С. А. ДУШКИН, В. Б. ИВАНСКИЙ, А. М. КУРОВ[1], В. А. ОДИНЕЦ, к. ф.-м. н. А. Н. ОРОБИНСКИЙ

Украина, г. Харьков, ННЦ «Институт метрологии»,
[1]Институт медицинской радиологии им. С. П. Григорьева АМНУ
E-mail: orobin@mail.ru, imr@online.kharkiv.net

Дата поступления в редакцию
02.04 2010 г. — 21.03 2011 г.

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

ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ХАРАКТЕРИСТИК РЕНТГЕНОВСКИХ УСТАНОВОК

Рассчитаны погрешности при измерении средней энергии, коэффициента гомогенности, первого и второго слоя половинного ослабления рентгеновских установок. Проведено сравнение погрешностей с требованиями стандартов.

Рентгеновские установки (**РУ**) в медицинских учреждениях подразделяются на терапевтические — для лечения заболеваний; диагностические — для выявления заболеваний, обследования при различных травмах и т. д.; метрологические — для настройки, аттестации и поверки дозиметров рентгеновского излучения.

Основными характеристиками РУ являются средняя энергия рентгеновского излучения, коэффициент гомогенности, первый слой половинного ослабления (**СПО1**) и второй слой половинного ослабления (**СПО2**) [1]. В каждой области применения РУ имеют свои особенности.

Терапевтические и диагностические РУ работают при известной средней энергии, коэффициенте гомогенности и мощности дозы (**МД**) рентгеновского излучения (здесь под дозой понимают индивидуальный эквивалент дозы $H_p(0{,}07)$ и поглощенную дозу в воде D_w), причем для лечения и диагностики разных частей тела человека выбирают соответствующую среднюю энергию, коэффициент гомогенности и МД.

Метрологические РУ работают в заданных диапазонах средних энергий, коэффициентов гомогенности и МД (здесь под дозой понимают $H_p(0{,}07)$, D_w, экспозиционную дозу X, амбиентный эквивалент дозы $H^*(0{,}07)$ и керму в воздухе K).

Для обеспечения радиационной безопасности людей при их лечении и диагностике рентгеновские установки должны иметь строго заданные характеристики в зависимости от области применения, поскольку какие-либо отклонения могут привести или к переоблучению человека, вызывающему лучевые поражения, или к недооблучению, что приводит к рецидивам онкологических заболеваний.

Метрологические РУ должны иметь характеристики, обеспечивающие заданные диапазоны средней энергии, коэффициента гомогенности и мощности доз для настройки, аттестации и поверки дозиметров рентгеновского излучения, с помощью которых измеряют дозы рентгеновского излучения, необходимые для лечения и диагностики, и проводится дозиметрический контроль пациентов и медицинского персонала.

Поэтому при конструировании и производстве РУ необходимо измерять МД, СПО1, который определяет среднюю энергию, и СПО2, который совместно с СПО1 определяет коэффициент гомогенности.

Для измерения МД в настоящее время применяют высокоточные дозиметры рентгеновского излучения, например PTW-UNIDOS.

Измерению характеристик рентгеновского излучения посвящен ряд работ. Например, в [2, с. 8] выполнены измерения СПО1 для одной энергии с погрешностью менее 10%, в [3, с. 263 —265] — расчет и измерения характеристик РУ PANTAK HF160: средней энергии, коэффициента гомогенности, СПО1 и СПО2; в [4, с. 13] приведены результаты измерений СПО1 РУ PANTAK HF160. В [3, 4] получено соответствие характеристик РУ PANTAK HF160 требованиям, приведенным в [5, табл. 4]. Однако в литературе отсутствует анализ составляющих погрешностей измерений и не приведены выражения для их расчета.

В настоящей работе определены выражения для расчета погрешностей при измерении средней энергии рентгеновского излучения, коэффициента гомогенности, СПО1 и СПО2.

Погрешности при измерении СПО1 и $d_{1/4}$

Среднюю энергию, коэффициент гомогенности, СПО1 и СПО2 можно измерить при помощи дозиметра рентгеновского излучения [5, с. 18].

Процесс измерения включает в себя два этапа — сначала проводят прямые измерения МД или кермы в воздухе (K) рентгеновского излучения при различных дополнительных фильтрах из алюминия или меди, затем выполняют обработку результатов измерений: строят зависимость $K=f(d_ф)$ или $K/K_0=f(d_ф)$ (K_0 — керма в воздухе до фильтра; $d_ф$ — толщина дополнительного фильтра), по которой определяют толщину $d_{1/2}$=СПО1 при $K=0{,}5K_0$ и $d_{1/4}$ при $K=0{,}25K_0$; вычисляют СПО2=$d_{1/4}-d_{1/2}$ и коэффициент гомогенности h=СПО1/СПО2. Среднюю энергию $\bar{E}$ определяют по зависимости $\bar{E} = f(d_{1/2\mathrm{Al,Cu}})$, где $d_{1/2\mathrm{Al,Cu}}$ — табулированные значения СПО для Al и Cu.

Абсолютная погрешность при определении СПО1 ($d_{1/2}$) и $d_{1/4}$ определяется следующими погрешностями:

— погрешностью при измерении кермы в воздухе рентгеновского излучения — $\Delta_K d_{1/2}$ и $\Delta_K d_{1/4}$;

— погрешностью установки напряжения на аноде рентгеновской трубки — $\Delta_U d_{1/2}$ и $\Delta_U d_{1/4}$;

— погрешностью, связанной с нестабильностью напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки, — $\Delta_н d_{1/2}$ и $\Delta_н d_{1/4}$;

— погрешностью аппроксимации зависимости $K/K_0=f(d_ф)$ — $\Delta_а d_{1/2}$ и $\Delta_а d_{1/4}$;

— погрешностями при измерении толщины d_i дополнительных фильтров, необходимых для измерения СПО1 и $d_{1/4}$, — $\Delta_- d_{1/2}$, $\Delta_+ d_{1/2}$, $\Delta_- d_{1/4}$ и $\Delta_+ d_{1/4}$ (как правило, $\Delta_- d_{1/2} = \Delta_+ d_{1/2} = \Delta_- d_{1/4} = \Delta_+ d_{1/4} = \Delta_ф$).

Для измерения СПО1 и $d_{1/4}$ применяют четыре дополнительных фильтра (СПО1 — d_1 и d_2; $d_{1/4}$ — d_3 и d_4). В ситуациях когда отсутствуют фильтры заданной толщины, каждый из четырех фильтров может быть составлен из нескольких фильтров. Тогда при построении зависимости $K/K_0=f(d_ф)$ используют значения d_1, d_2, d_3 и d_4, а при расчете погрешностей необходимо учитывать погрешности при измерении толщины каждого фильтра.

При суммировании погрешностей считаем, что они изменяются нерегулярным образом, оставаясь в границах допускаемой основной погрешности, поэтому их можно считать условно постоянными. Для суммирования погрешностей применяем квазистатистический метод [6, с. 71—72].

Суммарную абсолютную погрешность при измерении СПО1 представим в виде

$$\Delta d_{1/2} = \Delta\text{СПО1} = k\left(\left(\Delta_K d_{1/2}\right)^2 + \left(\Delta_U d_{1/2}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + \left(\Delta_н d_{1/2}\right)^2 + \left(\Delta_а d_{1/2}\right)^2 + m_{1/2}\left(\Delta_ф\right)^2\right)^{1/2}, \qquad (1)$$

где k — коэффициент, который зависит от доверительной вероятности P, k =1,1 при P = 0,95 [7, раздел 4];

$m_{1/2}$ — количество фильтров, необходимых для измерения СПО1.

Разделив (1) на $d_{1/2}$, перейдем от абсолютной погрешности к относительной при P = 0,95:

$$\delta d_{1/2} = \delta\text{СПО1} = 1{,}1\left(\left(\delta_K d_{1/2}\right)^2 + \left(\delta_U d_{1/2}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + \left(\delta_н d_{1/2}\right)^2 + \left(\delta_a d_{1/2}\right)^2 + m_{1/2}\left(\Delta_ф / d_{1/2}\right)^2\right)^{1/2}; \qquad (2)$$

Аналогично представим суммарную относительную погрешность при измерении $d_{1/4}$:

$$\delta d_{1/4} = 1{,}1\left(\left(\delta_K d_{1/4}\right)^2 + \left(\delta_U d_{1/4}\right)^2 + \left(\delta_н d_{1/4}\right)^2 + \right.$$

$$\left. + \left(\delta_a d_{1/4}\right)^2 + m_{1/4}\left(\Delta_ф / d_{1/4}\right)^2\right)^{1/2}; \qquad (3)$$

где $m_{1/4}$ — количество фильтров, необходимых для измерения $d_{1/4}$.

Определим составляющие погрешностей при измерении СПО1 и $d_{1/4}$.

Погрешность, связанная с погрешностью при измерении кермы в воздухе рентгеновского излучения

Керма в воздухе рентгеновского излучения, прошедшего через фильтр, с заданной средней энергией, равна $K=K_0\cdot\exp(-\mu d_ф)$, где μ — коэффициент ослабления рентгеновского излучения с заданной средней энергией в материале, из которого сделан фильтр [8, с. 218]. Тогда $d_ф = \ln\left(K_0/K\right)/\mu$, откуда относительные погрешности при измерении $d_{1/2}$ и $d_{1/4}$ можно определить как

$$\left.\begin{aligned} \delta_K d_{1/2} &\cong \sqrt{4\left(\delta_{сл}K\right)^2 + \left(\delta\mu\right)^2}; \\ \delta_K d_{1/4} &\cong \sqrt{\left(\delta_{сл}K\right)^2 + \left(\delta\mu\right)^2}, \end{aligned}\right\} \qquad (4)$$

где $\delta_{сл}K$ — случайная относительная погрешность дозиметра при измерении кермы в воздухе;

$\delta\mu$ — изменение коэффициента ослабления за счет изменения средней энергии.

При заданной средней энергии ($\bar{E}$ =const) μ=const, т. е. $\delta\mu$=0. Значит, относительные погрешности при измерении $d_{1/2}$ и $d_{1/4}$ из (4) можно представить как

$$\left.\begin{aligned} \delta_K d_{1/2} &\cong 2\delta_{сл}K, \\ \delta_K d_{1/4} &\cong \delta_{сл}K. \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

Погрешность, связанная с погрешностью установки напряжения на аноде рентгеновской трубки

При изменении напряжения на аноде рентгеновской трубки изменяется средняя энергия [1].

Из (4) при $\delta_{сл}K$=0 (K=const) найдем $\delta_U d_{1/2}=\delta_U d_{1/4}=$ $=\delta\mu_{\bar{E}}$. Погрешность, связанная с погрешностью установки напряжения на аноде рентгеновской трубки (δU_a), определяется изменением коэффициента ослабления материала, из которого сделаны фильтры, необходимые для измерения СПО, в зависимости от средней энергии.

Изменение μ можно определить, зная изменение средней энергии ($\delta_U \bar{E}$) в зависимости от δU_a. Зависимости $\delta_U \bar{E} = f(\delta U_a)$ для РУ PANTAK HF160 [3, с. 263—265] в диапазоне $\bar{E}$ = 23—120 кэВ построим на основе расчетов, приведенных в [1].

Как видно из **рис. 1**, $|\delta_U \bar{E}| \le 0{,}8\%$ при $|\delta U_a| \le 1\%$. Здесь $Q1$—$Q7$— режимы работы РУ PANTAK HF160, которые зависят от применяемых фильтров и U_a.

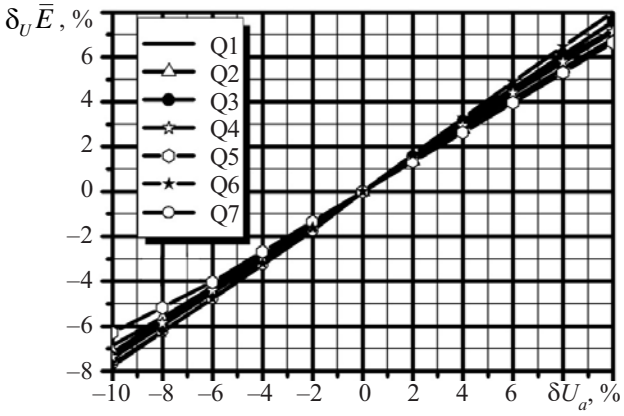

Рис. 1

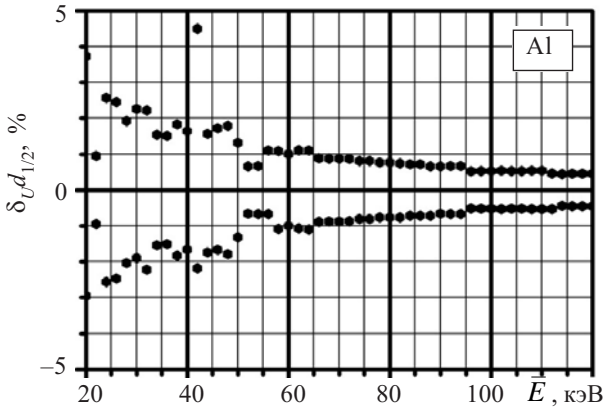

Рис. 2

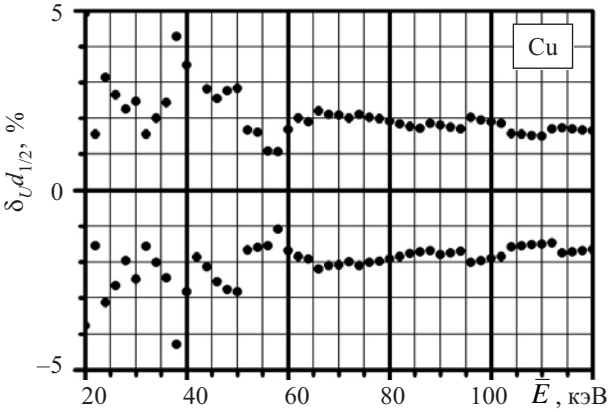

Рис. 3

Зная $\delta_U \bar{E}$ и зависимости $d_{1/2\ \mathrm{Al,\ Cu}}=f(\bar{E})$ [1], относительные положительную и отрицательную погрешности $\delta_U d_{1/2}$ определим как

$$\delta_U d_{1/2\pm} = 100\left(d_{1/2}\left(\bar{E}\right) - d_{1/2}\left(\bar{E} \pm \Delta_U \bar{E}\right)\right) / d_{1/2}\left(\bar{E}\right), \quad (6)$$

где $\Delta_U \bar{E} = \bar{E} \cdot \delta_U \bar{E}$.

Зависимости $\delta_U d_{1/2\ \mathrm{Al,\ Cu}}=f(\bar{E})$ при $\delta_U \bar{E}$=0,8%, рассчитанные по выражениям (6) для Al и Cu численным методом, приведены на **рис. 2** и **3**, соответственно.

За относительную погрешность $\delta_U d_{1/2}$ принимаем максимальное из всех значений $\delta_U d_{1/2+}$ и $|\delta_U d_{1/2-}|$, т. е. $\delta_U d_{1/2} = \max\left\{\delta_U d_{1/2+}; \left|\delta_U d_{1/2-}\right|\right\}$.

Погрешности, связанные с нестабильностями напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки

Нестабильности напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки приводят к изменению кермы в воздухе. Следовательно, погрешности, связанные с нестабильностями, можно определить из (5) как

$$\left.\begin{aligned} \delta_{\text{н}} d_{1/2} &= 2 \cdot \delta_{\text{н}1/2} K; \\ \delta_{\text{н}} d_{1/4} &= \delta_{\text{н}1/4} K, \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

где $\delta_{\text{н}1/2} K = \left|\left(K_{01/2} - K_{01}\right)/K_{01}\right|$, $K_{01/2} = \left(K_{01} + K_{02}\right)/2$,

$$\delta_{\text{н}1/4} K = \left|\left(K_{01/4} - K_{01}\right)/K_{01}\right|, \quad K_{01/4} = \left(K_{01} + K_{03}\right)/2.$$

Здесь K_{01}, K_{02}, K_{03} — керма в воздухе перед измерением СПО1, после измерения СПО1 и $d_{1/4}$ без дополнительных фильтров, соответственно.

Погрешность аппроксимации зависимости $K/K_0=f(d_{\text{ф}})$

Рассмотрим интервал $[d_1, d_2]$ зависимости $K/K_0=f(d_{\text{ф}})$ при измерении СПО1 (**рис. 4**).

Считаем, что $\left.\dfrac{K}{K_0} = \exp\left(-\mu d_{\text{ф}}\right)\right|_{d_{\text{ф}}=[d_1,\, d_2]}$.

Данную зависимость аппроксимируем прямой:

$\left.\dfrac{K}{K_0}\right|_{d_{\text{ф}}=[d_1,\, d_2]} = kd + b$ (рис. 4).

Определим коэффициенты k и b:

$$\left.\begin{aligned} k &= \left[\exp\left(-\mu d_2\right) - \exp\left(-\mu d_1\right)\right] / \left(d_2 - d_1\right); \\ b &= \left[d_2 \exp\left(-\mu d_1\right) - d_1 \exp\left(-\mu d_2\right)\right] / \left(d_2 - d_1\right). \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Подставив (8) в уравнение прямой, найдем d при K/K_0=0,5:

$$d = \frac{0{,}5 - b}{k} = \frac{d_2 - d_1 - 2d_2 \cdot \exp\left(-\mu d_1\right) + 2d_1 \cdot \exp\left(-\mu d_2\right)}{2 \cdot \left[\exp\left(-\mu d_2\right) - \exp\left(-\mu d_1\right)\right]}. \quad (9)$$

Зададим $d_1 = d_{1/2} - \tilde{d}$ и $d_2 = d_{1/2} + \tilde{d}$, где $\tilde{d} = \eta d_{1/2}$. Подставив d_1 и d_2 в (9), после математических преобразований с учетом того, что $\exp(-\mu d_{1/2})$=0,5, $\exp\left(\mu \tilde{d}\right) = 2^{\eta}$, $\exp\left(-\mu \tilde{d}\right) = 2^{-\eta}$, $\mu = \dfrac{\ln 2}{d_{1/2}}$, получим

$$d = d_{1/2}\eta\left(2^{\eta+1} - 2^{2\eta} - 1\right) / \left(1 - 2^{2\eta}\right) + d_{1/2}. \quad (10)$$

Погрешность при измерении $d_{1/2}$ за счет аппроксимации определим как $\delta_a d_{1/2} = d/d_{1/2} - 1$. Подставив в это выражение формулу (10), получим

$$\delta_a d_{1/2} = \eta\left(2^{\eta+1} - 2^{2\eta} - 1\right) / \left(1 - 2^{2\eta}\right). \quad (11)$$

Аналогично рассмотрим интервал $[d_3, d_4]$ при измерении $d_{1/4}$ (рис. 4).

Зададим $d_3 = d_{1/4} - \bar{d}$ и $d_4 = d_{1/4} + \bar{d}$, где $\bar{d} = \bar{\eta} d_{1/4}$. С учетом того, что $\exp(-\mu d_{1/4})$=0,25, $\exp\left(\mu \bar{d}\right) = 2^{2\bar{\eta}}$ и $\exp\left(-\mu \bar{d}\right) = 2^{-2\bar{\eta}}$, $\mu = \ln 4 / d_{1/4}$, получим

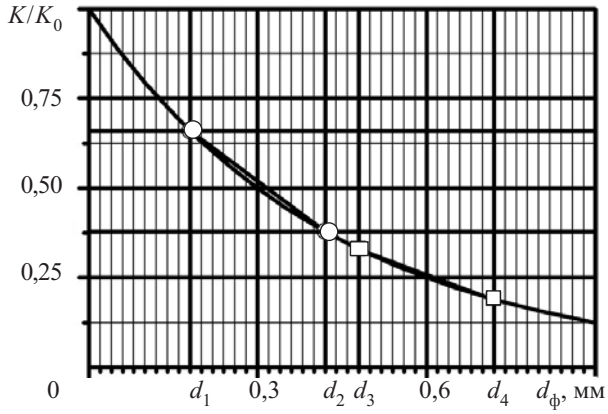

Рис. 4

$$\delta_a d_{1/4} = \bar{\eta}\left(2^{2\bar{\eta}+1} - 2^{4\bar{\eta}} - 1\right)/\left(1 - 2^{4\bar{\eta}}\right). \quad (12)$$

Подставив первые выражения (5) и (7), (11) в (2) и вторые выражения (5) и (7), (12) в (3), получим выражения для вычисления δСПО1 и $\delta d_{1/4}$

$$\left.\begin{aligned} \delta\text{СПО1} &= 1{,}1\left(4\left[\left(\delta_{\text{сл}}K\right)^2 + \left(\delta_{\text{н}1/2}K\right)^2\right] + \right. \\ &\quad + \left(\delta_U d_{1/2}\right)^2 + \left(\frac{\eta\left(2^{\eta+1} - 2^{2\eta} - 1\right)}{1 - 2^{2\eta}}\right)^2 + \\ &\quad \left. + m_{1/2}\left(\frac{\Delta_{\text{ф}}}{\text{СПО1}}\right)^2\right)^{1/2}; \\ \delta d_{1/4} &= 1{,}1\left(\left(\delta_{\text{сл}}K\right)^2 + \left(\delta_{\text{н}1/4}K\right)^2 + \left(\delta_U d_{1/2}\right)^2 + \right. \\ &\quad \left. + \left(\frac{\bar{\eta}\left(2^{2\bar{\eta}+1} - 2^{4\bar{\eta}} - 1\right)}{1 - 2^{4\bar{\eta}}}\right)^2 + m_{1/4}\left(\frac{\Delta_{\text{ф}}}{d_{1/4}}\right)^2\right)^{1/2}. \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

Погрешность при измерении средней энергии рентгеновского излучения

Относительная погрешность при измерении средней энергии определяется следующими погрешностями:

— погрешностью, связанной с погрешностью при измерении СПО1, — $\delta\bar{E}_{d1/2}$;

— погрешностью табулированных значений СПО для Al и Cu — $\delta\bar{E}_{0d1/2}$.

Суммарную относительную погрешность при измерении средней энергии при P=0,95 запишем в виде [6, с. 72]

$$\delta\bar{E} = 1{,}1\sqrt{\left(\delta\bar{E}_{d1/2}\right)^2 + \left(\delta\bar{E}_{0d1/2}\right)^2}. \quad (14)$$

Погрешность, связанная с погрешностью при измерении СПО1

Относительные положительную и отрицательную погрешности при измерении $\bar{E}$ в зависимости от $d_{1/2\text{Al,Cu}}$ и $\delta d_{1/2\text{Al,Cu}}$ определим как

$$\delta\bar{E}_{\pm} = 100\left(\bar{E}\left(d_{1/2} \pm \Delta d_{1/2}\right) - \bar{E}\left(d_{1/2}\right)\right)/\bar{E}\left(d_{1/2}\right), \quad (15)$$

где $\Delta d_{1/2} = d_{1/2} \cdot \delta d_{1/2}$.

Зависимости $\bar{E} = f\left(d_{1/2}\right)$ **(рис. 5)** представим в виде

$$\bar{E}\left(d_{1/2Al,Cu}\right) = \begin{cases} \beta 0_0 \cdot d + \beta 1_0, \text{ если } \mathrm{d}_0 \le d \le d_1; \\ \beta 0_1 \cdot d + \beta 1_1, \text{ если } \mathrm{d}_1 \le d \le d_2; \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \beta 0_n \cdot d + \beta 1_n, \text{ если } \mathrm{d}_{n\text{-}1} \le d \le d_n, \end{cases} \quad (16)$$

где $\beta 0_n = -\dfrac{\alpha 0_n}{\alpha 1_n}$; $\beta 1_n = \dfrac{1}{\alpha 1_n}$; $\alpha 0_n$ и $\alpha 1_n$ были определены в диапазоне энергии от 1 до 300 кэВ при n=80 в [1].

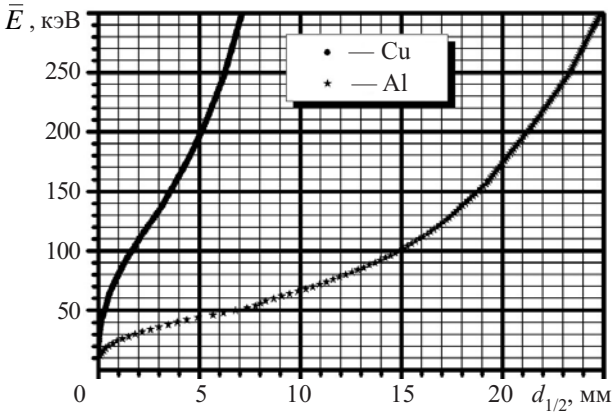

Рис. 5

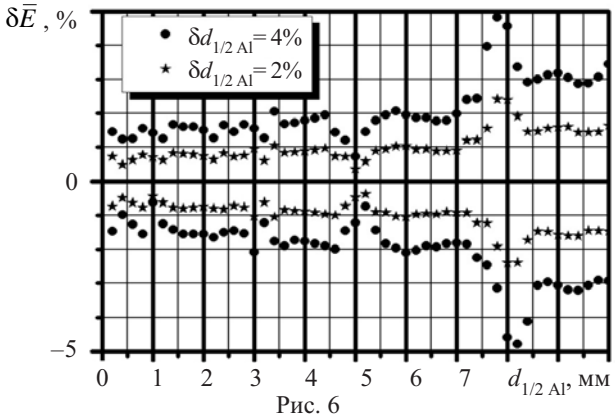

Рис. 6

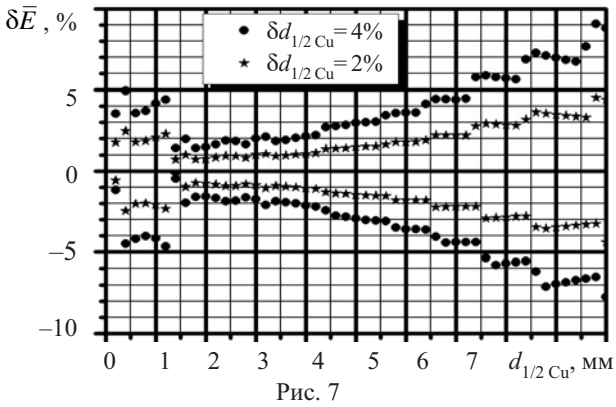

Рис. 7

Зависимости $\delta\bar{E} = f\left(d_{1/2\,\text{Al},\,Cu}\right)$ при известном значении $\delta d_{1/2}$, рассчитанные по выражениям (15) для Al и Cu численным методом, приведены на **рис. 6** и **7**, соответственно.

За относительную погрешность при измерении средней энергии $\delta\bar{E}$ принимаем максимальное значение из $\delta\bar{E}_+$ и $\left|\delta\bar{E}_-\right|$, т. е. $\delta\bar{E} = \max\left\{\delta\bar{E}_+; \left|\delta\bar{E}_-\right|\right\}$.

Погрешность, связанная с погрешностью табулированных значений СПО для Al и Cu

С учетом того, что $d_{1/2} = \dfrac{\ln 2}{\mu}$, относительную погрешность табулированных значений СПО ($d_{01/2}$) представим в виде

$$\delta_0\left(d_{01/2}\right) = \delta(\mu), \quad (17)$$

где $\delta(\mu)$ — погрешность при измерении линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения;

$\mu(E)$ — линейный коэффициент ослабления для энергий, меньших 1500 кэВ [8, с. 220], $\mu(E)=\tau(E)+\sigma_{ког}(E)+\sigma_{неког}(E)$.

Погрешность $d_{01/2}$ с учетом (17) представим в виде

$$\delta_0\left(d_{01/2}\right)=\left[\delta\tau(E)\right]^2\left[\frac{\tau(E)}{\mu(E)}\right]^2+\left[\delta\sigma_{ког}(E)\right]^2\times$$
$$\times\left[\frac{\sigma_{ког}(E)}{\mu(E)}\right]^2+\left[\delta\sigma_{неког}(E)\right]^2\left[\frac{\sigma_{неког}(E)}{\mu(E)}\right]^{1/2}. \quad (18)$$

Зависимости (18) для Al и Cu в диапазоне энергий от 1 до 300 кэВ, рассчитанные численным методом, приведены на **рис. 8.**

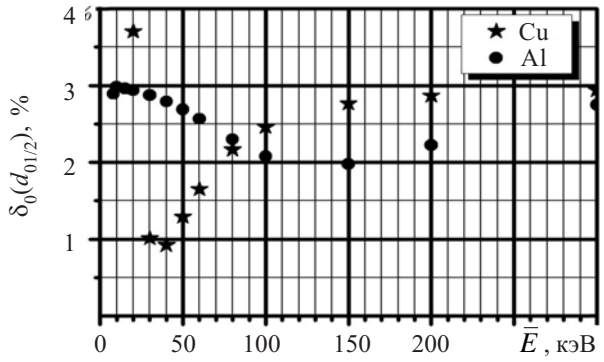

Рис. 8

Погрешность $\delta\bar{E}_{0d1/2}$ определяется по зависимостям $\delta\bar{E}=f\left(d_{1/2\ \mathrm{Al,\ Cu}}\right)$ при $\delta_0\left(d_{01/2}\right)=\mathrm{const}$ (рис. 6 и 7).

Погрешности при измерении СПО2 и коэффициента гомогенности

С учетом выражений для определения СПО2 и h относительные погрешности при их измерении представим в виде

$$\left.\begin{aligned}\delta\text{СПО2}&=\frac{\sqrt{(\Delta\text{СПО1})^2+(\Delta d_{1/4})^2}}{d_{1/4}-\text{СПО1}}=\\&=\sqrt{h^2(\delta\text{СПО1})^2+(1+h)^2(\delta d_{1/4})^2};\\\delta h&=\sqrt{(\delta\text{СПО1})^2+(\delta\text{СПО2})^2}=\\&=\sqrt{\left(1+h^2\right)(\delta\text{СПО1})^2+(1+h)^2(\delta d_{1/4})^2}.\end{aligned}\right\}\quad(19)$$

Анализ составляющих погрешностей

Все погрешности при измерении СПО1, $\bar{E}$, СПО2 и h в формулах (13), (14) и (19) выражены через δСПО1 и $\delta d_{1/4}$. Определим, как можно их уменьшить.

Априорно известны погрешности δ_K, δ_U, δ_a, и $\Delta_ф$; погрешности $\delta_н$ определяются при измерении.

Определим критерии, при которых можно пренебречь погрешностями δ_a и $\Delta_ф$ по сравнению с погрешностями δ_K и δ_U.

Чтобы можно было пренебречь погрешностью $\delta_a d_{1/2}$ в (2) и $\delta_a d_{1/4}$ в (3) согласно требованиям [9, п. 1.2.3], должны выполняться неравенства $\delta_a d_i\le\frac{1}{3}\sqrt{(\delta_K d_i)^2+(\delta_U d_i)^2}$, где i=1/2, 1/4. После подстановки в эти неравенства первого выражения (5) и (11), второго выражения (5) и (12) получим

$$\left.\begin{aligned}&\frac{3\eta\left(2^{\eta+1}-2^{2\eta}-1\right)}{1-2^{2\eta}}\le\delta1;\\&\frac{3\bar{\eta}\left(2^{2\bar{\eta}+1}-2^{4\bar{\eta}}-1\right)}{1-2^{4\bar{\eta}}}\le\delta2,\end{aligned}\right\}\quad(20)$$

где $\delta1=\sqrt{4(\delta_{сл}K)^2+(\delta_U d_{1/2})^2}$,

$\delta2=\sqrt{(\delta_{сл}K)^2+(\delta_U d_{1/2})^2}$.

Неравенства (20) — трансцендентные, решения которых найдем из зависимостей $\delta1=f(\eta)$ и $\delta2=f(\bar{\eta})$ (**рис. 9**).

Следовательно, чтобы можно было пренебречь аппроксимацией зависимости $K/K_0=f(d_ф)$ прямыми линиями при определении $d_{1/2}$ и $d_{1/4}$, толщина дополнительных фильтров должна выбираться с учетом η и $\bar{\eta}$, которые определяются из неравенств (20) с учетом погрешностей $\delta1$ и $\delta2$, т. е.

$$d_1=\text{СПО1}\cdot(1-\eta);\ d_2=\text{СПО1}\cdot(1+\eta);$$
$$d_3=d_{1/4}(1-\bar{\eta});\ d_4=d_{1/4}(1+\bar{\eta}).\quad(21)$$

Чтобы можно было пренебречь погрешностями при измерении толщины дополнительных фильтров ($\Delta_ф$), должны выполняться неравенства [9, п. 1.2.3]

$$\left.\begin{aligned}&\sqrt{m_{1/2}}\left(\frac{\Delta_ф}{\text{СПО1}}\right)\le\frac{1}{3}\sqrt{4(\delta_{сл}K)^2+(\delta_U d_{1/2})^2};\\&\sqrt{m_{1/4}}\left(\frac{\Delta_ф}{d_{1/4}}\right)\le\frac{1}{3}\sqrt{(\delta_{сл}K)^2+(\delta_U d_{1/2})^2},\end{aligned}\right\}\quad(22)$$

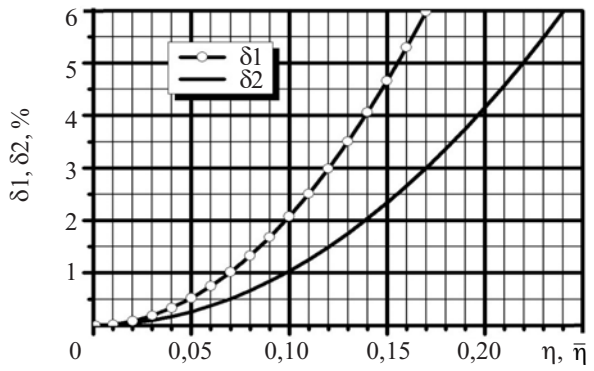

Рис. 9

из которых найдем

$$\left.\begin{aligned} &\text{СПО1} \geq \text{СПО1}_{\min} = \frac{3\sqrt{m_{1/2}}\Delta_{\text{ф}}}{\sqrt{4\left(\delta_{\text{сл}}K\right)^2 + \left(\delta_U d_{1/2}\right)^2}}; \\ &d_{1/4} \geq d_{1/4\min} = \frac{3\sqrt{m_{1/4}}\Delta_{\text{ф}}}{\sqrt{\left(\delta_{\text{сл}}K\right)^2 + \left(\delta_U d_{1/2}\right)^2}}. \end{aligned}\right\} \quad (23)$$

С учетом условий (20) и (22) выражения (13) запишем в виде

$$\left.\begin{aligned} &\delta\text{СПО1} \cong 1{,}1\sqrt{4\left[\left(\delta_{\text{сл}}K\right)^2 + \left(\delta_{\text{н}1/2}K\right)^2\right] + \left(\delta_U d_{1/2}\right)^2}; \\ &\delta d_{1/4} \cong 1{,}1\sqrt{\left(\delta_{\text{сл}}K\right)^2 + \left(\delta_{\text{н}1/4}K\right)^2 + \left(\delta_U d_{1/2}\right)^2}. \end{aligned}\right\} (24)$$

Таким образом, порядок выполнения измерений и расчета погрешностей при измерении СПО1, СПО2, средней энергии и коэффициента гомогенности, следующий.

1) Рассчитать среднюю энергию, СПО1, СПО2 и h согласно [1].

2) Определить $\delta_U \bar{E}$, зная δU_a (рис. 1) и погрешность $\delta_U d_{1/2}$ (рис. 2 или 3).

3) Зная погрешности $\delta_{\text{сл}}K$ и $\delta_U d_{1/2}$, по зависимостям $\delta 1 = f(\eta)$ и $\delta 2 = f\left(\bar{\eta}\right)$ (рис. 9) определить коэффициенты η и $\bar{\eta}$.

4) Зная η и $\bar{\eta}$, из (21) определить d_1, d_2, d_3 и d_4.

5) Измерить зависимость $K = f(d_1, d_2, d_3, d_4)$, по которой определить СПО1 и $d_{1/4}$. Вычислить СПО2 и h.

6) Зная СПО1, по зависимости (16) определить $\bar{E}$.

7) Проверить соблюдение неравенств (23). Если неравенства соблюдаются, погрешности δСПО1 и $\delta d_{1/4}$ определить по формулам (24), если не соблюдаются — по (13).

8) Зная $\bar{E}$, определить $\delta(d_{1/2\,\text{Al, Cu}})$ (рис. 8); по зависимостям $\delta\bar{E} = (d_{1/2\,\text{Al,Cu}})$ при $\delta_0(d_{01/2\,\text{Al, Cu}})$=const (рис. 6 или 7) определить $\delta\bar{E}_{0d1/2}$.

9) Зная СПО1 и δСПО1, определить $\delta\bar{E}_{d1/2}$ по зависимостям $\delta\bar{E} = f\,(d_{1/2\,\text{Al,Cu}})$ (рис. 5 или 6).

10) По выражению (14) определить погрешность $\delta\bar{E}$.

11) По выражениям (19) определить погрешности δСПО2 и δh.

При этом необходимо отметить что:

— измерения выполняют при малых значениях мощности рентгеновской трубки с целью снижения нестабильности кермы в воздухе, но при этом керма в воздухе должна быть такой, чтобы случайная погрешность при ее измерении была минимальной;

— чистота материалов дополнительных фильтров должна быть не хуже 0,999 [5, с. 16].

Экспериментальные исследования с учетом изложенных требований были проведены на РУ PANTAK HF160 [3], которая по классификации [5, табл. 4] относится к установкам с узким спектром (серия N).

Анализ полученных данных показывает, что рассчитанные значения и значения СПО1, СПО2, $\bar{E}$ и h рентгеновского излучения, приведенные в [5, табл. 4], согласуются с результатами измерений в пределах погрешностей при их измерении и удовлетворяют требованиям, приведенным в [5], что позволяет сделать вывод о корректности расчета. При этом погрешности расчета средней энергии рентгеновского излучения и коэффициента гомогенности, полученные в [1], были уточнены: $\left|\delta\bar{E}_{\Sigma\text{р}}\right| \leq 3{,}0\%$ и $\left|\delta h_{\Sigma\text{р}}\right| \leq 8{,}0\%$ при $0{,}9 \leq h < 1$.

Выводы

1. Погрешности при измерении коэффициента гомогенности, СПО1 и СПО2 определяются погрешностями при измерениях кермы в воздухе и толщины дополнительных фильтров, погрешностью аппроксимации зависимости кермы в воздухе от толщины дополнительных фильтров, нестабильностями напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки и погрешностью установки напряжения на аноде.

2. Погрешность при измерении средней энергии определяется погрешностями при измерении СПО1 и коэффициента ослабления для алюминия или меди.

3. При условии, что

— случайная погрешность дозиметра рентгеновского излучения не превышает 0,5%;

— погрешность микрометра не превышает 4 мкм;

— погрешность, связанная с нестабильностями напряжения на аноде и тока анода рентгеновской трубки, и погрешность установки напряжения на аноде не превышает 1% каждая;

при правильном выборе толщины дополнительных фильтров погрешности при измерении характеристик рентгеновских установок составляют: $\left|\delta\text{СПО1}_{\text{изм}}\right| < 3\%$, $\left|\delta\text{СПО2}_{\text{изм}}\right| < 7\ \%$, $\left|\delta\bar{E}_{\text{изм}}\right| < 2\%$ и $\left|\delta h_{\text{изм}}\right| < 8\%$.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. 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. [Dushkin S. A., Kurov A. M., Odinets V. A., Orobinskii A. N. // Tekhnologiya i konstruirovanie v elektronnoi apparature. 2008. N 6. P. 60]

2. Cranley K. Measurement of the performance characteristics of diagnostic X-Ray systems used in medicine. Part I. X-Ray tubes and generators (Second edition).— Belfast: Institution of physics and engineering in medicine and biology, 1996.— Report No 32.

3. 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».— Харьков.— 2008.— Т. 2.— С. 261—265. [Dushkin S. A., Kurov A. M., Odinets V. A., Orobinskii A. N. / Tr. VI Mezhd. nauchn.tekhn. konf. «Metrologiya i izmeritel'naya tekhnika». Khar'kov. 2008. Vol. 2. P. 261]

4. Пилипенко М. І., Корнєєва В. В. Перспективи забезпечення в Україні єдності вимірювань ікс-проміння в медицині // Український радіологічний журнал.— 2003.— № 11— С. 11—16. [Pilipenko M. I., Korneeva V. V. // Ukrayins'kii radiologichnii zhurnal. 2003. N 11 P. 11]

5. ДСТУ ISO 4037-1:2006. Стандартні рентгенівське та гамма-випромінення 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. [DSTU ISO 40371:2006.]

6. Грановский В. А., Сирая Т. Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях.— Л.: Энергоатомиздат, 1990. [Granovskii V. A., Siraya T. N. Leningrad. Energoatomizdat. 1990]

7. ДСТУ ГОСТ 8.207:2008. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения [DSTU GOST 8.207:2008. GSI.]

8. Неме ц О. Ф., Гофман Ю. В. Справочник по ядерной физике.— Киев: Наукова думка, 1975. [Nemets O. F., Gofman Yu. V. Kiev: Naukova dumka. 1975]

9. ГОСТ 25935-83. Приборы дозиметрические. Методы измерения основных параметров. [GOST 25935-83]