

Władysław LUKASZEK,
Stanisław KUCYPERA
Instytut Techniki Ciepłej

OPTIMALIZACJA WYBRANYCH PARAMETRÓW
WYSTĘPUJĄCYCH W POMIARACH GĘSTOŚCI
METODĄ ABSORPCJI PROMIENIOWANIA GAMMA

Streszczenie. W pracy opisano metodę wyznaczania optymalnych wartości parametrów warunkujących minimalny błąd pomiaru gęstości. Metodę zilustrowano obliczeniami oraz podano uwagi dotyczące praktycznej jej realizacji w technice pomiarowej.

1. Wprowadzenie

Pomiar gęstości (średniej) metodą absorpcji wąskiej wiązki promieniowania gamma w materiale próbki może być opisany wzorem

$$r - r_t = (r_0 - r_t) e^{-\mu d \rho} \quad (1)$$

gdzie:

- r - natężenie (częstość) zliczeń w przypadku prześwietlenia próbki wiązką promieniowania gamma, impulsów/s,
- r_0 - natężenie zliczeń w przypadku usunięcia próbki z przestrzeni objętej wiązką promieniowania gamma, impulsów/s,
- r_t - natężenie zliczeń rejestrowane pod wpływem promieniowania tła, impulsów/s,
- ρ - gęstość materiału próbki, g/cm³,
- μ - masowy współczynnik pochłaniania dla materiału próbki, cm²/g,
- d - grubość próbki (długość drogi wiązki promieniowania gamma w materiale próbki), cm.

Z przekształcenia wzoru (1) wynika wzór definicyjny, który może być wykorzystany do pomiaru gęstości metodą absorpcji promieniowania gamma

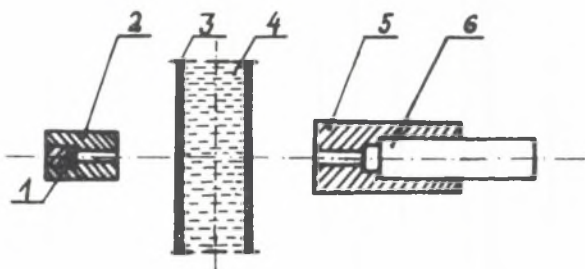
$$\rho = \frac{1}{\mu d} \ln \frac{r_0 - r_t}{r - r_t} \quad (2)$$

Wielkość $C = -\mu d$ spełnia warunek

$$C^{-1} = \frac{1}{C} \frac{\partial C}{\partial(\mu d)}$$

i w literaturze nazywana jest oszułością względną (lub krócej oszułością) metody pomiaru gęstości [1].

"Geometria" układu wykorzystywanego do pomiarów gęstości absorbentów przepływających rurociągiem jest przedstawiona na rysunku 1.



Rys. 1. Geometria układu do pomiaru gęstości absorbentów przepływających rurociągiem

1 - źródło promieniowania gamma, 2 - kolimator źródła, 3 - pomiarowy odcinek rurociągu, 4 - absorbent (próbka), 5 - kolimator i osłona detektora, 6 - detektor promieniowania

Dalsze rozważania zostaną ograniczone do pomiarów gęstości prowadzonych z wykorzystaniem prędoczłonników.

2. Oszacowanie błędu pomiaru gęstości

Oszacowanie kwadratu błędu pomiaru gęstości określa się za pomocą sumy

$$S_{\rho}^2(\rho) = S_{st}^2(\rho) + S_{\mu d}^2(\rho) + S_{ap}^2(\rho), \quad (3)$$

gdzie:

$S_{st}(\rho)$ - błąd cząstkowy statystyczny (wynikający z pomiarów natężeń zliczeń),

$S_{\mu d}(\rho)$ - błąd cząstkowy uwarunkowany błędem parametru μd ,

$S_{ap}(\rho)$ - błąd cząstkowy aparaturowy.

Wszystkie błędy interpretowane są jako błędy jednosigmowe, tzn. odpowiadające poziomowi ufności równemu ok. 68,26%.

2.1. Błąd oszacowy statystyczny

Błąd oszacowy statystyczny może być określony wzorem

$$S_{st}(\varrho) = \sqrt{\left(\frac{\partial \varrho}{\partial r_0}\right)^2 S^2(r_0) + \left(\frac{\partial \varrho}{\partial r}\right)^2 S^2(r) + \left(\frac{\partial \varrho}{\partial r_t}\right)^2 S^2(r_t)}, \quad (4)$$

gdzie: $S^2(r_0)$, $S^2(r)$ i $S^2(r_t)$ oznaczają oszacowania kwadratów błędów odpowiednich pomiarów natężeń zliczeń. W przypadku pomiarów wykonywanych przelicznikiem prawdziwe są zależności [2]:

$$S^2(r_0) = \frac{n_0}{t^2} = \frac{r_0}{t_0}, \quad (5)$$

$$S^2(r) = \frac{n}{t^2} = \frac{r}{t}, \quad (6)$$

$$S^2(r_t) = \frac{n_t}{t_t^2} = \frac{r_t}{t_t}, \quad (7)$$

gdzie: n_0 , n , n_t oznaczają ilości zliczeń (w impulsach) zarejestrowane odpowiednio w czasie t_0 , t i t_t (sekund).

2.2. Błąd oszacowy uwarunkowany błędem parametru μ_d

Drugi składnik wzoru (3) można określić zgodnie z zależnością

$$S^2_{\mu_d}(\varrho) = \left[\frac{\partial \varrho}{\partial (\mu_d)} \right]^2 S^2(\mu_d), \quad (8)$$

gdzie $S^2(\mu_d)$ jest oszacowaniem kwadratu błędu parametru μ_d . Przyjmuje się, że błąd parametru μ_d ustala błąd współczynnika pochłaniania μ określony w wyniku pomiarów (współczynnika pochłaniania). Zgodnie z podanym założeniem

$$S^2(\mu_d) = d^2 S^2(\mu).$$

W określonych warunkach pomiaru gęstości (ustalona energia promieniowania określony skład próbki) wykorzystuje się konkretną wartość błędu współczynnika pochłaniania co oznacza, że można napisać

$$S^2(\mu) = \text{idem}.$$

2.3. Błąd oszczędności aparaturowy

Liczne czynniki zakłócające (do których można zaliczyć: fluktuacje wysokiego napięcia i napięć zasilających, fluktuacje temperatury, szumy układów elektronicznych) są przyczyną błędów w działaniu aparatury zastosowanej w układzie pomiarowym. Wszystkie czynniki zakłócające działanie zastosowanej aparatury (rozpatrywane łącznie) warunkują, tzw. błąd aparaturowy.

W literaturze błąd aparaturowy traktuje się z reguły jako zmienną losową o rozkładzie normalnym. Przy określaniu wartości liczbowych błędów aparaturowego zakłada się często równość błędów aparaturowego i błędów statystycznego. Podane założenie wykorzystuje się w ramach niniejszej pracy co oznacza, że wartość liczbową błędów oszczędności aparaturowego ustala się zgodnie z zależnością

$$S_{ap}^2(\varphi) = S_{st}^2(\varphi). \quad (9)$$

2.4. Błąd pomiaru gęstości

Łącząc zależności (3), (4), (5), (6), (7), (8) i (9) uzyskuje się następującą postać wzoru dla oszacowania kwadratu błędów pomiaru gęstości

$$\begin{aligned} S_o^2(\varphi) = & \frac{1}{(\mu d)^2} \left\{ \frac{1}{(r_o - r_t)^2} \frac{r_o}{t_o} + \frac{1}{(r - r_t)^2} \frac{r}{t} + \right. \\ & \left. + \left[\frac{1}{r - r_t} - \frac{1}{r_o - r_t} \right]^2 \frac{r_t}{t} \right\} + \\ & + \frac{1}{(\mu d)^4} \ln^2 \left(\frac{r_o - r_t}{r - r_t} \right) S^2(\mu d) + S_{ap}^2(\varphi). \end{aligned} \quad (10)$$

Zgodnie z podanymi wcześniej uwagami błędy $S(\mu d)$ i $S_{ap}(\varphi)$ są interpretowane jako wielkości stałe (funkcje stałe).

3. Optymalizacja błędów pomiaru gęstości

Optymalizacja błędów pomiaru gęstości określonego zależnością (10) przeprowadzona zostanie w dwóch etapach.

3.1. Optymalizacja ze względu na oszacowanie natężeń zliczeń (etap 1)

Przyjmuje się następujące sformułowanie zagadnienia optymalizacji w zakresie pierwszego etapu:

Należy wyznaczyć minimum funkcji

$$S_0(\varrho) = F(t, t_0, t_t)$$

przy ograniczeniu

$$t + t_0 + t_t = T_c, \quad (11)$$

gdzie czas T_c jest wielkością ustaloną.

Eliminując t_t , zagadnienie sprowadza się do wyznaczenia minimum bezwarunkowego funkcji (zmiennych t_0 i t)

$$S_0(\varrho) = \left[\frac{1}{(\mu d)^2} \left\{ \frac{1}{(r_0 - r_t)^2} \frac{r_0}{t_0} + \frac{1}{(r - r_t)^2} \frac{r}{t} + \left[\frac{1}{r - r_t} - \frac{1}{r_0 - r_t} \right]^2 \frac{r_t}{T_c - t_0 - t} \right\} + \frac{1}{(\mu d)^4} \ln^2 \left(\frac{r_0 - r_t}{r - r_t} \right) S^2(\mu d) + S_{ap}^2(\varrho) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

Z analizy zagadnienia wynika, że funkcja $S_0(\varrho)$ jest określona i ciągła w obszarze trójkątnym F_{Δ}

$$F_{\Delta} \begin{cases} 0 < t_0 < T_c, \\ 0 < t < T_c - t_0. \end{cases}$$

W obszarze F_{Δ} funkcja $S_0(\varrho)$ jest dodatnia i spełnia warunki:

$$S_0(\varrho) \rightarrow \infty, \text{ dla } t \rightarrow 0, \quad \text{lub dla } t_0 \rightarrow 0 \quad \text{lub dla } t_0 + t \rightarrow T_c,$$

co oznacza, że w miarę zbliżania się do zewnątrz obszaru F_{Δ} funkcja $S_0(\varrho)$ reśnie nieograniczenie.

Rozpatrzone własności uzasadniają istnienie minimum funkcji $S_0(\varrho)$ w obszarze F_{Δ} , a zatem warunki

$$\frac{\partial S_0}{\partial t_0} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial S_0}{\partial t} = 0, \quad (14)$$

mogą być interpretowane jako warunki dostatecznego istnienia minimum. Z warunków (13), (14) i (11) wynikają związki

$$\frac{t_o}{t} = \frac{r - r_t}{r_o - r_t} \sqrt{\frac{r_o}{r}}, \quad (15)$$

$$\frac{t_o}{t_t} = \frac{r - r_t}{r_o - r} \sqrt{\frac{r_o}{r_t}}, \quad (16)$$

$$\frac{T_c}{t_o} = 1 + \frac{r_o - r_t}{r - r_t} \sqrt{\frac{r}{r_o}} + \frac{r_o - r}{r - r_t} \sqrt{\frac{r_t}{r_o}}. \quad (17)$$

Wprowadzając stosunki (15), (16), (17) do równości (12) uzyskuje się wyrażenie na błąd optymalny ze względu na czasy pomiarów natężeń zliczeń

$$S_{o,m}(\varrho) = \left[\frac{1}{(\mu d)^2 T_c} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r_o} + \sqrt{r_t}} + \frac{1}{\sqrt{r} - \sqrt{r_t}} \right\}^2 + \frac{1}{(\mu d)^4} \ln^2 \left(\frac{r_o - r_t}{r - r_t} \right) S^2(\mu d) + S_{ap}^2(\varrho) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (18)$$

3.2. Optymalizacja ze względu na parametr μd (etap 2)

Optymalizację zależności (18) ze względu na parametr μd przeprowadzić się przy założeniu, że natężenie zliczeń r jest funkcją μd określoną zgodnie z wyrażeniem (1).

Analizując zależność (18) przy uwzględnieniu wyrażenia (1) łatwo stwierdzić, że są spełnione następujące warunki:

$$S_{o,m}(\varrho) \rightarrow \infty \text{ dla } \mu d \rightarrow 0 \text{ lub } \mu d \rightarrow \infty.$$

Podane warunki przy szukaniu minimum funkcji (18) ze względu na parametr μd pozwalają ograniczyć rozważania do badania pierwszej pochodnej.

Optymalna wartość parametru μd może być wyznaczona z równania

$$\frac{\partial S_{o,m}}{\partial (\mu d)} + \frac{\partial S_{o,m}}{\partial r} \frac{dr}{d(\mu d)} = 0.$$

Po wykonaniu odpowiednich przekształceń i uwzględnieniu zależności

$$\frac{dr}{d(\mu d)} = -\varrho(r - r_t),$$

uzyskuje się wyrażenie na optymalną wartość parametru $(\mu d)_o$.

$$(\mu d)_0 = \frac{2 \left\{ \left[\frac{1}{\sqrt{r_o} + \sqrt{r_t}} + \frac{1}{\sqrt{r_m} - \sqrt{r_t}} \right]^2 + T_c \varrho^2 S^2(\mu d) \right\}}{\frac{\varrho}{\sqrt{r_m}} \frac{\sqrt{r_m} + \sqrt{r_t}}{\sqrt{r_m} - \sqrt{r_t}} \left[\frac{1}{\sqrt{r_o} + \sqrt{r_t}} + \frac{1}{\sqrt{r_m} - \sqrt{r_t}} \right]}, \quad (19)$$

gdzie:

$$r_m = r_t + (r_o - r_t) e^{-\frac{(\mu d)_0}{\varrho}}.$$

Jeżeli $S(\mu d) = 0$ wówczas otrzymujemy

$$(\mu d)_0 = \frac{2}{\varrho} \frac{\sqrt{r_m} (\sqrt{r_o} + \sqrt{r_m})}{(\sqrt{r_o} + \sqrt{r_t})(\sqrt{r_m} + \sqrt{r_t})}. \quad (19a)$$

Wartości parametru $(\mu d)_0$ odpowiada błąd

$$S_{e,m,m}(\varrho) = \left[\frac{1}{(\mu d)_0^2} T_c \left\{ \frac{1}{\sqrt{r_o} + \sqrt{r_t}} + \frac{1}{\sqrt{r_m} - \sqrt{r_t}} \right\}^2 + \frac{\varrho^2}{(\mu d)_0^2} S^2(\mu d) + S_{sp}^2(\varrho) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (20)$$

4. Dobór aktywności i energii źródła promieniowania gamma

Aktywność punktowego źródła promieniowania gamma dostosowana do przeprowadzonych rozważań może być określona za pomocą wzoru

$$A = \frac{4\pi R^2 k r_o}{\varrho_z a \epsilon_d}, \text{ Bq} \quad (21)$$

gdzie:

- k - krotność osłabienia promieniowania w materiałach ograniczających próbkę (np. w ścianach rurociągu),
- R - odległość źródło-detektor, m,
- ϱ_z - wydajność emisji kwantów źródła promieniowania gamma, kwantów/rezpad,
- a - powierzchnia czynna (oświetlona) detektora promieniowania gamma, m^2 ,
- ϵ_d - wydajność wewnętrzna detektora promieniowania gamma, impulsów/kwant.

Aktywność A może być wyrażona w jednostkach Ci (Curie) zgodnie z relacją

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq.}$$

Przy założonej grubości próbki d odpowiednią wartość parametru $(\mu d)_0$ można uzyskać wykorzystując zależność współczynnika pochłaniania materiału próbki od energii promieniowania, tzn. wybierając określoną energię kwantów. Energie kwantów izotopowych źródeł promieniowania gamma stanowią zbiór dyskretny i dlatego należy brać również pod uwagę konieczność wpływania na zmiany wartości parametru $(\mu d)_0$ za pomocą zmian grubości próbki.

5. Obliczenia przykładowe. Opracowanie wykresów

Obliczenia przykładowe obejmują:

- oszacowania błędów (wzory (12), (18), (20)) z uwzględnieniem podziału oalkowitego czasu pomiaru T_0 (wzory (15), (16), (17)) i odpowiednich wartości parametru μd (wzory (19), (19a)).
- oszacowanie grubości warstw wody i aktywności źródeł promieniowania (Am-241 , Cs-137 , Co-60) przy wykorzystaniu wyników z punktu a).

Wyniki obliczeń uporządkowano w tabelach 1 i 2 przyjmując następujące dane wejściowe:

$$r_0 = 10^4 \text{ imp./s}, \quad r_t = 500 \text{ imp./s}, \quad \rho = 1 \text{ g/cm}^3,$$

$$S^2(\mu d) = 0,001 \text{ cm}^6/\text{g}^2.$$

Błędy w tabeli 1 oszacowano dla 4 par wartości błędów $S(\mu d)$ i $S_{ap}(\rho)$ oraz dla dwóch wartości czasów T_0 (3s, 6s). Wartość błędu $S_{ap}(\rho) \neq 0$ przyjmuje się równą odpowiedniej wartości błędu osątkowego statystycznego wynikającej z zastosowania wzoru (12), (18) lub (20). Wykorzystane wartości czasów t , t_0 , t_t oraz wartości parametrów μd zostały podane w uwagach do tabeli 1.

Wartości liniowych współczynników pochłaniania (dla wody - $\mu_{\text{H}_2\text{O}}$, dla rurociągu wykonanego z aluminium - μ_{Al} , dla detektora z kryształu NaI - μ_{NaI}) pochodzące z pozycji [4] i niezbędne do wykonania obliczeń zostały podane w tabeli 2.

Grubość solanki x_{Al} odcinka pomiarowego rurociągu (wypełnionego wodą) oraz grubość scyntylatora x_{NaI} z jodku sodu, założono równe odpowiednio 0,4 cm i 2,5 cm. Wzory dla obliczenia parametrów k i ξ_{μ} oraz konieczne wyjaśnienia zostały podane w piątej kolumnie tabeli 2.

Tabela 1

Oszacowania błędów pomiarów gęstości

Oszacowanie błędu	$S(\mu_d) = 0$ $S_{ap}(\varrho) = 0$	$S(\mu_d) = 0$ $S_{ap}(\varrho) \neq 0$	$S(\mu_d) \neq 0$ $S_{ap}(\varrho) = 0$	$S(\mu_d) \neq 0$ $S_{ap}(\varrho) \neq 0$
$S_o(\varrho)$ (wzór (12))	0,0188 ¹⁾	0,0266 ¹⁾	0,0246 ¹⁾	0,0309 ¹⁾
	0,0133 ²⁾	0,0188 ²⁾	0,0206 ²⁾	0,0246 ²⁾
$S_{o,m}(\varrho)$ (wzór (18))	0,0169 ³⁾	0,0239 ³⁾	0,0231 ³⁾	0,0286 ³⁾
	0,0119 ⁴⁾	0,0169 ⁴⁾	0,0197 ⁴⁾	0,0231 ⁴⁾
$S_{o,m,m}(\varrho)$ (wzór (20))	0,0164 ⁵⁾	0,0232 ⁵⁾	0,0226 ⁶⁾	0,0289 ⁶⁾
	0,0116 ⁷⁾	0,0164 ⁷⁾	0,0185 ⁸⁾	0,0229 ⁸⁾

Uwagi do tabeli 1

- $t_o = t = t_t = 1s$, $\mu_d = 2 \text{ cm}^3/g$
- $t_o = t = t_t = 2s$, $\mu_d = 2 \text{ cm}^3/g$
- $t_o = 0,54 \text{ s}$, $t = 1,69 \text{ s}$, $t_t = 0,77 \text{ s}$, $T_c = 3 \text{ s}$, $\mu_d = 2 \text{ cm}^3/g$
- $t_o = 1,08 \text{ s}$, $t = 3,38 \text{ s}$, $t_t = 1,54 \text{ s}$, $T_c = 6 \text{ s}$, $\mu_d = 2 \text{ cm}^3/g$
- Dane jak w uwadze 3 lecz $\mu_d = 1,6535 \text{ cm}^3/g$. μ_d obliczono wg wzoru (19a)
- Dane jak w uwadze 3 lecz $\mu_d = 2,2823 \text{ cm}^3/g$. μ_d obliczono wg wzoru (19)
- Dane jak w uwadze 4 lecz $\mu_d = 1,6535 \text{ cm}^3/g$. μ_d obliczono wg wzoru (19a)
- Dane jak w uwadze 4 lecz $\mu_d = 2,5200 \text{ cm}^3/g$. μ_d obliczono wg wzoru (19).

Tabela 2

Grubości próbek (absorbenta) i aktywności źródeł promieniowania gamma

Parametr	I z o t o p			U w a g i
	Am-241	Cs-137	Co-60	
E, MeV	0,060 1)	0,661 2)	1,25 2)	-
μ_{H_2O} , cm ⁻¹	0,190 2)	0,0862 2)	0,0641 2)	-
d, cm	8,7	19,2	25,8	$d = \frac{1,6535}{\mu_{H_2O}} \varphi$,
d, cm	12,0	26,5	35,6	$d = \frac{2,2823}{\mu_{H_2O}} \varphi$,
d, cm	13,3	29,2	39,3	$d = \frac{2,5200}{\mu_{H_2O}} \varphi$,
μ_{Al} , cm ⁻¹	0,640 2)	0,194 2)	0,150 2)	-
k	1,669	1,168	1,127	$k = e^{2\mu_{Al} x_{Al}}$, $x_{Al} = 0,4$ cm,
μ_{NaI} , cm ⁻¹	22,72 2)	0,277 2)	0,190 2)	-
ξ_{β}	1,00	0,500	0,378	$\xi_{\beta} = 1 - e^{-\mu_{NaI} x_{NaI}}$, $x_{NaI} = 2,5$ cm
η_z	0,4	0,92	2,0	-
A, mCi	28,9	17,6	10,3	R = 40 cm, a = 0,785 cm ²

Uwagi do tabeli 2

1. Energia wg pozycji [3]
2. Dane wg pozycji [4].

Zależność (19) przekształcona do postaci

$$(\mu d)_0 = \frac{2\sqrt{V}(\sqrt{V} - 1)(W^2 + \varphi^2 Q)}{\varphi W(\sqrt{V} + 1)}, \quad (22)$$

gdzie:

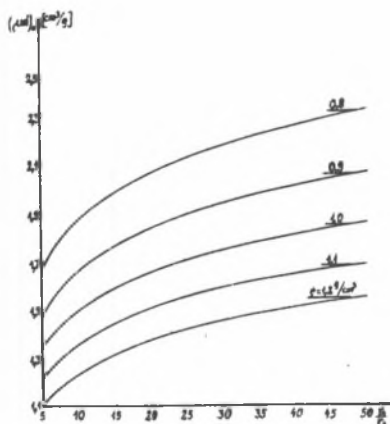
$$Q = T_0 S^2 (\mu d) r_t, \quad \text{om}^6 / \text{g}^2,$$

$$U = \frac{r_o}{r_t}, \quad V = \frac{r_m}{r_t} = 1 + (U-1)e^{-\frac{1}{2}(\mu d)_0 \xi},$$

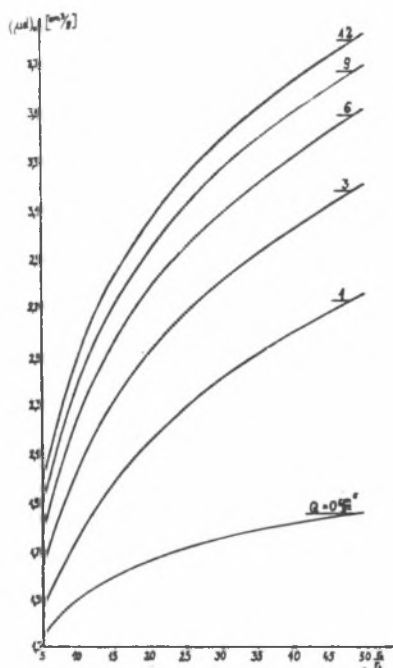
$$W = \frac{1}{\sqrt{U+1}} + \frac{1}{\sqrt{V-1}},$$

została wykorzystana do sporządzenia wykresów

$$(\mu d)_0 = f\left(\frac{r_o}{r_t}, \xi, Q\right).$$



Rys. 2. Rodzina krzywych $(\mu d)_0 = f\left(\frac{r_o}{r_t}, \xi, Q\right)$ dla pięciu wartości ξ przy założeniu $Q = 0 \frac{\text{om}^6}{\text{g}^2}$



Rys. 3. Rodzina krzywych $(\mu d)_0 = f\left(\frac{r_o}{r_t}, \xi, Q\right)$ dla sześciu wartości Q przy założeniu $\xi = 1 \text{ g/om}^3$

$$Q = T_c \cdot S^2 (\mu d) \cdot r_t$$

Obliczenia wartości $(\mu d)_0$ wykonano za pomocą odpowiedniego programu napisanego w języku FORTRAN na m.o. ODRA 1305 dla następujących wartości parametrów

$$Q = 0, 1, 3, 6, 9, 12, \text{ cm}^6/\text{g}^2,$$

$$\xi = 0,8 (0,1) 1,2, \text{ g/cm}^3,$$

$$U = 5 (5) 50.$$

Wybrane wyniki obliczeń wartości $(\mu d)_0$ zilustrowano za pomocą wykresów na rysunku 2 i na rysunku 3.

6. Dyskusja wyników

Analiza wyników z tabeli 1 pozwala stwierdzić, że błędy oszacowań maleją w miarę wzrostu całkowitego czasu pomiaru T_c i w miarę kontynuowania procesu optymalizacji. Etap optymalizacji wg parametru μd wpływa na ogół mniej wyraźnie na poprawę oszacowania błędu aniżeli bezpośrednio poprzedzający etap optymalizacji ze względu na podział czasu pomiaru. Wartości oszacowań pogarszają się jeżeli do błędu statystycznego (kolumna 2 tabeli 1) dołączane są dalsze błędy ($S(\mu d)$ i $S_{ap}(\xi)$). Z wykresów przedstawionych na rysunkach 2 i 3 wynika, że na wzrost wartości parametru $(\mu d)_0$ można wpływać zwiększając stosunek r_0/r_t , zwiększając wartość parametru Q lub zmniejszając gęstość ξ .

Tabela 1 obejmuje wyniki pierwszego i drugiego etapu optymalizacji. Zakończenie procesu optymalizacji wymaga dodatkowo obliczenia wartości czasów pomiarów natężeń złożeń t , t_0 i t_t , dostosowanych do obliczonej wartości parametru $(\mu d)_0$. W szczególności dla wyników z tabeli 1 do których odnosi się uwaga 8, wartości parametru $(\mu d)_0 = 2,5200 \text{ cm}^3/\text{g}$ i wartości czasu $T_c = 6\text{s}$, odpowiadają:

$$t = 3,32 \text{ s}, \quad t_0 = 0,75 \text{ s}, \quad t_t = 1,93 \text{ s}.$$

Minimalną wartością błędu pomiaru gęstości dla diskutowanego wariantu jest podana w tabeli 1 wartość

$$S_{0,m,m}(\xi) = 0,0229 \text{ g/cm}^3.$$

Na podstawie wyników obliczeń z tabeli 2 łatwo zauważyć, że większym energiom promieniowania gamma odpowiadają większe optymalne grubości próbek i mniejsze aktywności źródeł. Wartości aktywności podane w tabeli 2 zapewniają nieprzekroczenie błędów, oszacowanych w tabeli 1 pod warunkiem

dotrzymania wartości parametrów wynikających z przeprowadzonych obliczeń optymalizacyjnych.

7. Schemat obliczeniowy. Uwagi końcowe

W przypadku korzystania z informacji zawartych w niniejszym artykule odpowiednie zasady postępowania mogą być uporządkowane zgodnie z następującym schematem:

1. Oszacować gęstość materiału próbki ρ , przyjmując początkową wartość całkowitego czasu pomiaru T_c oraz założyć wstępnie wartości natężeń zliczeń r_0 i r_t .
2. Obliczyć parametr Q . Wartość błędu $S(\mu d)$ może być oszacowana na podstawie dostępnych danych literaturowych lub na podstawie analizy dokładności możliwych do zrealizowania metod eksperymentalnego pomiaru współczynnika pochłaniania.
3. Wyznaczyć wartość parametru $(\mu d)_0$, np. odczytując ją z wykresów rodziny krzywych $(\mu d)_0 = f\left(\frac{r_0}{r_t}, \rho, Q\right)$.
4. Stosując wzory (15), (16) i (17) obliczyć wartości czasów pomiarów natężeń zliczeń t, t_0 i t_t odpowiadające parametrowi $(\mu d)_0$. Obliczone wartości czasów mogą być zaakraglone w górę do najbliższych wartości całkowitych
5. Wykorzystując wzór (20) oszacować wartość błędu pomiaru gęstości $S_{c,m,m}(\rho)$.
6. Nawiązując do znanej wartości parametru $(\mu d)_0$ wybrać izotop promieniotwórczy oraz określić grubość próbki d .
7. Obliczyć wymaganą aktywność źródła A stosując wzór (21).

Projekt stanowiska pomiarowego musi uwzględniać możliwość wprowadzenia pewnych modyfikacji w czasie eksploatacji, np. możliwość zmiany odległości między źródłem i detektorem, możliwość wymiany źródła promieniowania itp. Istniejące stanowisko pomiarowe można wykorzystać do uściślenia wyników uzyskanych zgodnie z podanym schematem obliczeniowym. W szczególności natężenia zliczeń r_0 i r_t mogą być określone za pomocą odpowiednich pomiarów. Przyjmując, np. dostatecznie duże, całkowite wartości czasów pomiaru, dogodną wartość parametru μd oraz zmniejszając odpowiednio wartości natężeń zliczeń (w szczególności r_0) można wpływać na zmniejszenie błędu pomiaru gęstości i obniżenie aktywności źródła. W przypadku długich czasów pomiarów poprawia się statystyka zliczeń ponieważ są obserwowane duże ilości przemian promieniotwórczych. W konsekwencji fluktuacje w emisji i rozprzestrzenianiu się promieniowania lepiej się kompensują. Wartości natężenia zliczeń r_t można zmieniać za pomocą odpowiednich modyfikacji w układzie pomiarowym, np. stosując mniej lub bardziej efektywne osłony źródła i detektora. Mniejsze aktywności źródeł promieniowania uła-

twiają zachowanie warunków bezpieczeństwa pracy zgodnych z przepisami ochrony przed promieniowaniem.

Wartość aktywności może być również określona za pomocą wartości natężenia zliczeń r_0 uzależnionego od błędu pomiaru gęstości. Teoretycznie można w tym celu wykorzystać wzór (12) po wyrugowaniu r_0 i przyjęciu szacunkowych wartości dla wszystkich parametrów łącznie z przyjęciem wartości błędu pomiaru gęstości. Wyrugowanie parametru r_0 z wzoru (12) nie jest jednak łatwe i wymaga zastosowania metod numerycznych. Proste przypadki określania aktywności źródła promieniowania za pomocą wartości r_0 będącej funkcją błędu gęstości znaleźć można w pozycji [1].

LITERATURA

1. Klempner K.S., Čeredniženko J.M.: "Verojatnostnyj analiz pri proektirovanii radioizotopnykh priborov", Atomizdat, Moskwa 1971.
2. Price W.: "Detekcja promieniowania jądrowego" (tłum z jęz. ang.), PWN, Warszawa 1960.
3. Wallmoden W. (redakcja): "Ochrona przed promieniowaniem jonizującym", Część I, Wyd. CLOR, Warszawa 1966.
4. Kimmel L.P. (i inni): "Zaščita ot jonizirujuščich izlučenij", Wyd. 2, Atomizdat, Moskwa 1972.

Recenzent: doc. dr hab. inż. Zdzisław Kabza

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1983 r.

ОПТИМИЗАЦИЯ ИЗБРАННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЫСТУПАЮЩИХ В ИЗМЕРЕНИЯХ ПЛОТНОСТИ МЕТОДОМ АБСОРЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ГАММА

Р е з ю м е

В работе описан метод определения оптимальных значений параметров обуславливающих наименьшую ошибку измерения плотности. Метод иллюстрирован расчётами. Даны замечания касающиеся практической реализации метода в измерительной технике.

OPTIMIZATION OF CHOSEN PARAMETERS IN THE DENSITY MEASUREMENTS UTILIZING THE ABSORPTION OF GAMMA RAYS

S u m m a r y

In this paper a method of the minimal error determination of density measurement is described. The examples of calculations and comments about the rules of density measurement are given.