

Ćwiczenie 96

Dozymetria promieniowania jonizującego

Cel ćwiczenia

Zapoznanie się z podstawami dozymetrii promieniowania jonizującego. Sprawdzenie prawa osłabienia promieniowania γ .

Wprowadzenie

Promieniowanie jonizujące od zawsze stanowi element naturalnego otoczenia człowieka. Naturalne źródła promieniowania obejmują promieniowanie kosmiczne docierające do Ziemi ze Słońca i z galaktyk spoza Układu Słonecznego oraz promieniowanie pochodzące od radionuklidów naturalnych występujących w środowisku. Obecność tych nuklidów powoduje bądź ekspozycję zewnętrzną (znajdujemy się w polu promieniowania emitowanego przez te nuklidy) bądź wewnętrzną (poprzez wniknięcie nuklidów do organizmu). Wśród radionuklidów naturalnych najważniejsze to: izotop potasu K-40 oraz nuklidy szeregu uranowo-radowego i torowego, których nuklidami macierzystymi są odpowiednio U-238 i Th-232. Radionuklidy naturalne są obecne, w różnym stężeniu, we wszystkich elementach środowiska. Z kolei sztuczne źródła promieniowania są związane z działalnością człowieka i obejmują wykorzystanie źródeł promieniowania jonizującego w medycynie, energetyce jądrowej, przemyśle, technice, nauce itp. Wartość rocznej dawki skutecznej promieniowania jonizującego otrzymywanej przez statystycznego mieszkańca Polski ze źródeł naturalnych wynosi około 2,4 mSv (50% tej dawki pochodzi od promieniotwórczego gazu Ra-222, obecnego w powietrzu), zaś ze źródeł sztucznych (głównie diagnostyka rentgenowska) około 1,4 mSv.

Promieniowanie jonizujące oddziałuje na organizmy żywe (nie tylko ludzi) głównie w wyniku wzbudzenia i jonizacji atomów żywych komórek i poprzez procesy radiolizy wody. Pochłonięcie energii promieniowania przez układy biologiczne zapoczątkowuje w nich szereg złożonych procesów fizykochemicznych i biochemicznych. Powstają wtedy jony lub grupy zjonizowanych atomów, a także wysoce aktywne chemicznie rodniki (cząsteczki lub atomy, posiadające niesparowane elektrony), które z kolei oddziałują na makromolekuły takie jak białka, tłuszcze, cukry czy kwasy nukleinowe. W ten sposób dochodzi do uszkodzeń ważnych biologicznie struktur, co w konsekwencji może prowadzić do zaburzeń funkcjonowania organizmu na różnych poziomach jego organizacji (komórki, tkanki, organy, cały organizm).

Efekty oddziaływania promieniowania jonizującego na organizm dzieli się na deterministyczne oraz stochastyczne.

Skutki deterministyczne są progowe tzn. występują po przekroczeniu określonej dawki. Przykładami skutków deterministycznych są zaćma oraz choroba popromienna (tzw. ostry zespół popromienny), która występuje dla dawek przekraczających 1000 mSv. Śmiertelną dawkę promieniowania $LD_{30,50}$ definiuje jako dawkę, która powoduje śmierć 50% osobników w ciągu 30 dni po napromieniowaniu; dla człowieka wynosi ona około 4000 mSv.

Skutki stochastyczne mają natomiast charakter bezprogowy (mogą wystąpić już dla bardzo małych dawek) i ujawniają się w długiej perspektywie czasowej (kilka, a nawet kilkadziesiąt lat). Wśród skutków stochastycznych wyróżniamy nowotwory (np. białaczka, nowotwory płuc i tarczycy) oraz skutki genetyczne, które występują w komórkach rozrodczych, a zatem mogą one ujawniać się w kolejnych pokoleniach.

Podstawowymi wielkościami stosowanymi w dozymetrii i ochronie radiologicznej są aktywność i dawka.

Aktywność A jest wielkością charakteryzującą substancję promieniotwórczą. Definiuje się ją jako średnią liczbę jąder rozpadających się w jednostce czasu.

Jednostką aktywności w układzie SI jest 1 bekerel (symbol Bq), odpowiadający jednemu rozpadowi na sekundę. Jednostką pozaukładową, nadal stosowaną jest kiur (Ci).

Aktywność jest wielkością ściśle związaną z liczbą jąder promieniotwórczych źródła N ,

$$A = \lambda \cdot N, \quad (1)$$

a ta z kolei podlega prawu rozpadu promieniotwórczego, według wzoru

$$N = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (2)$$

gdzie:

N_0 – liczba jąder izotopu promieniotwórczego w chwili t_0 ,

N – liczba jąder tego izotopu, które po czasie t nie uległy jeszcze rozpadowi,

λ – stała rozpadu.

W konsekwencji aktywność A maleje w czasie zgodnie z następującym równaniem:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}. \quad (3)$$

Wielkością opisującą spadek aktywności w czasie jest, oprócz stałej λ , czas połowicznego rozpadu $T_{1/2}$, czyli czas, po upływie którego aktywność źródła maleje do połowy aktywności początkowej A_0 . Między stałą rozpadu λ a czasem połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ danego radionuklidu zachodzi związek:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}. \quad (4)$$

Znajdując się w polu promieniowania jonizującego ulegamy napromienieniu (ekspozycji). W praktyce spotykamy się z kilkoma wielkościami określającymi napromienienie i określanymi jako dawka: są to m.in. dawka pochłonięta, dawka równoważna i skuteczna.

Dawka pochłonięta D jest to średnia energia $d\bar{\epsilon}$ przekazana przez promieniowanie jonizujące elementowi objętości ośrodka, podzielona przez masę dm tego elementu:

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}. \quad (5)$$

Nieco upraszczając, dawkę pochłoniętą można też określić jako średnią energię przekazaną ośrodkowi przez promieniowanie, przypadającą na jednostkę masy ośrodka.

Jednostką dawki pochłoniętej w układzie SI jest grej (Gy). Jest to dawka odpowiadająca przekazaniu jednemu kilogramowi ośrodka energii 1 dżula (J); tak więc $1\text{Gy} = 1\text{J}/1\text{kg}$.

Ponieważ nasilenie skutków biologicznych zależy nie tylko od dawki pochłoniętej, wprowadzono pojęcie dawki skutecznej (efektywnej) E^* . Uwzględnia ono nie tylko wielkość dawki pochłoniętej, ale również rodzaj i energię promieniowania (poprzez czynnik wagowy w_R) i wrażliwość poszczególnych narządów na promieniowanie (poprzez czynnik wagowy w_T).

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}, \quad (6)$$

gdzie:

w_T – czynnik wagowy narządu; jego wartość dla przykładowych organów wynosi: gonady - 0,20, czerwony szpik kostny - 0,12, żołądek - 0,12, tarczyca - 0,05; suma współczynników w_T dla wszystkich narządów wynosi 1,00,

w_R – czynnik wagowy promieniowania; jego wartość dla fotonów i elektronów wynosi 1, dla cząstek alfa 20, a dla neutronów zależy od energii neutronu i zmienia się w zakresie 5 - 20,

* Obecnie obowiązujący system wielkości dozymetrycznych, a więc i pojęcie dawki skutecznej, został wprowadzony w latach 90-ych XX wieku. Część podręczników akademickich nadal używa starej, tradycyjnej terminologii (np. pojęcia równoważnika dawki).

- $D_{T,R}$ [Gy] - średnia dawka pochłonięta w narządzie T (np. płuca, tarczyca), pochodząca od promieniowania R (np. promieniowanie γ , cząstki α , neutrony).

Drugi człon w powyższym wzorze ($\sum w_R D_{T,R}$) odpowiada za dawkę otrzymywaną przez dany narząd od wszystkich rodzajów promieniowania; dlatego po zsumowaniu po narządach dawka skuteczna przynosi informację o ekspozycji całego ciała.

Jednostką dawki skutecznej w układzie SI jest siwert (Sv). Ponieważ czynniki wagowe są bezwymiarowe $1 \text{ Sv} = \text{J/kg}$.

Moc dawki skutecznej zdefiniowana jest jako stosunek:

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} \quad (7)$$

gdzie: dE - przyrost dawki skutecznej w czasie dt .

Mówiąc prościej, jest to dawka przypadająca na jednostkę czasu. Używaną w praktyce jednostką mocy dawki skutecznej jest Sv/h.

Moc dawki pochłoniętej \dot{D} wokół nieosłoniętego źródła punktowego, określa się za pomocą wzoru (w nawiasach podano zwyczajowo stosowane jednostki):

$$\dot{D} = \frac{\Gamma_r \cdot A}{r^2}, \quad (8)$$

gdzie:

\dot{D} jest wyrażona w cGy/h,

Γ_r – tzw. równoważna wartość stałej ekspozycyjnej, charakterystyczna dla danego radionuklidu [$\text{cGy m}^2 \text{ h}^{-1} \text{ GBq}^{-1}$],

A – aktywność źródła promieniotwórczego [GBq],

t – czas narażenia [h],

r – odległość między źródłem a miejscem, dla którego obliczamy dawkę [m].

W celu zminimalizowania skutków oddziaływania promieniowania na organizm ludzki należy pamiętać o trzech głównych zasadach, obowiązujących w czasie pracy ze źródłami promieniotwórczymi: zwiększeniu odległości od źródła, skróceniu czasu przebywania w pobliżu źródła oraz o stosowaniu odpowiednio dobranych osłon. Dobierając materiał na osłonę musimy uwzględnić rodzaj promieniowania i jego oddziaływanie z materią. Dla ochrony przed promieniowaniem γ i X, które jest znacznie bardziej przenikliwe niż promieniowanie α czy β o tej samej energii, jako osłony stosuje się zwykle ołów, uran zubożony, stal i beton. Natomiast osłony przed promieniowaniem β powinny być wykonane z lekkich materiałów np. aluminium lub pleksi. Jeśli chodzi o cząstki α , których zasięg w powietrzu nie przekracza kilku centymetrów, to zatrzymuje je już kartka papieru. Osłonę przed neutronami zapewniają materiały spowalniające neutrony – takie jak woda czy parafina i umieszczone za nimi materiały pochłaniające spowolnione neutrony, np. kadm.

Jeżeli źródło promieniotwórcze osłonimy to rejestrowana moc dawki będzie niższa niż w przypadku pomiaru bez osłony (absorbentu). W szczególności, w przypadku wąskiej, skolimowanej wiązki monoenergetycznych fotonów, np. promieniowania γ , proces ten jest opisany przez eksponencjalne prawo osłabienia:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}, \quad (9)$$

gdzie:

I_0 – natężenie promieniowania, w przypadku braku osłony,

I – natężenie promieniowania, po przejściu przez osłonę,

x – grubość osłony [cm],

μ - liniowy współczynnik osłabienia [cm^{-1}].

Wzór ten można przedstawić również w postaci

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot x}, \quad (10)$$

gdzie:

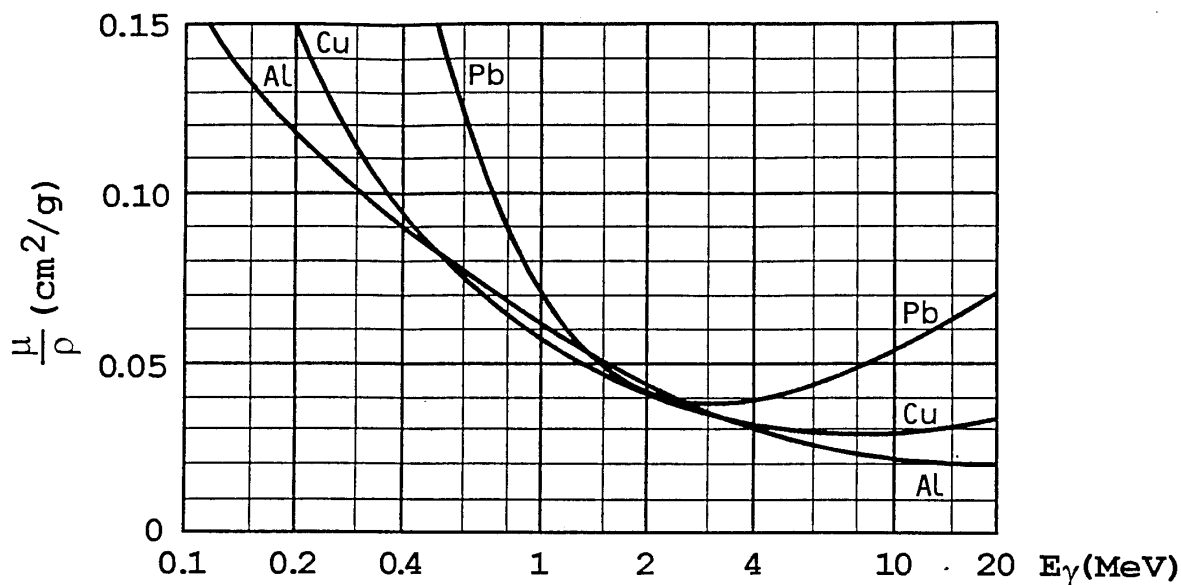
μ_m – masowy współczynnik osłabienia [cm^2/g],

ρ – gęstość materiału [g/cm^3].

Między liniowym a masowym współczynnikiem osłabienia zachodzi związek:

$$\mu_m = \mu / \rho, \quad (11)$$

gdzie ρ - gęstość materiału osłony.



Rys. 1. Zależność masowego współczynnika osłabienia μ_m od energii promieniowania γ , dla aluminium, miedzi i ołowiu

W celu ograniczenia narażenia na promieniowanie populacji i osób narażonych zawodowo wprowadza się dawki graniczne promieniowania jonizującego. Są to wielkości dawek, które, poza przypadkami przewidzianymi w przepisach, nie mogą być przekroczone. Na przykład, dla osób narażonych zawodowo roczna dawka skuteczna nie może przekraczać 20 mSv, zaś dla ogółu ludności 1 mSv.

Do pomiaru dawki promieniowania służą przyrządy zwane dozymetrami lub radiometrami. Mierzą one zwykle moc dawki pochłoniętej w powietrzu (w $\mu\text{Gy}/\text{h}$) bądź moc dawki skutecznej (w $\mu\text{Sv}/\text{h}$). Najczęściej stosowanymi detektorami w radiometrach są liczniki Geigera-Müllera.

Literatura

Cz. Bobrowski, Fizyka, krótki kurs. Warszawa, PWN 2021.

Z.A. Hryniewicz, Człowiek i promieniowanie jonizujące. Warszawa, PWN 2001.

B. Dziunikowski, O fizyce i energii jądrowej, Kraków, AGH Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne 2001. <http://winntbg.bg.agh.edu.pl/skrypty3/0361/>

T. Niewiadomski, O promieniowaniu jonizującym popularnie. Warszawa, Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich 1991.