

# **Obliczanie dawek (i mocy dawek) od promieniowania gamma**

Instrukcję przygotował:  
dr, inż. Wiesław Gorączko  
Poznań, grudzień, 2004.

## Obliczanie dawek (i mocy dawek) od promieniowania gamma.

Nateżenie promieniowania gamma w odległości  $l$  od niesłoniętego źródła punktowego można opisać następującą zależnością :

$$I_0 = \frac{3.7 \cdot 10^{10} \cdot A}{4 \pi \cdot l^2} \sum \mu_i \cdot \varepsilon_i$$

gdzie :  $A$  - aktywność źródła punktowego [Ci];  
 $\mu_i$  - liczba fotonów o energii  $\varepsilon_i$  [/];  
 $\varepsilon_i$  - energia fotonów [MeV].

Moc dawki w danej objętości, to ta część energii promieniowania, która jest tam pochłaniana, a straty energii w jednostce objętości w strumieniu o jednostkowym przekroju są reprezentowane stratami na jednostce drogi. A zatem :

$$\dot{D} = I_0 \cdot \mu$$

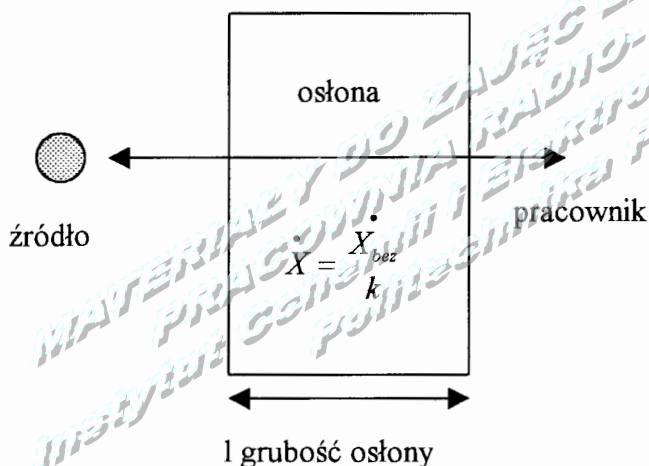
gdzie :  $\mu$  - liniowy współczynnik pochłaniania energii [ $cm^{-1}$ ].

Po kilku przekształceniach, oraz gdy znana jest (na ogół z Tablic) stała ekspozycyjna ( $\Gamma$ ) nuklidu emitującego promieniowanie fotonowe, moc dawki ekspozycyjnej można zapisać jako :

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = \frac{\Gamma \cdot A}{l^2} \quad \text{lub} \quad \dot{X} = \frac{W_\gamma}{l^2}$$

gdzie :  $W_\gamma$  - wydajność źródła [ $\frac{R}{h}$ ];  
 $l$  - odległość [m].

W przypadku, gdy między źródło a pracownika wprowadzimy osłonę - rys , to moc dawki można znaleźć z następującej zależności



gdzie :  $\dot{X}_{bez}$  - moc dawki bez osłony;  
 $k$  - krotność osłabienia [/].

zatem

$$\dot{X} = \frac{\Gamma * A}{k * l^2}$$

### Przykładowe zadania.

Pamiętać należy, że możemy obliczać zarówno dawkę (lub moc) ekspozycyjną, dawkę pochłoniętą, jak również równoważnik dawki. Bezpośrednie obliczenie równoważnika dawki bywa bardzo trudne. Przyjęto zatem zasadę, że w celu określenia jego wartości liczy się najpierw wielkość dawki pochłoniętej w powietrzu w miejscu, gdzie znajduje się stanowisko pracy i na tej podstawie określa się wartość równoważnika dawki, a mianowicie : dawce pochłoniętej w powietrzu 0.087 cGy odpowiada równoważnik dawki 1 mSv (patrz zad.6-8).

#### Zad.1.

Obliczyć moc równoważnika dawki pochłoniętej w powietrzu w odległości 0.5 m i 2.0 m od punktowego źródła promieniotwórczego Co-60 o aktywności 1 GBq.

Dane :

$$l_1 = 0.5m$$

$$l_2 = 2.0m$$

$$A = 1 \text{ GBq}$$

Co-60

Szukane :

$$\dot{D} = ?$$

$$\dot{D} = \frac{\Gamma * A}{l^2}$$

$$\Gamma = 30.5 * 10^{-3} \frac{\text{cGy} * \text{m}^2}{\text{h} * \text{GBq}}$$

$$\dot{D}_1 = \frac{30.5 * 10^{-3} * 1 \text{ GBq} * \text{cGy} * \text{m}^2}{(0.5)^2 * \text{h} * \text{GBq} * \text{m}^2} = 0.122 \frac{\text{cGy}}{\text{h}}$$

$$\dot{D}_2 = \frac{30.5 * 10^{-3} * 1 \text{ cGy}}{4 * \text{h}} = 0.0076 \frac{\text{cGy}}{\text{h}}$$

stosunek  $\frac{l_1}{l_2} = \frac{1}{4}$ , co wskazuje, że  $\frac{\dot{D}_1}{\dot{D}_2} = \frac{1}{16}$

#### Zad.2.

Pracownik pracował 7 godzin w odległości 1 m od źródła Cs-137 o aktywności 1 GBq. Obliczyć dawkę (równoważnik dawki) jaką otrzymał pracownik ?

Dane :

$$t = 7 \text{ h}$$

Szukane :

$$H = ?$$

$$l = 1 \text{ m}$$

$$A = 1 \text{ GBq}$$

$$\Gamma = 80 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cGy} \cdot \text{m}^2}{\text{h} \cdot \text{GBq}}$$

$$D = \dot{D} \cdot t$$

trzeba najpierw znaleźć  $\dot{D}$ ;

$$\dot{D} = \frac{\Gamma \cdot A}{l^2} = \frac{8.0 \cdot 10^{-3}}{1^2} = 0.008 \frac{\text{cGy}}{\text{h}}$$

$$D = \dot{D} \cdot t = 0.008 \frac{\text{cGy}}{\text{h}} \cdot 7 \text{ h} = 0.056 \frac{\text{cGy}}{\text{h}}$$

Wiemy, że dawce pochłoniętej w powietrzu 0.087 cGy odpowiada równoważnik dawki 1 mSv, a zatem

$$\begin{array}{rcl} 0.087 \text{ cGy} & \text{-----} & 1 \text{ mSv} \\ 0.056 \text{ cGy} & \text{-----} & x \text{ mSv} \end{array}$$

$$x = \frac{0.056 \text{ cGy} \cdot 1 \text{ mSv}}{0.087 \text{ cGy}} = 0.64 \text{ mSv}$$

### Zad. 3.

Obliczyć moc dawki ekspozycyjnej promieniowania gamma w odległości 2.5 m od punktowego źródła J-131 o wydajności  $W = 0.1 \left[ \frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{h}} \right]$ .

Dane :

Szukane :

$$l = 2.5 \text{ m}$$

$$\dot{X} = ?$$

$$W = 0.1 \left[ \frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{h}} \right]$$

$$\Gamma = 0.1 \left[ \frac{\text{cGy} \cdot \text{m}^2}{\text{GBq} \cdot \text{h}} \right] = 0.1 \left[ \frac{\text{R} \cdot \text{m}^2}{\text{h}} \right]$$

$$\text{Ale } W = \Gamma \cdot A \text{ -----} \rightarrow \Gamma = \frac{W}{A}$$

$$\dot{X} = \frac{\Gamma \cdot A}{l^2} = \frac{W \cdot A}{A \cdot l^2} = \frac{W}{l^2} = \frac{0.1 \cdot \text{R} \cdot \text{m}^2}{(2.5)^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{h}} = 0.016 \frac{\text{R}}{\text{h}} = 16 \frac{\text{mR}}{\text{h}}$$

ale

$$1 R \text{ -----} > 2.58 \cdot 10^{-4} \frac{C}{kg}$$

$$0.016 R \text{ -----} > ?$$

$$\dot{X} = \frac{0.016 \cdot R \cdot 2.58 \cdot 10^{-4} \cdot C}{1 \cdot R \cdot kg} = 4.13 \cdot 10^{-6} \frac{C}{kg}$$

#### Zad.4.

Po jakim czasie moc dawki promieniowania gamma od źródła Ir-192 zmaleje 10-cio krotnie ?

Dane :

Szukane :

$$\text{Ir - 192} \quad T = 74.4 \text{ d}$$

$$t = ?$$

$$\frac{\dot{X}_0}{\dot{X}_t} = 10 \quad \dot{X} = \frac{\Gamma \cdot A_0}{l^2} \quad \text{i} \quad \dot{X}_t = \frac{\Gamma \cdot A_t}{l^2}$$

$$\frac{\dot{X}_0}{\dot{X}_t} = 10 = \frac{\Gamma \cdot A_0 \cdot l^2}{l^2 \cdot \Gamma \cdot A_t} = \frac{A_0}{A_t} \quad \text{ale} \quad A_t = A_0 \cdot e^{-\frac{0.693 \cdot t}{T}}$$

zatem  $0 = \frac{A_0}{A_t \cdot e^{-\frac{0.693 \cdot t}{74.4}}}$  z tego równania należy wyliczyć t, a więc

$$t = \frac{74.4 \cdot \ln 10}{0.693} = 247 \text{ dni}$$

#### Zad.5.

Trzy osoby A, B i C poddano działaniu różnych rodzajów promieniowania jonizującego; tzn. odpowiednio osobę A promieniowaniu  $\alpha$ , osobę B -  $\beta$  i osobę C - neutronami, w ten sposób, że 1 g masy ich ciał pochłonię 0<sup>5</sup> cząstek o energii E = 5 MeV każda.

Obliczyć dawkę pochłoniętą i równoważnik dawki w każdym z przypadków.

Rozwiązanie

Dawka pochłonięta (zgodnie z definicją) jest we wszystkich wypadkach jednakowa i wynosi :

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{5 \text{ MeV}}{10^{-3} \text{ kg}} \quad \text{ale} \quad 1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J} \quad \text{a zatem mamy :}$$

$$D = \frac{5 \cdot 1.6 \cdot 10^5 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{10^{-3} \text{ kg}} = 8 \cdot 10^{-5} \text{ Gy} = 0.008 \text{ cGy}$$

a równoważnik dawki zgodnie z Tabełą 1 mamy :

osoba A : - promieniowanie  $\alpha$  -  $Q_A = 25$   
 $H_A = D * Q_A = 0.008 \text{cGy} * 25 = 2.0 \text{mSv}$

osoba B : - promieniowanie  $\beta$  -  $Q_B = 1$  (bo nie jest to tryt), zatem  
 $H_B = D * Q_B = 0.008 \text{cGy} * 1 = 0.08 \text{mSv}$

osoba C : - promieniowanie n -  $Q_C = 25$  zatem  $H_C = D * Q_C = 0.008 \text{cGy} * 25 = 2.0 \text{mSv}$

Wniosek :

Jakkolwiek wszystkie osoby otrzymały identyczną dawkę pochłoniętą, to znacznie różniły się wartości równoważników dawek, co oznacza różne potencjalne zagrożenie (negatywne skutki) dla organizmów. Największe niebezpieczeństwo groziło osobom typu A i C.

Zad.6.

Obliczyć dawkę ekspozycyjną tygodniową, jaką otrzymałby pracownik zatrudniony w odległości 1.2 m od źródła Ir - 192 o aktywności  $A = 3.7 \text{GBq}$ , podczas 6-ciu godzin pracy dziennie przez 6 dni w tygodniu.

Dane :

Szukane :

$$A = 3.7 \text{GBq}$$

$$X = ?$$

$$l = 1.2 \text{ m}$$

$$\text{Ir-192} \quad \Gamma = 10.9 * 10^{-3} \left[ \frac{\text{cCy} * \text{m}^2}{\text{GBq} * \text{h}} \right]$$

$$t = 6 \text{h} * 6 \text{ dni} = 36 \text{ h}$$

Rozwiązanie :

Mamy do czynienia z osłoną typu : powietrze, a zatem

$$\Gamma = 10.9 * 10^{-3}$$

$$\dot{X} = \frac{X}{t} \quad \text{-----} \rightarrow \quad X = \dot{X} * t \quad \text{ale} \quad \dot{X} = \frac{\Gamma * A}{k * l^2} \quad \text{gdzie : } k - \text{krotność osłabienia}$$

$k = 1$  - dla powietrza

$$\text{zatem } X = \frac{\Gamma * A}{k * l^2} * t = \frac{10.9 * 10^{-3} * 3.7}{1 * (1.2)^2} * 36 = 1.008 \text{cGy}$$

Zad.7.

Obliczyć równoważnik dawki pochłoniętej, jaką otrzyma osoba pracująca w odległości 0.5 m od punktowego źródła Cs-137, o aktywności 5 GBq przez 40

godzin w tygodniu. Pomiędzy źródłem a stanowiskiem pracy znajduje się osłona ołowiana o grubości 5 cm .

Dane :

$$l = 0.5 \text{ m}$$

$$A = 5 \text{ GBq}$$

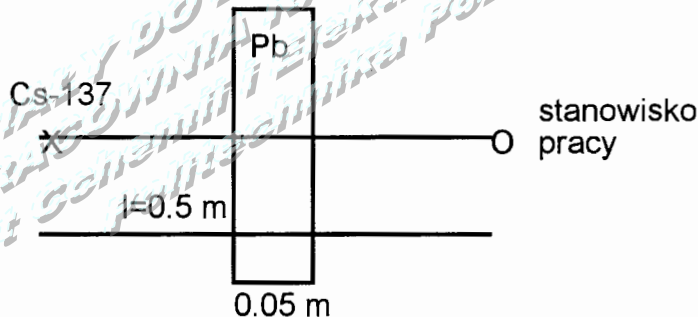
$$t = 40 \text{ h}$$

Cs-137

$$\Gamma = 8 \cdot 10^{-3} \left[ \frac{\text{cCy} \cdot \text{m}^2}{\text{GBq} \cdot \text{h}} \right]$$

Szukane :

$$H = ?$$



$$\Gamma = 8 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cGy} \cdot \text{m}^2}{\text{GBq} \cdot \text{h}}$$

z Tablic odczytano, że  $k = 200$  (dla ołowiu o grubości 5 cm);

$$D = \dot{D}_{Pb} \cdot t$$

zatem  $k = \frac{\dot{D}}{\dot{D}_{Pb}} \quad \text{-----} \rightarrow \quad \dot{D}_{Pb} = \frac{\dot{D}}{k}$

$$D = \frac{\dot{D}}{k} \cdot t = \frac{\Gamma \cdot A}{k \cdot l^2} \cdot t = \frac{8 \cdot 10^{-3} \cdot 5}{200 \cdot (0.05)^2} \cdot 40 = 3.2 \text{ cGy} \quad \text{w powietrzu}$$

Osoba pracująca w tym miejscu otrzyma:

$$0.087 \text{ cGy} \quad \text{-----} \quad 1 \text{ mSv}$$

$$3.2 \text{ cGy} \quad \text{-----} \quad H$$

$$H = \frac{3.2 \text{ cGy}}{0.087 \text{ cGy}} \cdot \text{mSv} = 36.8 \text{ mSv}$$

Zad.8.

Jaką grubość osłony z Zad.2 znalazłaby zastosowanie, by równoważnik dawki wynosił 0.2 mSv ?

Dane :  
H = 0.2 mSv

Szukane :  
l = ?

Rozwiązanie :

$$\begin{array}{l} 0.087 \text{ cGy} \text{ ----- } 1 \text{ mSv} \\ Y \text{ ----- } 0.2 \text{ mSv} \\ \text{-----} \end{array}$$

$$Y = 0.087 \text{ cGy} * 0.2 \text{ mSv} = 0.0174 \text{ mSv}$$

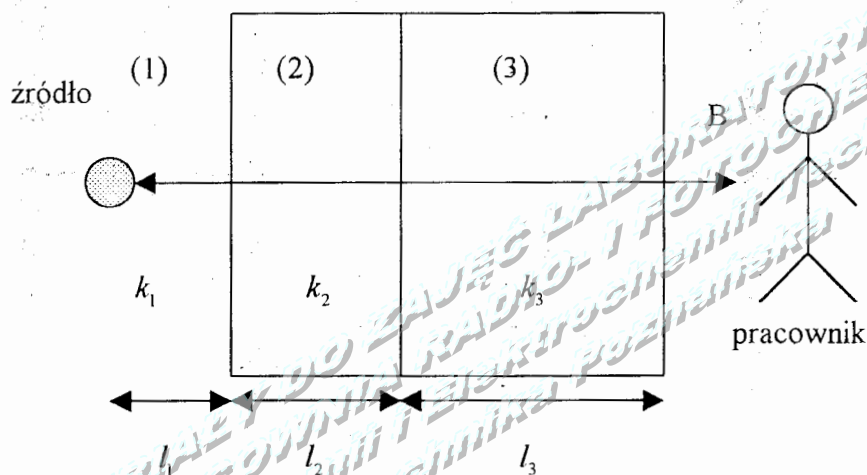
$$0.0174 \text{ mSv} = D = \frac{\Gamma * A}{k_x * l^2} * t$$

$$k_x = \frac{\Gamma * A}{0.0174 * l^2} * t = 37000 = 3.7 * 10^4$$

po odnalezieniu w Tablicach okazuje się, że tej wartości krotności osłabienia odpowiada grubość 10 cm ołowiu.

### Zad.9.

Określić wielkość dawki pochłoniętej odpromieniowania gamma w punkcie B, dla sytuacji przedstawionej na rysunku.



$D_3(B) = ?$

Rozwiązanie :

$D_1(B)$  - dawka w punkcie B, gdy istniał tylko materiał (1), tzn. powietrze, o grubości ( $l_1$ ) i krotności osłabienia ( $k_1$ ):



$$D_1(B) = \frac{\Gamma * A}{k_1 * (l_1 + l_2 + l_3)^2}$$

$D_2(B)$  - dawka w punkcie B, po wprowadzeniu osłony z materiału (2) o grubości ( $l_2$ ), o krotności osłabienia ( $k_2$ ):

$$D_2(B) = \frac{D_1(B)}{k_2} = \frac{\Gamma * A}{k_1 * k_2 * (l_1 * l_2 * l_3)^2}$$

$D_3(B)$  - dawka w punkcie B, po wprowadzeniu osłony z materiału (3), o grubości ( $l_3$ ) o krotności osłabiania ( $k_3$ ):

$$D_3(B) = \frac{D_2(B)}{k_3} = \frac{\Gamma * A}{k_1 * k_2 * k_3 * (l_1 + l_2 + l_3)^2}$$

#### Zad.10.

Obliczyć równowaznik dawki tygodniowej, jaki otrzymałby pracownik zatrudniony w odległości 0.8 m od źródła Hg - 203, o aktywności 3.7 GBq, po czasie 6 godzin dziennie w ciągu 5 dni.

Dane :

$$A = 3.7 \text{ GBq}$$

$$t = 6 * 5 = 30 \text{ godzin}$$

$$l = 0.8 \text{ m}$$

$$\Gamma = 3.1 * 10^{-3} \frac{\text{cGy} * \text{m}^2}{\text{h} * \text{GBq}}$$

Szukane :

$$H = ?$$

Rozwiązanie :

$H = Q * D$  ale  $Q = I$  bo mamy do czynienia z promieniowaniem gamma, zatem :

$$H = D$$

$$H = \frac{\Gamma * A}{l^2} * t = \frac{3.1 * 10^{-3} * 3.7}{(0.8)^2} * 30 = 0.5 \text{ cGy}$$

#### Obliczanie mocy dawek promieniowania beta.

Elektrony przechodząc przez materię tracą swoją energię na jonizację, wzbudzenie i promieniowanie hamowania. Dawka pochłonięta w materii jest wynikiem strat na jonizację i wzbudzenie, bowiem część związana z

promieniowaniem hamowania jest bardzo mała i praktycznie można ją zaniedbać. Cała zatem energia elektronów wnikających do elementu o wymiarach liniowych równych lub większych od ich maksymalnego zasięgu zostaje pochłonięta. W miarę przenikania do coraz głębszych warstw obiektu napromienianego energia elektronu maleje, powodując wzrost gęstości jonizacji i wypadkowe zmiany rozkładu mocy dawki pochłoniętej. Zatem średnia wartość mocy dawki dla warstwy o grubości równej zasięgowi elektronu, dla monoenergetycznego strumienia padającego prostopadle na płaską powierzchnię można opisać wzorem :

$$\dot{D} = C * \varphi * \frac{E_{sr}}{R}$$

gdzie : C - stała;

$\varphi$  - gęstość strumienia elektronów;

$E_{sr}$  - średnia energia elektronów padających na obiekt;

R - zasięg elektronów odpowiadających

$E_{sr}$

Wielkość R można oszacować, i tak przyjęto, że dla :

a/. energii  $E_{sr}$  w przedziale 0.7 ÷ 3 MeV

$$R = 0.542 * \frac{E_{sr}}{R} - 0.133$$

b/. energia  $E_{sr}$  mniejszej

$$R^2 + 0.22 * R = \left(\frac{E}{1.92}\right)^2$$

Zasięg R wyrażony jest w  $\left[\frac{g}{cm^2}\right]$ , a energia w MeV.

Przy porównywaniu obliczanych wartości dawek z wartościami największymi dopuszczalnymi (granicznymi) należy zawsze rozpatrywać przypadki najbardziej niekorzystne. Dla oceny zagrożenia trzeba zatem obliczyć maksymalną, a nie średnią wartość mocy równoważnika dawki w naświetlanym obiekcie.

Należy więc korzystać ze wzoru :

$$\dot{H} = k_e * \varphi \quad \left[ \frac{rem}{h} \right]$$

gdzie :  $\varphi$  - gęstość strumienia elektronów;

$k_e$  - współczynnik konwersji jednostkowe gęstości strumienia w  $[cm^{-2} * s^{-1}]$  na powierzchni ciała,

na moc równoważnika dawki, na głębokości odpowiadającej maksymalnej jego wartości  $\left[ \frac{\text{rem}}{h} \right]$ .

Wartości  $k_e$  zebrano w poniższej Tabeli 3 :

Energia elektronów [MeV]	$k_e \cdot 10^4 [\text{rem} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}]$
0.1	6.25
0.2	3.85
0.5	2.55
1.0	2.10
2.0	1.82
5.0	1.61
10.0	1.50
20.0	1.40
50.0	1.40
100.0	1.50

Tabela 3. Współczynnik konwersji  $k_e$  gęstości strumienia elektronów na moc równoważnika dawki, w funkcji energii elektronów.

Jeżeli źródło promieniowania beta o znanej aktywności A jest traktowane jako punktowe, to przy założeniu, że wszystkie elektrony mają energię średnią (najbardziej prawdopodobną), gęstość strumienia  $\varphi$  elektronów w odległościach  $d < R$  można znaleźć z wyrażenia :

$$\varphi = \frac{A}{4\pi \cdot l^2} \cdot e^{-\frac{\mu \cdot d}{\rho}} \cdot \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$$

gdzie: A - aktywność [GBq];

l - odległość od źródła [cm];

d - masa powierzchniowa;

$\frac{\mu}{\rho}$  - masowy współczynnik osłabienia promieniowania.

a w końcu otrzymamy wzór na moc równoważnika dawki :

$$\dot{H} = \frac{k_e \cdot A}{4\pi \cdot l^2} \cdot e^{-\frac{\mu \cdot d}{\rho}} \quad \left[ \frac{\text{rem}}{h} \right]$$

Znalezione z powyższego wzoru wartości mocy równoważnika dawki są bliskie rzeczywistym tylko dla określonego przedziału odległości l od źródła. Przedział

ten jest określony od dołu odległością dla której źródło można traktować jako punktowe, a od góry zasięgiem cząstek beta.

### Obliczanie mocy dawki promieniowania hamowania.

Jak wiemy, elektrony przechodząc przez materię zmieniają pod wpływem pola elektrycznego jąder swój kierunek i energię. Zmianom tym towarzyszy emisja promieniowania elektromagnetycznego zwanego promieniowaniem hamowania. Moc równoważnika dawki otrzymać możemy ze wzoru:

$$\dot{H} = \frac{k_f * 1.1 * 10^{-3} * Z * A}{4 \pi * l^2} \left[ \frac{\text{rem}}{\text{h}} \right]$$

gdzie A - aktywność źródła [Bq];

l - odległość od źródła [cm];

Z - liczba atomowa absorbenta;

$k_f$  - współczynnik konwersji strumienia fotonów na moc równoważnika dawki – Tablice 4.

Energia fotonów [keV]	$k_f * 10^7 \left[ \frac{\text{Sv} * \text{cm}^2 * \text{s}}{\text{h}} \right]$
0.1	1.47
0.15	2.38
0.2	3.45
0.3	5.56
0.4	7.7
0.5	9.1
0.6	11.4
0.8	14.7
1.0	17.9
1.5	24.4
2.0	30.3
3.0	40.0

Tabela 4. Współczynnik konwersji strumienia fotonów na moc równoważnika dawki w funkcji energii.