режимах работы РУ $Q_1 \dots Q_7$ (см. табл. 3)

Мощность кермы в воздухе рентгеновского излучения представим в виде

$$\dot{K}(E) = E \mu_{km}^{\text{возд}}(E) \frac{\Phi(E)}{t}, \quad (5)$$

где $\mu_{km}^{\text{возд}}(E)$ — массовый коэффициент ослабления излучения воздухом, $\mu_{km}^{\text{возд}}(E) = \frac{\mu_k^{\text{возд}}(E)}{\rho^{\text{возд}}}$;

$\mu_k^{\text{возд}}(E)$ — линейный коэффициент ослабления излучения воздухом;

$\rho^{\text{возд}}$ — плотность воздуха;

t — время.

В [5] получено выражение для определения суммарного нормированного флюэнса рентгеновского излучения при $E \geq 12$ кэВ

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = \frac{U_a - E}{300} \exp\left(-\sum_{i=1}^n d_i \mu_i(E)\right) \times \exp\left(-\sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E)\right),$$

где d — толщина фильтра;

$\mu(E)$ — линейный коэффициент ослабления излучения материалом фильтра;

n, m — количество фильтров.

Первый экспоненциальный множитель в этой формуле учитывает ослабление рентгеновского излучения при прохождении через n дополнительных фильтров, второй — при прохождении через m фильтров собственной фильтрации РУ. Обозначим их произведение как K_{np} — коэффициент пропускания фильтров и перепишем формулу для флюэнса в виде

$$\Phi_{\Sigma N}(E) = K_{np} \frac{U_a - E}{300}. \quad (6)$$

Подставив формулу (6) в (5), получим

$$\dot{K}_{\Sigma N}(E) = K_{np} \frac{E \mu_{km}^{\text{возд}}(E)}{t} \frac{U_a - E}{300}.$$

С учетом этого выражения и формулы (6) нормированное значение радиационного выхода представим в виде

$$H_N = \frac{1}{E_{\max}} \int_0^{E_{\max}} \dot{K}_{\Sigma N}(E) dE = \frac{1}{U_a} \int_0^{U_a} K_{np} E \mu_{km}^{\text{возд}}(E) (U_a - E) dE. \quad (7)$$

С использованием этой формулы и методики расчета, предложенной в [5], с учетом выражения $U_a = (1 + 0,7 R_E) \bar{E}$ (следует из формулы (3)), были построены зависимости H_N от спектрального разрешения, полученные при $\bar{E} = \text{const}$ и при $U_a = \text{const}$, при этом I_a, R были постоянными.

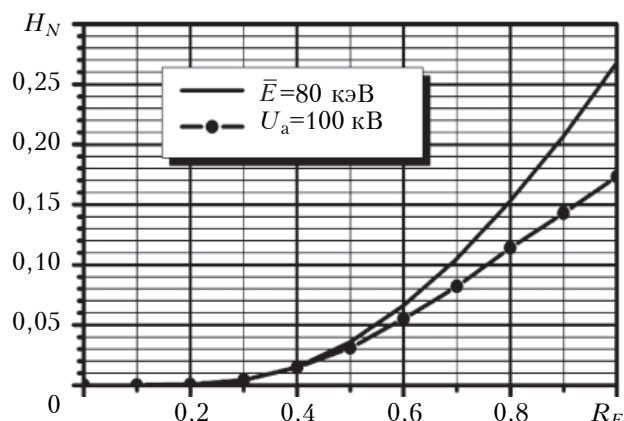


Рис. 5. Зависимости нормированного значения радиационного выхода от спектрального разрешения, полученные для $\bar{E}=80$ кэВ и для $U_a=100$ кВ

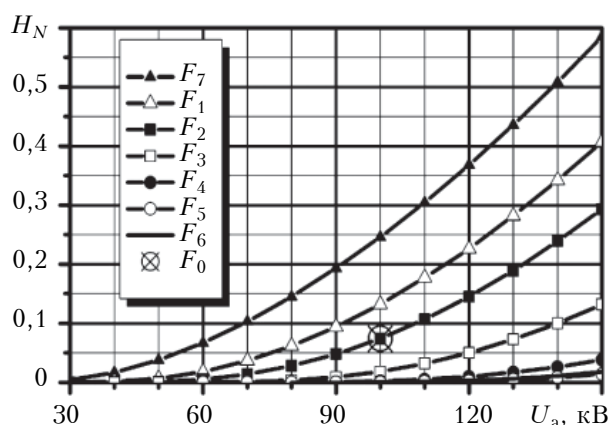


Рис. 6. Зависимости нормированного значения радиационного выхода от напряжения на аноде, полученные для различных фильтров

Как видно из **рис. 5**, с увеличением R_E значение H_N увеличивается, при этом растет и мощность кермы в воздухе. Это связано с тем, что с ростом R_E увеличивается U_a при $\bar{E}=\text{const}$ (рис. 3, а), а средняя энергия уменьшается при $U_a=\text{const}$ (рис. 3, б), что приводит к уменьшению толщины фильтра и в результате — к росту коэффициента пропускания.

В [7] было показано, что по нормированному значению радиационного выхода, можно рассчитать мощность дозы РУ при заданных значениях напряжения на аноде в диапазоне изменения тока анода РТ.

Рассчитать ток анода от минимального его значения до максимального: $I_{a \min}, \dots, I_{a \max}$ при известных значениях $\dot{K}_{\min}, \dots, \dot{K}_{\max}$ можно по следующему алгоритму:

— построить для разрабатываемой РУ зависимости нормированного значения радиационного выхода от напряжения на аноде при его изменении от $U_{a \min}$ до $U_{a \max}$ для различных фильтров (**рис. 6**);

— для выбранной рентгеновской трубки рассчитать H_{N0} на основании приведенных в техни-

ческой документации данных: F_0, U_{a0}, I_{a0} и $\dot{K}$ (точка $\otimes$ на рис. 6);

— рассчитать значения анодного тока для разрабатываемой РУ при различных значениях мощности кермы в воздухе от $\dot{K}_{\min}$ до $\dot{K}_{\max}$ по формуле

$$I_{ai} = I_{a0} \frac{H_{N0}}{H_{Ni}} \frac{\dot{K}_i}{\dot{K}_0}.$$

Выбор материала фильтра и расчет его толщины

Прежде чем перейти к рассмотрению данного вопроса, необходимо сделать три замечания.

1) Как правило, количество дополнительных фильтров — не более трех: $n \leq 3$ ($i=1, 2, 3$); фильтров собственной фильтрации — не более двух: $m \leq 2$ ($j=1, 2$) [8, табл. 3–6].

2) Количество фильтров собственной фильтрации, их материал и толщина известны априорно. Так, например, для РТ серии N собственная фильтрация составляет 1,0Ве.

С целью уменьшения флуоресцентного излучения фильтров при всех значениях энергии, за исключением 8, 12, 16, 20 и 24 кэВ, устанавливают фильтр 4,0Al (см. табл. 3), причем этот фильтр располагают после всех фильтров (далее от фокуса РТ) [8, п. 4.2.3].

3) Рекомендуемые материалы фильтров РУ приведены в **табл. 4, 5**.

Согласно рис. 1, $\Phi_{\Sigma N}(E_1) = \Phi_{\Sigma N}(E_2)$ или же $K_{np}(U_a - E_1) = K_{np}(U_a - E_2)$. С учетом того, что

$$K_{np} = \exp \left(- \sum_{i=1}^n d_i \mu_i(E) \right) \times \exp \left(- \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E) \right), \quad (8)$$

найдем

$$\sum_{i=1}^n d_i \mu_i(E_1) - \sum_{i=1}^n d_i \mu_i(E_2) = \ln \frac{U_a - E_1}{U_a - E_2} - \Psi_j, \quad (9)$$

$$\text{где } \Psi_j = \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E_1) - \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E_2).$$

Таблица 4

Рекомендуемые материалы фильтров терапевтических и диагностических РУ [2–4]

Качество излучения	Материал фильтра
RQR	Al
RQA	Al
RQT	Al, Cu
RQR-M	0,03Mo
RQA-M	0,03Mo+2Al
T7,5 ... T100	Al
T120 ... T280	Al, Cu

Таблица 5
Рекомендуемые материалы фильтров метрологических РУ [8]

Серия излучения	Энергия, кэВ	Материал фильтра
L	10–20	Al
	20–70	Al, Cu
	70–125	Cu, Sn
	125–240	Cu, Sn, Pb
N	10–30	Al
	30–100	Cu
	100–150	Cu, Sn
	150–300	Cu, Sn, Pb
W	60–110	Cu
	110–300	Sn
H	10–60	Al
	70–125	Al, Cu

Подставив формулу (4) в (9) и выполнив математические преобразования, получим

$$d_1[\mu_1(E_1) - \mu_1(E_2)] + \dots + d_n[\mu_n(E_1) - \mu_n(E_2)] = 1,8 - \Psi_j. \quad (10)$$

В случае если применяется один фильтр, получим

$$d = \frac{1,8 - \Psi_j}{\mu(E_1) - \mu(E_2)}. \quad (11)$$

Далее найдем выражения для случая, когда применяют два фильтра.

Предположив, что $\Phi_{\Sigma N \max}(\bar{E}) = \text{const}$, представим выражение (6) в виде

$$K_{\text{пр}}(U_a - \bar{E}) = \text{const}.$$

Проведя математические преобразования с учетом (8), получим

$$d_1 \mu_1(\bar{E}) + \dots + d_n \mu_n(\bar{E}) = \ln(0,7R_E \bar{E}) - \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(\bar{E}). \quad (12)$$

На основании выражений (10) и (12) запишем систему уравнений, из которой можно определить толщину каждого из двух фильтров:

$$\begin{cases} k_1 d_1 + k_2 d_2 = A, \\ k_3 d_1 + k_4 d_2 = B, \end{cases}$$

$$\text{где } k_1 = \mu_1(\bar{E}); k_2 = \mu_2(\bar{E}); k_3 = \mu_1(E_1) - \mu_1(E_2); k_4 = \mu_2(E_1) - \mu_2(E_2); A = \ln(0,7R_E \bar{E}) - \sum_j d_j \mu_j(\bar{E}); B = 1,8 - \Psi_j.$$

Решение полученной системы уравнений представим в виде формул Крамера

$$d_1 = D_1/D; d_2 = D_2/D, \quad (13)$$

где определители D, D_1, D_2 имеют следующий вид:

$$D = \begin{vmatrix} k_1 & k_2 \\ k_3 & k_4 \end{vmatrix}; D_1 = \begin{vmatrix} A & k_2 \\ B & k_4 \end{vmatrix}; D_2 = \begin{vmatrix} k_1 & A \\ k_3 & B \end{vmatrix}.$$

Для случая когда применяют три фильтра, добавим условие $\Phi_{\Sigma N \max}(E_1) = 0,5 \Phi_{\Sigma N \max}(\bar{E})$, откуда с учетом формул (3) и (4) найдем

$$d_1[\mu_1(E_1) - \mu_1(\bar{E})] + \dots + d_n[\mu_n(E_1) - \mu_n(\bar{E})] = 1,2 - \tilde{\Psi}_j, \quad (14)$$

$$\text{где } \tilde{\Psi}_j = \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(E_1) - \sum_{j=1}^m d_j \mu_j(\bar{E}).$$

Толщину каждого из трех фильтров определим из системы уравнений, полученной из выражений (10), (12) и (14):

$$\begin{cases} k_1 d_1 + k_2 d_2 + k_3 d_3 = A, \\ k_3 d_1 + k_4 d_2 + k_6 d_3 = B, \\ k_7 d_1 + k_8 d_2 + k_9 d_3 = C, \end{cases}$$

где $C = 1,2 - \Psi_j$; $k_5 = \mu_3(\bar{E})$;

$$k_6 = \mu_3(E_1) - \mu_3(E_2); k_7 = \mu_1(E_1) - \mu_1(\bar{E});$$

$$k_8 = \mu_2(E_1) - \mu_2(\bar{E}); k_9 = \mu_3(E_1) - \mu_3(\bar{E}).$$

Решение системы представим в виде формул Крамера

$$d_1 = D_1/D; d_2 = D_2/D; d_3 = D_3/D, \quad (15)$$

$$\text{где } D = \begin{vmatrix} k_1 & k_2 & k_5 \\ k_3 & k_4 & k_6 \\ k_7 & k_8 & k_9 \end{vmatrix}; D_1 = \begin{vmatrix} A & k_2 & k_5 \\ B & k_4 & k_6 \\ C & k_8 & k_9 \end{vmatrix};$$

$$D_2 = \begin{vmatrix} k_1 & A & k_5 \\ k_3 & B & k_6 \\ k_7 & C & k_9 \end{vmatrix}; D_3 = \begin{vmatrix} k_1 & k_2 & A \\ k_3 & k_4 & B \\ k_7 & k_8 & C \end{vmatrix}.$$

В табл. 6 приведены значения толщины фильтра, рассчитанные по формуле (11) для всех режимов работы РУ PANTAK HF160 (см. табл. 3) при использовании одного фильтра. Кроме того, для режима Q5 расчеты проводились по формуле (13) для случая использования двух фильтров. Значения $\bar{E}$ и h рассчитаны в соответствии с [5], $\mu(E_i)$ взяты из [10, с. 226, 234, 246].

Из табл. 6 видно, что:

– отклонение $\bar{E}$ от $\bar{E}_0$ ($\delta E = (\bar{E} - \bar{E}_0)/\bar{E}_0$) при рассчитанной толщине фильтра не превышает 2%;

– коэффициент гомогенности находится в диапазоне $0,9 \leq h < 1$;

– при $R_E = \text{const}$ и $\bar{E} = \text{const}$ (режим Q5) при разных фильтрах значения H_N , а значит, и мощности кермы в воздухе различны, поскольку значения коэффициента пропускания $K_{\text{пр}}$ тоже разные.

На основании вышеизложенного можно установить, каким образом связаны между собой основные характеристики рентгеновских установок (рис. 7).

1. Назначение рентгеновских установок определяет качество рентгеновского излучения — среднюю энергию $\bar{E}$ и мощность кермы в воздухе рентгеновского излучения $\dot{K}$ (табл. 1).

2. Средняя энергия определяется напряжением на аноде рентгеновской трубки U_a и

спектральным разрешением R_E (см. формулу (3)).

3. Мощность кермы в воздухе определяется напряжением на аноде (см. рис. 6), током анода рентгеновской трубки (зависимость — линейная, см. рис. 4), спектральным разрешением (см. рис. 5), толщиной фильтров и их материалами. Фильтры определяют коэффициент пропускания. Меняя фильтры при постоянных R_E и $\bar{E}$, можно изменять $\dot{K}$.

Таблица 6

Толщина фильтров и характеристики РУ PANTAK HF160 для различных режимов работы

Режим работы	$\mu(E_1)$, см ⁻¹ [9]	$\mu(E_2)$, см ⁻¹ [9]	d , мм	$K_{пр}$	H_N , 10 ⁻⁴	$\bar{E}$, кэВ	h [5]	$\bar{E}_0$, кэВ [8]	$\delta\bar{E}$, %
Q_7	8,81	3,97	3,63Al	—	4,820	24,2	0,91	24	0,8
Q_1	135,8	53,8	0,1Cu	—	9,052	32,4	0,94	33	-1,8
Q_2	46,95	17,31	0,5Cu	—	17,93	47,5	0,90	48	-1,0
Q_3	18,79	8,33	1,61Cu	—	13,79	64,1	0,93	65	-1,4
Q_4	9,78	4,7	3,42Cu	—	12,03	81,5	0,94	83	-1,8
Q_5	18,39	9,86	2,1Sn	0,079	8,601	99,4	0,96	100	-0,6
	—	—	1,37Sn+2,7Cu	0,064	6,93	99,5	0,97		-0,5
	5,79	3,45	7,55Cu	0,047	5,098	99,3	0,96		-0,7
Q_6	13,54	5,77	2,27Sn	—	33,6	117,4	0,95	118	-0,5

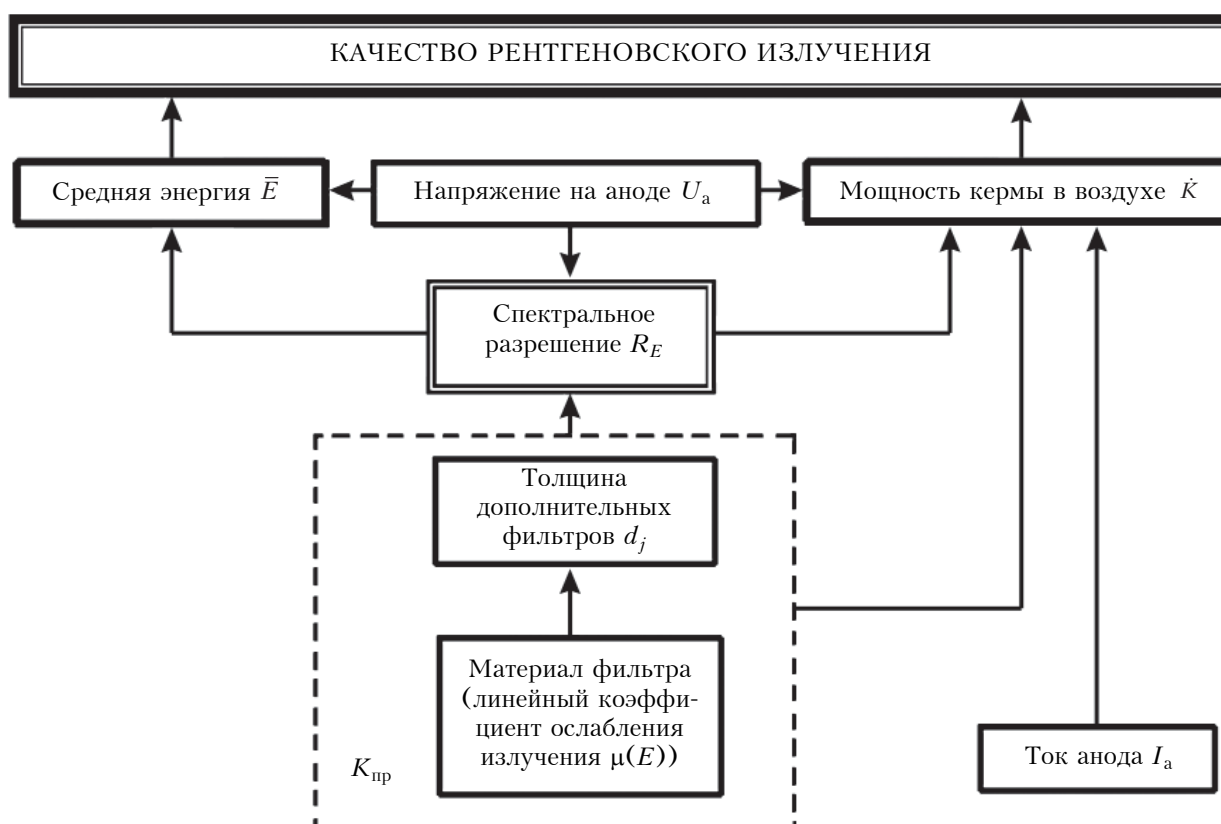


Рис. 7. Взаимозависимость между основными характеристиками рентгеновских установок

4. Спектральное разрешение определяется напряжением на аноде рентгеновской трубки, толщиной фильтров и их материалами.

5. Толщина фильтра определяется его материалом (линейным коэффициентом ослабления рентгеновского излучения).

Алгоритм расчета характеристик рентгеновских установок

1. В зависимости от назначения РУ определить:

- $\bar{E}$ или диапазон $\bar{E}$: $\bar{E}_{\min}, \dots, \bar{E}_i, \dots, \bar{E}_{\max}$;
- $\bar{K}$ или диапазон $\bar{K}$: $\bar{K}_{\min}, \dots, \bar{K}_i, \dots, \bar{K}_{\max}$.

2. В зависимости от $\bar{K}$ определить R_E (табл. 2).

3. По формуле (3) рассчитать U_a или диапазон U_a : $U_{a\min}, \dots, U_{ai}, \dots, U_{a\max}$.

4. Выбрать материал фильтров. По формулам (11), (13) или (15) рассчитать их толщину.

5. Вычислить $\bar{E}$ [5].

6. Вычислить h [5] и оценить погрешность расчета $\bar{E}$: если $0,9 \leq h < 1$, то $\delta \bar{E} < 3\%$ [1]; если $0,8 \leq h < 0,9$, то $\delta \bar{E} < 15\%$ [5].

7. Выбрать рентгеновскую трубку с требуемыми напряжением $U_{a\min}, \dots, U_{a\max}$ и материалом мишени, в технической документации на которую приведено: $I_{a0\min}, \dots, I_{a0\max}$; $\bar{E}$ при U_{a0} и фильтре F_0 ; $\bar{K}$ при I_{a0} .

Следует отметить, что основной характеристикой при выборе РТ является напряжение на аноде, поскольку мощность кермы в воздухе, как правило, приводится при токе $I_a = 1$ мА (табл. 1, 2), который обеспечивают рассматриваемые в статье РУ.

Ток анода можно рассчитать по алгоритму, приведенному выше в разделе «Радиационный выход».

В заключение необходимо отметить, что окончательно определить характеристики рентгеновских установок и их погрешность можно только экспериментальным путем при измерениях.

Выводы

Таким образом, установленная взаимозависимость между основными характеристиками рент-

геновских установок позволила при значениях коэффициента гомогенности от 0,8 до 1 разработать простой алгоритм их расчета, позволяющего выбрать рентгеновскую трубку и фильтры, обеспечивающие рентгеновское излучение заданного качества.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Душкин С. А., Иванский В. Б., Куров А. М. и др. Погрешности при измерении характеристик рентгеновских установок // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2011. — № 3. — С. 44–49.

2. IEC 61267:2005-11. Medical diagnostic X-ray equipment. Radiation conditions for use in the determination of characteristics.

3. DIN 6809-4:1987-04. Clinical dosimetry. Applications of X-rays with peak voltages between 10 and 100 kV in radiotherapy and soft tissue diagnostics.

4. DIN 6809-5:1996-02. Clinical dosimetry. Part 5: Application of X-rays with peak voltages between 100 and 400 kV in radiotherapy.

5. Душкин С. А., Куров А. М., Одинец В. А., Оробинский А. Н. Расчет характеристик рентгеновского излучения // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. — 2008. — № 6. — С. 60–64.

6. Душкин С. А., Куров А. М., Одинец В. А., Оробинский А. Н. Исследования метрологических характеристик установки рентгеновской типа PANTAK HF160 // Тр. VI Межд. научн.-техн. конф. «Метрология и измерительная техника». Т. II. — Харьков. — 2008. — С. 261–265.

7. Душкин С. А., Куров А. М., Одинец В. А., Оробинский А. Н. Радиационный выход рентгеновской установки // Тр. VII Межд. научн.-техн. конф. «Метрологія та вимірювальна техніка». Т. II. — Харьков. — 2010. — С. 253–257.

8. ДСТУ ISO 4037-1:2006. Стандартні рентгенівські та гамма-випромінювання для калібрування дозиметрів і вимірювачів потужності дози та для визначення їх чутливості в залежності від енергії фотонів. Ч. 1. Характеристики випромінень та методи, що їх створюють.

9. Рентгеновские лучи: справочник / Под ред. М.А. Блохина. — Москва: Изд-во иностранной литературы, 1960.

10. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. — Киев: Наукова думка, 1975.

Дата поступления рукописи
в редакцию 19.06 2015 г.

А. М. ОРОБІНСЬКИЙ

Україна, м. Харків, Національний науковий центр «Інститут метрології»

E-mail: orobin@mail.ru

РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНІВСЬКИХ УСТАНОВОК

Встановлено взаємозалежність основних характеристик рентгенівських установок: середньої енергії, напруги на аноді, тока анода рентгенівської трубки, спектрального розподілення, товщини фільтрів та їх матеріалів. Розроблено алгоритм розрахунку цих характеристик за відомими значеннями середньої енергії та потужності керми у повітрі з урахуванням спектральні роздільної здатності для отримання рентгенівського випромінювання заданої якості.

Ключові слова: рентгенівська установка, рентгенівська трубка, рентгенівське випромінювання, напруга на аноді, струм анода, спектральна роздільна здатність, середня енергія, потужність керми у повітрі.

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF X-RAY DEVICES

Actuality of this work is related to human radiation safety during tuning and regulation of X-ray devices in the process of their development and production. The more precise the calculations for the device are, the less time is required for its tuning and regulation, and thus people are less exposed to radiation. When developing an X-ray device, it is necessary to choose an X-ray tube and filters taking into account the application domain of the device. In order to do this, one should know anode voltage, X-ray tube anode current, material and thickness of filters, i.e. to calculate these characteristics at the set quality of X-ray radiation. The known published studies do not give any solution to this problem.

The scientific novelty of this work is that it establishes the interdependence between main characteristics of the X-ray device: the function of the device defines the quality of X-ray radiation (mean photon energy and air kerma power); mean photon energy depends on the X-ray anode tube voltage and spectral resolution; air kerma power depends on anode tube voltage, current of X-ray tube anode, spectral resolution, thicknesses of the filters and their materials; spectral resolution depends on thicknesses of filters and their materials; thickness of filters depends on the material of the filter (the linear coefficient of weakening of X-ray radiation). Knowledge of interdependence of basic characteristics of the X-ray devices allows developing simple algorithm for their calculation at the values of homogeneity coefficient from 0,8 to 1, which makes it possible to choose an X-ray tube and filters with the purpose of obtaining X-ray radiation of the set quality.

Keywords: X-ray device, X-ray tube, X-ray radiation, anode voltage, anode current, spectral resolution, mean photon energy, air kerma power.

REFERENCES

1. Dushkin S.A., Ivanskyi V.B., Kurov A.M., Odinets V.A., Orobinskyi A.N. The measurement errors of X-ray devices features. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2011, no. 3, pp. 44-46. (Rus)
2. IEC 61267:2005-11. Medical diagnostic X-ray equipment. Radiation conditions for use in the determination of characteristics.
3. DIN 6809-4:1987-04. Clinical dosimetry. Applications of X-rays with peak voltages between 10 and 100 kV in radiotherapy and soft tissue diagnostics.
4. DIN 6809-5:1996-02. Clinical dosimetry. Part 5: Application of X-rays with peak voltages between 100 and 400 kV in radiotherapy.
5. Dushkin S.A., Kurov A.M., Odinets V.A., Orobinskyi A.N. The calculation of features of X-ray radiation. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoi apparature*, 2008, no. 6, pp. 60-64. (Rus)
6. Dushkin S.A., Kurov A.M., Odinets V.A., Orobinskyi A.N. [Researches of metrology features of X-ray device type of PANTAK HF160]. *Proc. of the 6th Int. sc.-tech. conf. "Metrology and measuring technique"*, vol. II, Kharkov, 2008, pp. 261-265. (Rus)
7. Dushkin S.A., Kurov A.M., Odinets V.A., Orobinskyi A.N. [Radiation output of X-ray device]. *Proc. of the 7th Int. sc.-tech. conf. "Metrology and measuring technique"*, vol. II, Kharkov, 2010, pp. 253-257. (Rus)
8. DSTU ISO 4037-1:2006. Standartne rentgenivske ta gamma-vyprominennya dlya kalibruvannya dozymetriv i vymiryuvachiv potuzhnosti dozy ta dlya vyznachennya iikh chutlyvosti v zalezhnosti vid energiii fotoniv. Ch. 1. Kharakterystyky vyprominen' ta metody, shcho iikh stvo-ryuyut' [State Standard ISO 4037-1:2006, part 1]. (Rus)
9. [X-rays: Reference book]. Ed. by M.A. Blohin, Moscow, Izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1960. (Rus)
10. Nemec O.F., Gofman Y.V. *Reference book on nuclear physics*. Kiev, Naukova dumka, 1975. (Rus)