

Andrzej ZASTAWNY

TEORETYCZNE OSZACOWANIE MOCY DAWKI PROMIENIOWANIA
GAMMA W BUDYNKACH

Streszczenie. Wyprowadzono wzór na moc dawki P promieniowania gamma $P = (5,4 \cdot 10^6 k_T + 12,6 \cdot 10^6 k_U + 27,7 \cdot 10^2 k_K) \frac{\text{mber}}{\text{rok}}$ w budynkach w funkcji koncentracji k (g/g) toru(T), uranu(U) i potasu(K) w materiałach budynku.

WSTĘP

Szerokie stosowanie popiołów i żużli z elektrowni oraz hut do produkcji materiałów budowlanych zwróciło uwagę specjalistów i ogół społeczeństwa na problem potencjalnego zagrożenia promieniotwórczego w budynkach mieszkalnych, budowanych z takich materiałów.

Uzasadnieniem owego zainteresowania a raczej niepokoju jest fakt dużej koncentracji różnych domieszek a w tym i naturalnych pierwiastków promieniotwórczych w popiołach i żużlach w stosunku do materiałów wyjściowych - węgla, rudy itp. Problem ze dużych koncentracji pierwiastków radioaktywnych może też odnosić się do lokalnych naturalnych surowców wyjściowych dla celów budownictwa.

Przedmiotem rozważań będzie moc dawki w budynkach od promieniowania gamma rodzin promieniotwórczych toru i uranu oraz radioizotopu K-40 zawartych w materiałach budynku. Udział innych radioizotopów w całkowitej dawce jest przynajmniej dwa rzędy mniejszy, więc może być pominięty. Również efekt promieni alfa i beta będzie pominięty, ponieważ z powodu ich krótkiego zasięgu: (i) tylko b, cienka warstwa materiałów przy powierzchni ścian ma udział w dawce, (ii) dowolne pokrycie ścian (tynk, farba, tapeta) pochłania to promieniowanie, (iii) promieniowanie to naraża tylko odkryte części skóry, dla której dozwolone dawki są 5 do 10 razy większe od dawek dla całego ciała. Ponadto efekt radonu w powietrzu pomieszczeń będzie pominięty, ponieważ jego stężenie zależy od szybkości dyfuzji w materiałach budynku i intensywności wentylacji jest w szerokich granicach zmienne.

WZÓR NA MOC DAWKI

Rysunek 1 przedstawia 3 geometrie, dla których wzór na moc dawki będzie dyskutowany. Zgodnie z [1] moc dawki ekspozycyjnej P_E dla geometrii a) i b) wyraża się tym samym wzorem:

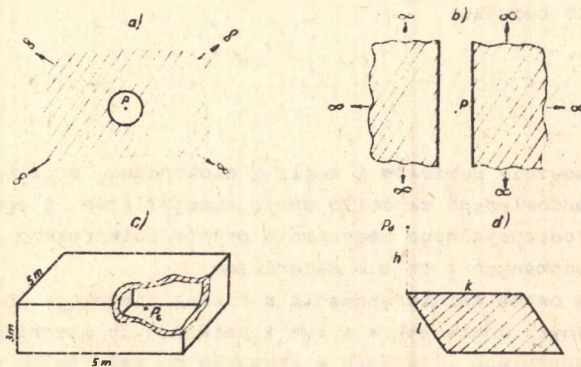
$$P_E = 4\pi \frac{K}{\mu} q. \quad (1)$$

gdzie:

K - stała jonizacyjna radioaktywnego materiału,

q - radioaktywność jednostki objętości,

μ - liniowy współczynnik osłabienia promieni gamma w materiale.



////-ośrodek materialny radioaktywny
 • -punkt w którym wyznaczono moc dawki

Rys. 1. Geometrie, dla których rozważa się wzory na moc dawki:

a - punkt ekspozycji w środku sferycznej wnęki o skończonym promieniu, otoczonej nieskończonym radioaktywnym ośrodkiem, b - punkt między dwiema równoległymi nieskończonymi płaszczyznami w skończonej odległości od siebie, za którymi rozciąga się radioaktywny ośrodek, c - w środku prostopadłościenu $5 \times 5 \times 3 \text{ m}^3$ o grubości ścian 30 cm wykonanych z radioaktywnego materiału (model typowego pokoju), d - punkt ekspozycji na wysokości h nad narożnikiem prostokąta o wymiarach l, k , wykonanego z radioaktywnego materiału

Dla geometrii c) pomocny jest wzór na moc dawki ekspozycji P_E w geometrii d) z rys. 1:

$$P_{Ed} = g(n,m)K\delta. \quad (2)$$

gdzie $g(n,m)$ jest funkcją przedstawioną graficznie w pracy [2], $n = k/l$, $m = l/h$, δ jest radioaktywnością jednostki powierzchni prostokąta l, k .

Dzieląc ściany prostopadłościanu z rys. 1 c) na 24 odpowiednie prostokąty, wzór na moc dawki ekspozycyjnej P_{Ec} dla geometrii c) może być zapisany:

$$P_{Ec} = 16g(n=0,6, m=1,0) + 8g(n=1,0, m=5/3)6K = 15,776K. \quad (3)$$

Ś można wyznaczyć ze wzoru na efektywną radioaktywność jednostki powierzchni warstwy o grubości $d = 30$ cm z uwzględnieniem efektu samopochłaniania:

$$\delta = (1 - e^{-\mu d}) \frac{g}{\mu}. \quad (4)$$

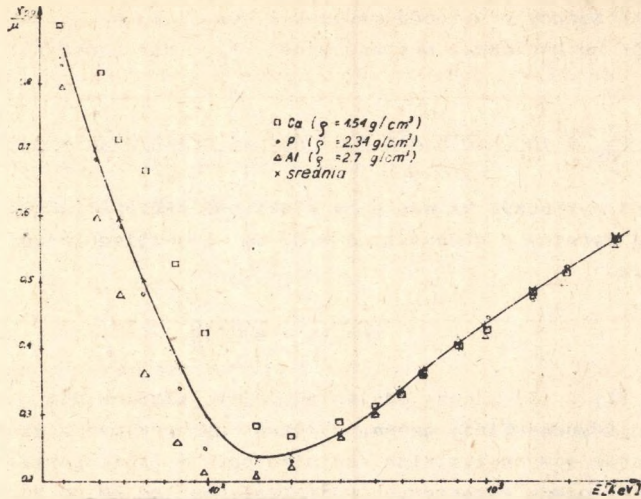
Wzory (1) i (3) z uwzględnieniem (4) są słuszne dla jednego radioizotopu z pojedynczą linią gamma. W rozważanym przypadku wzory (1) i (3) muszą zawierać sumy wszystkich radioizotopów i linii gamma. W zakresie energii kwantów gamma rozważanych radioizotopów (od 60 do 2600 keV). Współczynnik liczbowy $15,77 (1 - e^{-\mu d})$ we wzorze (3) zmienia się od wartości 14,2 do 12,3, podczas gdy współczynnik we wzorze (2) jest równy 12,6. Ponieważ ilościowy wkład do sum wyrażen K/μ jest większy dla większych energii, końcowa różnica liczbowa między wzorami (1) i (3) jest mniejsza^{x)} i jest około 10 razy mniejsza od szacowanego błędu wzorów. Dlatego można przyjąć, że wzór (1) aproksymuje zadowalająco wzór na moc dawki w dowolnej sytuacji, gdy miejsce ekspozycji jest otoczone materiałem budowlanym ze wszystkich stron.

Wartość mocy dawki ekspozycyjnej określona wzorem (1) lub (3) jest заниzona z powodu nieuwzględnienia efektu wielokrotnych rozprożeń kwantów gamma. Najprostszym sposobem uwzględnienia tego efektu w rozważanym przypadku jest wprowadzenie współczynnika absorpcji energii η kwantów gamma w miejsce współczynnika osłabienia μ . Stosunek η/μ jest przede wszystkim funkcją energii kwantów gamma, natomiast zależność od rodzaju pierwiastka chemicznego, szczególnie w interesującym zakresie energii (>100 keV), jest słaba.

Rysunek 2 prezentuje dane dla trzech pierwiastków chemicznych bliskich typowemu składowi cementu. Linia ciągła wyznacza wartości przyjęte dla cementu. Biorąc pod uwagę dodatkowo związek między współczynnikami liniowymi i masowymi pochłaniania promieni gamma, wzór (1) można zapisać w postaci:

$$P_E = \eta \frac{K}{\eta} Q. \quad (5)$$

^{x)} Wg dokładnych wyliczeń liczbowa różnica między wzorem (1) i (3) dla serii toru i radu są równe 2 i 3%.



Rys. 2. Stosunek masowego współczynnika absorpcji $\bar{\mu}_a$ do masowego współczynnika osłabienia kwantów gamma w funkcji energii dla Ca, P i Al [1]. Linia ciągła jest krzywą uśrednioną

gdzie:

$\bar{\mu}_a$ - masowy współczynnik absorpcji kwantów gamma,

Q - radioaktywność jednostki masy materiału.

Dane do wyliczenia sumy wyrażen $K/\bar{\mu}_a$ rozważanych radioizotopów są przedstawione w tab. 1. W przypadku szeregu uranu - 238 wydzielono dwie części, które są w równowadze promieniotwórczej. Wynika to z faktu, że między ^{234}Pa i ^{226}Ra są dwa radioizotopy ^{234}U i ^{230}Th z długimi półokresami rozpadu $2,48 \cdot 10^5$ i $8,0 \cdot 10^4$ lat. Tak więc szereg uranowy jako całość w ogólności nie musi być w równowadze promieniotwórczej. Podstawiając odpowiednie sumy $\sum K_i/\bar{\mu}_i$ do wzoru (5) w miejsce $K/\bar{\mu}$ i transformując do użytecznych jednostek, otrzymuje się wzór na całkowitą moc dawki:

$$P = (48,5 \cdot Q_T + 37,6 \cdot Q_R + 0,6 \cdot Q_U + 3,28 \cdot Q_K) \frac{\text{mber g}}{\text{rok pc}} \quad (6)$$

gdzie Q z indeksem T, R, U, K oznacza radioaktywność odpowiednio toru, radu, uranu - 238 i potasu - 40 na jednostkę masy materiału.

Gdy przyjąć, że szereg uranowy jest w równowadze, to $Q_R = Q_U$. Można wtedy wzór na moc dawki wyrazić przez koncentracje k_T , k_U i k_K (w jednostkach g/g) toru, uranu i potasu w materiale:

^{x)} Przyjęto, że moc dawki ekpozycji 1 R odpowiada w organizmie ludzkim mocy dawki 0,95 rada oraz 1 rad = 1 ber.

Tablica 1

Wyliczone stosunki K_1/\bar{q}_1 cząstkowych stałych jonizacji do masowego współczynnika absorpcji całego widma gamma toru, uranu (^{235}U sprowadzony do rozpadów ^{238}U) i potasu na podstawie [1, 3, 7] i wykresu z rys. 2

E_1 [keV]	K_1/\bar{q}_1 [R . g/mCi.h]			
	tor	szereg ^{238}U do ^{234}Pa + + szereg ^{235}U	^{226}Ra z prod.	potas
60 - 100	3,5	0,4	1,5	-
101 - 200	0,6	0,9	1,1	-
201 - 300	25,7	0,6	16,3	-
301 - 400	7,5	0,6	28,4	-
401 - 600	47,7	0,2	-	-
601 - 800	21,7	1,2	76,6	-
801 - 1000	92,2	1,6	6,7	-
1001 - 1300	2,8	-	64,0	-
1301 - 1600	42,5	-	39,7	31,4
1601 - 1900	5,8	-	81,1	-
1901 - 2200	-	-	6,6	-
2201 - 2500	-	-	38,1	-
2615	215	-	-	-
$\sum K_1/\bar{q}_1$	465	5,4	360,1	31,4

$$P = (5,4 \cdot 10^6 k_T + 12,6 \cdot 10^6 k_U + 27,7 \cdot 10^2 k_K) \frac{\text{mber} \cdot \text{x}}{\text{rok}} \quad (7)$$

Bez uwzględnienia efektu wielokrotnych rozprożeń otrzymuje się wzory na wartości mocy dawki około 2 razy mniejsze od wzorów (6) i (7).

DYSKUSJA

Aby ocenić dokładność wzorów (6) i (7) należy uwzględnić dwa fakty: (i) Gdy efekt wielokrotnych rozprożeń pominię się, wtedy moc dawki - nie pewno zbyt mała - jest równa około połowie wyznaczonej wzorami (6) i (7).

(ii) Inna metoda uwzględnienia efektu wielokrotnych rozprożeń polega na wprowadzeniu współczynnika wzrostu określanego dla konkretnych geometrii źródła - punkt ekapozycji.

x) Przyjęto $T_{1/2} (^{40}\text{K}) = 1,29 \cdot 10^9$ lat oraz koncentrację ^{40}K w naturalnym potasie $1,19 \cdot 10^{-4}$.

Porównanie tych dwu metod dla geometrii punktowe źródło i punkt ekspozycji w nieskończonym jednorodnym ośrodku w odległości równej średniej drodze kwantów gamma prowadzi do konkluzji, że dla energii kwantów gamma 3 MeV moce dawek wyliczone obiema metodami, dają te same wyniki. Natomiast dla energii mniejszych wyliczona moc dawki metodą przyjętą w pracy jest systematycznie mniejsza, tak że przy energii 0,5 MeV różnica dochodzi do 30%. Zgodnie z pewnymi danymi [1], dokładność drugiej metody jest równa kilka procent.

Biorąc pod uwagę powyższe ocenia się dokładność wzorów (6) i (7) równą $\pm 25\%$.

Ponieważ współczynniki absorpcji promieni gamma cementu i głównych składników litosfery są bliskie sobie dla energii powyżej 100 keV, wartość $(1/2)P$ wg wzoru (7) może być przyjęta dla oceny dawki od otoczenia - patrz rys. 1, geometria b).

Można też porównać wzór (7) a ściślej $(1/2)P$ ze wzorem na moc dawki P' od otoczenia na wysokości 1 m nad powierzchnią ziemi, zaproponowany w [4], a wyliczony metodami Monte Carlo.

Wzór ten przekształczony do przyjętych w pracy jednostek z przeliczeniem, że 1 Rentgen jest równoważny 0,95 rada, ma postać:

$$P' = (2,58 \cdot 10^6 k_T + 5,25 \cdot 10^6 k_U + 12,6 \cdot 10^2 k_K) \frac{\text{mber}}{\text{rok}} \quad (8)$$

Tablica 2

Koncentracje toru, uranu i potasu
w niektórych minerałach i wyliczone moce dawki $\frac{1}{2} P$ oraz P

Minerał	Koncentracje mber/rok				
	Th 10^{-6}	U 10^{-6}	K 10^{-2}	$(1/2)P$	P
Granit ¹⁾	23	3,6	3,7	136	125
Bazalt ¹⁾	3,5	0,8	1,0	28,7	26
Litosfera ²⁾	11,5	3,0	2,5	84,9	77

1) Średnie wartości dwu standartów ZSRR i jednego USA [6].

2) Średnia wartość [5].

W tablicy 2 są podane koncentracje w niektórych minerałach i wyliczone wartości $(1/2)P$ oraz P' . Różnice między wyliczonymi wartościami nie przekraczają 10%. Wartości wyliczone można też porównać z mierzonymi w określonych sytuacjach - tab. 3.

Tablica 3

Pomierzone moce dawek [1], [5]

Sytuacja	Moc dawki [mber/rok]
Skały	20-120
Granity we Francji	180-350
Niektóre miasta w USA	85-165
W budynkach z betonu (Szwecja)	160-200
W budynkach z cegły (Szwecja)	100-110

LITERATURA

- [1] Kimmel L.R., Mashkovich V.L.: Zashchita ot jonizirujuszczich izluczenii. Atomizdat, 1966.
- [2] Bergelcen B.R., Zorikojev G.A.: Spravochnik po zashchite ot izluczenija protjazennykh istochnikov. Atomizdat, 1965.
- [3] Gusev N.G., Mashkovich W.L., Werbickii B.W.: Radioaktivnyje izotopy kak gamma izluczateli. Atomizdat, 1964.
- [4] Lovborg L., Kirkegaard P.: Nucl. Instrum. Meth., 121, 239 (1974).
- [5] Israel H., Krebe A.: Kernsthlung in der Geophysik, Springer - Verlag. Berlin - Göttingen - Heidelberg, 1962.
- [6] Sobornov O.P., Poljakov A.I., Geokhimijs, 2, 307 (1975).
- [7] Bobrov V.A., Krendelew F.P., Gofman A.M.: Trans. Inst. Geology and Geophysics, Acad. Sci. USSR, Siberian Branch, iss. 329, Nowosibirsk 1975.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЗЫ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗДАНИЯХ

Резюме

Выведено формулу на дозу P гамма излучения в зданиях как функцию концентрации тория, урана и калия $P = (5,4 \cdot 10^6 k_T + 12,6 \cdot 10^6 k_U + 27,7 \cdot 10^6 k_K)$ мрем/год, где k с индексом Т, у и К определяет концентрацию (г/г) тория, урана и калия в строительной материале.

THEORETICAL CALCULATION OF THE GAMMA RADIATION DOSE RATE IN BUILDINGS

Summary

A formula on the gamma radiation dose rate in buildings as a function of the thorium, uranium and potassium in the building material is derived

in the form of $(P = 5,4 \cdot 10^6 k_T + 12,6 \cdot 10^6 k_U + 27,7 \cdot 10^2 k_K)$ mrad/year, where P is the dose rate and k with $T, U, K,$ is concentration (g/g) of the thorium, uranium and potassium in the building material.