

С. А. ДУШКИН, В. Б. ИВАНСКИЙ, А. М. КУРОВ¹,
В. А. ОДИНЕЦ, к. ф.-м. н. А. Н. ОРОБИНСКИЙ

Украина, г. Харьков, ННЦ «Институт метрологии»,

¹Институт 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 $K=f(d_\phi)$ или $K/K_0=f(d_\phi)$ (K_0 — керма в воздухе до фильтра; d_ϕ — 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 $\bar{E}=f(d_{1/2Al,Cu})$, где $d_{1/2Al,Cu}$ — 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, — $\Delta_n d_{1/2}$ и $\Delta_n d_{1/4}$;

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

— 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, $\Delta_{-} d_{1/2} = \Delta_{+} d_{1/2} = \Delta_{-} d_{1/4} = \Delta_{+} d_{1/4} = \Delta_\phi$).

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 $K/K_0=f(d_\phi)$ 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

$$\Delta d_{1/2} = \Delta \text{СПО1} = k \left((\Delta_K d_{1/2})^2 + (\Delta_U d_{1/2})^2 + (\Delta_n d_{1/2})^2 + (\Delta_a d_{1/2})^2 + m_{1/2} (\Delta_\phi)^2 \right)^{1/2}, \quad (1)$$

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 $P=0,95$:

$$\delta d_{1/2} = \delta \text{СПО1} = 1,1 \left((\delta_K d_{1/2})^2 + (\delta_U d_{1/2})^2 + (\delta_n d_{1/2})^2 + (\delta_a d_{1/2})^2 + m_{1/2} (\Delta_\phi / d_{1/2})^2 \right)^{1/2}; \quad (2)$$

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

$$\delta d_{1/4} = 1,1 \left((\delta_K d_{1/4})^2 + (\delta_U d_{1/4})^2 + (\delta_n d_{1/4})^2 + (\delta_a d_{1/4})^2 + m_{1/4} (\Delta_\phi / d_{1/4})^2 \right)^{1/2}; \quad (3)$$

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 $K=K_0 \cdot \exp(-\mu d_\phi)$, где μ — коэффициент ослаб-

ления рентгеновского излучения с заданной средней энергией в материале, из которого сделан фильтр [8, с. 218]. Тогда $d_\phi = \ln(K_0/K)/\mu$, откуда относительные погрешности при измерении $d_{1/2}$ и $d_{1/4}$ можно определить как

$$\delta_K d_{1/2} \approx \sqrt{4(\delta_{\text{сл}} K)^2 + (\delta \mu)^2}; \quad \delta_K d_{1/4} \approx \sqrt{(\delta_{\text{сл}} K)^2 + (\delta \mu)^2}, \quad (4)$$

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

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

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

$$\delta_K d_{1/2} \approx 2\delta_{\text{сл}} K, \quad \delta_K d_{1/4} \approx \delta_{\text{сл}} K. \quad (5)$$

Погрешность, связанная с погрешностью установки напряжения на аноде рентгеновской трубки

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

Из (4) при $\delta_{\text{сл}} K=0$ ($K=\text{const}$) 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, $|\delta_U \bar{E}| \leq 0,8\%$ при $|\delta U_a| \leq 1\%$. Здесь Q1—Q7 — режимы работы РУ PANTAK HF160, которые зависят от применяемых фильтров и U_a .

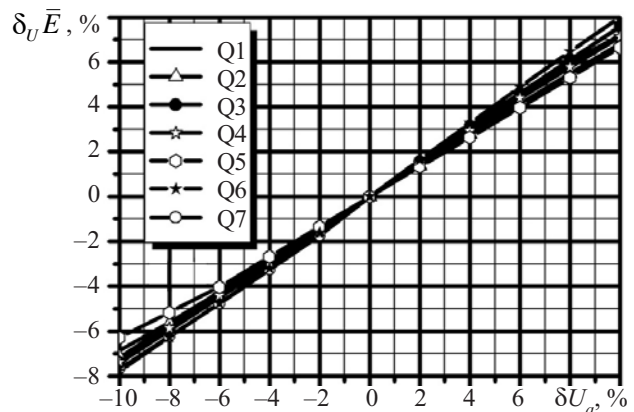


Рис. 1

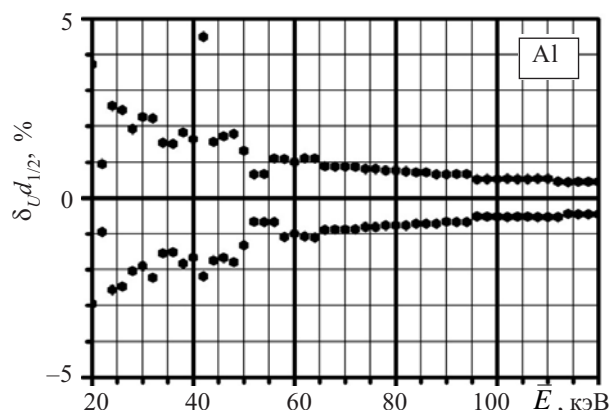


Рис. 2

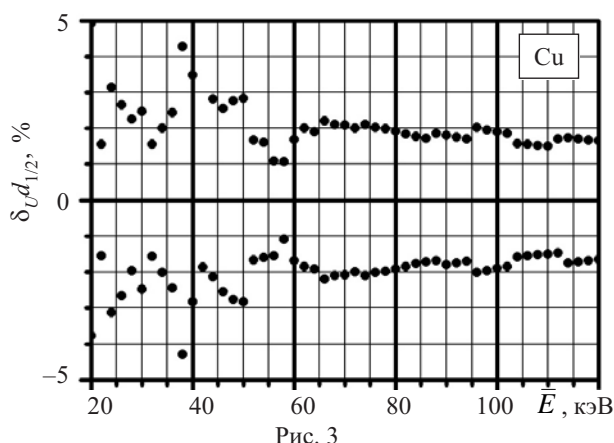


Рис. 3

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

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

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

Зависимости $\delta_U d_{1/2 \text{ Al, Cu}} = f(\bar{E})$ 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. $\delta_U d_{1/2} = \max \{ \delta_U d_{1/2+}; |\delta_U d_{1/2-}| \}$.

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

$$\left. \begin{aligned} \delta_n d_{1/2} &= 2 \cdot \delta_{n1/2} K; \\ \delta_n d_{1/4} &= \delta_{n1/4} K, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где $\delta_{n1/2} K = |(K_{01/2} - K_{01}) / K_{01}|$, $K_{01/2} = (K_{01} + K_{02}) / 2$,

$$\delta_{n1/4} K = |(K_{01/4} - K_{01}) / K_{01}|, \quad K_{01/4} = (K_{01} + K_{03}) / 2.$$

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

$$K/K_0 = f(d_\phi)$$

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

$$\text{Считаем, что } \frac{K}{K_0} = \exp(-\mu d_\phi) \Big|_{d_\phi=[d_1, d_2]}.$$

Данную зависимость аппроксимируем прямой:

$$\frac{K}{K_0} \Big|_{d_\phi=[d_1, d_2]} = kd + b \quad (\text{рис. 4}).$$

Определим коэффициенты k и b :

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

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

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

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 $\exp(-\mu d_{1/2}) = 0,5$, $\exp(\mu \tilde{d}) = 2^\eta$, $\exp(-\mu \tilde{d}) = 2^{-\eta}$, $\mu = \frac{\ln 2}{d_{1/2}}$, получим

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

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

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

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 $\exp(-\mu d_{1/4}) = 0,25$, $\exp(\mu \bar{d}) = 2^{2\bar{\eta}}$ и $\exp(-\mu \bar{d}) = 2^{-2\bar{\eta}}$, $\mu = \ln 4 / d_{1/4}$, получим

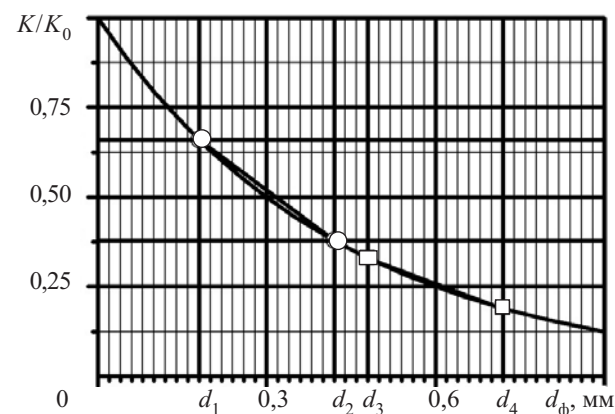


Рис. 4

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

Подставив первые выражения (5) и (7), (11) в (2) и вторые выражения (5) и (7), (12) в (3), получим выражения для вычисления $\delta\text{СПО1}$ и $\delta d_{1/4}$

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

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]

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

Погрешность, связанная с погрешностью при измерении СПО1

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

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

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

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

[illegible]

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

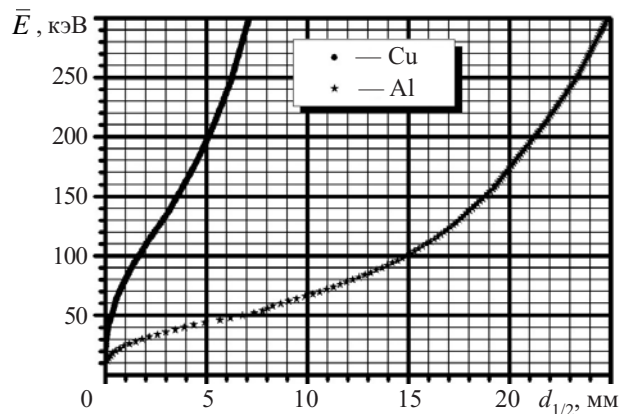


Рис. 5

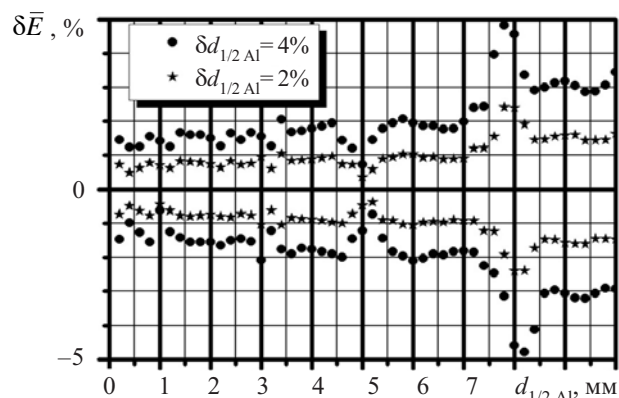


Рис. 6

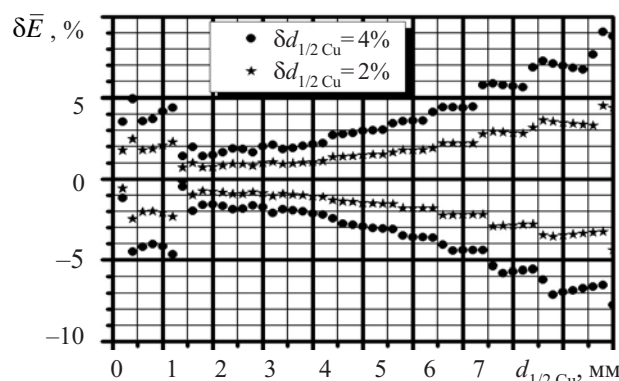


Рис. 7

Зависимости $\delta \bar{E} = f(d_{1/2 \text{ Al, Cu}})$ 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 $\bar{\delta E}$ принимаем максимальное значение из $\delta \bar{E}_+$ и $|\delta \bar{E}_-|$, т. е. $\delta \bar{E} = \max \{ \delta \bar{E}_+; |\delta \bar{E}_-| \}$.

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

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

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

где $\delta(\mu)$ — погрешность при измерении линейного коэффициента ослабления рентгеновского излучения;
 $\mu(E)$ — линейный коэффициент ослабления для энергий, меньших 1500 кэВ [8, с. 220], $\mu(E) = \tau(E) + \sigma_{\text{ког}}(E) + \sigma_{\text{неког}}(E)$.

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

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

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

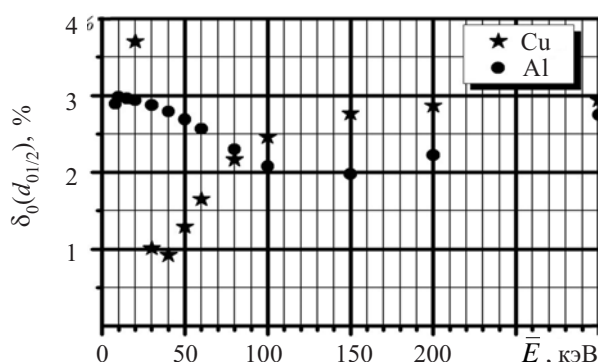


Рис. 8

Погрешность $\delta\bar{E}_{0d1/2}$ определяется по зависимостям $\delta\bar{E} = f(d_{1/2} \text{ Al, Cu})$ при $\delta_0(d_{01/2}) = \text{const}$ (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

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

Анализ составляющих погрешностей

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

Априорно известны погрешности δ_K , δ_U , δ_a , и Δ_Φ ; погрешности δ_n определяются при измерении.

Определим критерии, при которых можно пренебречь погрешностями δ_a и Δ_Φ 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

$$\delta_a d_i \leq \frac{1}{3} \sqrt{(\delta_K d_i)^2 + (\delta_U d_i)^2}, \quad \text{где } i=1/2, 1/4. \quad \text{После}$$

подстановки в эти неравенства первого выражения (5) и (11), второго выражения (5) и (12) получим

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

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

$$\delta 2 = \sqrt{(\delta_{\text{cl}} K)^2 + (\delta_U d_{1/2})^2}.$$

Неравенства (20) — трансцендентные, решения которых найдем из зависимостей $\delta 1 = f(\eta)$ и $\delta 2 = f(\bar{\eta})$ (рис. 9).

Следовательно, чтобы можно было пренебречь аппроксимацией зависимости $K/K_0 = f(d_\Phi)$ 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 $\delta 1$ и $\delta 2$, т. е.

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

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

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

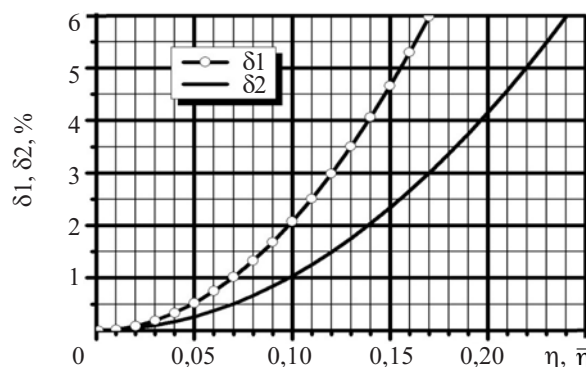


Рис. 9

из которых найдем

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

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

$$\left. \begin{aligned} \delta \text{СПО1} &\cong 1,1\sqrt{4[(\delta_{\text{сл}}K)^2 + (\delta_{\text{н1/2}}K)^2] + (\delta_U d_{1/2})^2}; \\ \delta d_{1/4} &\cong 1,1\sqrt{(\delta_{\text{сл}}K)^2 + (\delta_{\text{н1/4}}K)^2 + (\delta_U d_{1/2})^2}. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

Таким образом, порядок выполнения измерений и расчета погрешностей при измерении СПО1, СПО2, средней энергии и коэффициента однородности, 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 $\delta 2=f(\bar{\eta})$ (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 $\delta \text{СПО1}$ 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 $\delta_0(d_{01/2 \text{ Al, Cu}}) = \text{const}$ (рис. 6 или 7) определить $\delta \bar{E}_{0d1/2}$.

9) Зная СПО1 и $\delta \text{СПО1}$, 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 $\delta \text{СПО2}$ 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 тре-

бованиям, приведенным в [5], что позволяет сделать вывод о корректности расчета. При этом погрешности расчета средней энергии рентгеновского излучения и коэффициента однородности, полученные в [1], были уточнены: $|\delta \bar{E}_{\Sigma p}| \leq 3,0\%$ и $|\delta h_{\Sigma p}| \leq 8,0\%$ при $0,9 \leq h < 1$.

Выводы

1. Погрешности при измерении коэффициента однородности, 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: $|\delta \text{СПО1}_{\text{изм}}| < 3\%$, $|\delta \text{СПО2}_{\text{изм}}| < 7\%$, $|\delta \bar{E}_{\text{изм}}| < 2\%$ и $|\delta h_{\text{изм}}| < 8\%$.

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 konstruirovaniye v elektronnoy 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., Корнеева 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-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. [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. Немец 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]