

Tadeusz Musiałowicz  
Centralne Laboratorium Ochrony Radiologicznej

Autor wyraża podziękowanie mgr inż. Januszowi Henschke za cenne uwagi

## WYZNACZANIE DAWEK PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO W CELU OCENY NARAŻENIA

### 1. Podstawowe wielkości w ochronie radiologicznej

#### Dawka pochłonięta

Średnia energia  $d\bar{\varepsilon}$  przekazana przez promieniowanie jonizujące materii w elemencie objętości o masie  $dm$ .

$$D = d\bar{\varepsilon} / dm$$

Jednostką dawki pochłoniętej w układzie SI jest džul na kilogram  $J\ kg^{-1}$ .

Specjalną nazwą jednostki dawki pochłoniętej jest grej Gy.

$$1\text{Gy} = 1\text{ J kg}^{-1}.$$

#### Średnia dawka pochłonięta

Dawka pochłonięta uśredniona w narządzie lub tkance T organizmu o masie  $m_T$ .

$$D_T = \varepsilon_T / m_T$$

#### Dawka równoważna

Średnia dawka pochłonięta w narządzie lub tkance  $D_{T,R}$  ważona dla rodzaju i energii promieniowania jonizującego R. Wagą jest bezwymiarowy czynnik promieniowania  $w_R$ . Wartości czynnika podane są rozporządzeniu Rady Ministrów /1/.

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

Jednostką dawki równoważnej w układzie SI jest džul na kilogram  $J\ kg^{-1}$ .

Specjalną nazwą jednostki dawki równoważnej jest siwert Sv.

#### Dawka efektywna

Suma ważonych dawek równoważnych /dawka podwójnie ważona/ we wszystkich określonych w rozporządzeniu /1/ tkankach i narządach ciała od narażenia zewnętrznego i wewnętrznego. Wagą jest bezwymiarowy czynnik tkanki  $w_T$ . Wartości czynnika dla wchodzących w rachubę narządów i tkanek podane są w w. rozporządzeniu /1/.

$$E = \sum_T w_T H_T$$

#### Obciążająca dawka równoważna

Dawka równa całce w czasie  $\tau$  z mocy dawki równoważnej w tkance lub narządzie T, którą otrzymuje osobnik w wyniku wniknięcia do organizmu nuklidu promieniotwórczego.

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T dt$$

$t_0$  – moment wniknięcia nuklidu do organizmu

$\tau$  - czas odpowiadający rozpatrywanemu okresowi narażenia organizmu

### Obciążająca dawka efektywna

Suma iloczynów obciążających dawek równoważnych  $H_T$  i odpowiednich czynników wagowych tkanki  $w_T$

$$E(\tau) = \sum_T w_T H_T(\tau)$$

Praktycznie rozpatrywany okres narażenia organizmu to 50 lat dla pracowników (osoby dorosłe) i 70 lat dla ludności (dzieci).

### Całkowita dawka efektywna

$E_T$  – termin ten wprowadziła w przepisach /2/ (nie definiując go w słowniku) Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (IAEA). Określony jest on wzorem omówionym w p. 4 „Ocena narażenia”.

### Zbiorowa (kolektywna) dawka efektywna

Iloczyn liczby osób  $N_i$  w grupie  $i$  i średniej dawki efektywnej  $E_i$  w tej grupie osób narażonych od określonego źródła promieniowania.

$$S_i = N_i E_i$$

Jeśli populacja narażonych od określonego źródła osób składa się z różnych grup, dawka zbiorowa tej populacji jest sumą dawek w poszczególnych grupach.

$$S = \sum_i N_i E_i$$

Jednostką dawki zbiorowej jest osobo siwert.

Wielkość ta jest stosowana głównie dla przeprowadzania procedury optymalizacji w ochronie radiologicznej. Jest ona oparta na przyjętej, przy ocenie stochastycznych skutków promieniowania, hipotezie LNT (linear non threshold) i sens jej stosowania jest ostatnio mocno krytykowany. Została jednak utrzymana przez Międzynarodową Komisję Ochrony Radiologicznej (ICRP) w projekcie nowych zaleceń.

## **2. Wielkości operacyjne**

### Równoważnik dawki

Iloczyn dawki pochłoniętej  $D$  w określonym punkcie tkanki i czynnika jakości promieniowania  $Q$ . Bezwymiarowy czynnik jakości promieniowania jest zależny od wartości liniowego przekazania energii przez promieniowanie jonizujące.

$$H = QD$$

Jednostką równoważnika dawki w układzie SI jest dżul na kilogram  $J kg^{-1}$ .

Specjalną nazwą jednostki równoważnika dawki jest siwert  $Sv$ .

### Przestrzenny równoważnik dawki

$H^*(d)$  - równoważnik dawki w punkcie pola promieniowania jaki był by wytworzony przez odpowiednie rozciągle i zorientowane<sup>1</sup> pole w kuli ICRU (Międzynarodowa Komisja Jednostek Radiologicznych) na głębokości  $d$ , na promieniu przeciwnym do kierunku pola zorientowanego.

Wielkość tą mierzymy, w celu kontroli otoczenia, w referencyjnym punkcie pola promieniowania przenikliwego, przyjmując głębokość  $d = 10 \text{ mm}$  -  $H^*(10)$ .

### Kierunkowy równoważnik dawki

$H(d, \Omega)$  - równoważnik dawki w punkcie pola promieniowania, jaki byłby wytworzony przez odpowiednie rozciągle<sup>2</sup> pole w kuli ICRU na głębokości  $d$ , na promieniu skierowanym w określonym kierunku,  $\Omega$ .

Wielkość tą mierzymy, w celu kontroli otoczenia, w referencyjnym punkcie pola promieniowania mało przenikliwego, przyjmując głębokość  $d = 0,07 \text{ mm}$  -  $H(0,07, \Omega)$ . Wystarcza to praktycznie także dla oceny narażenia soczewek oczu (mimo że znajdują się na głębokości 3 mm).

### Indywidualny równoważnik dawki

$H_p(d)$  - równoważnik dawki w miękkiej tkance na odpowiedniej głębokości  $d$ , poniżej określonego punktu ciała.

Określony punkt to miejsce, reprezentatywne dla oceny narażenia, gdzie noszony jest dawkomierz indywidualny. Odpowiednia głębokość dla promieniowania przenikliwego to  $d = 10 \text{ mm}$ , a dla mało przenikliwego  $d = 0,07 \text{ mm}$ . Przy kontroli wybiórczego narażenia kończyn również dla promieniowania przenikliwego mierzy się -  $H_p(0,07)$

.

## **3. Biologiczne skutki napromienienia**

Analizując narażenie człowieka na promieniowanie, bierzemy pod uwagę dwa rodzaje jego skutków: deterministyczne i stochastyczne.

Skutki deterministyczne to reakcja tkanek występująca w krótkim okresie po napromienieniu. Mogą one wystąpić jedynie po przekroczeniu pewnego progu dawki, a ich ostrość zależy od tego jak znacznie próg ten został przekroczony. Uważa się, że żadna z tkanek nie wykazuje promienioczułości poniżej dawki około 100 mGy (niezależnie od wartości liniowego przekazania energii).

Przestrzeganie podanych w przepisach limitów dawek równoważnych zabezpiecza przed skutkami deterministycznymi. Limity dawek równoważnych ustalono dla skóry, kończyn i soczewek oczu. Tkanki te są najbardziej narażone na możliwość selektywnego, lokalnego napromienienia i w tym przypadku limity dawki efektywnej nie zabezpieczają wystarczająco przed efektami deterministycznymi.

<sup>1</sup> Pole rozciągle i zorientowane: pole promieniowania, w którym fluencja cząstek oraz jego kierunkowy i energetyczny rozkład są takie same jak w polu rozciągłym ale fluencja jest jednokierunkowa.

<sup>2</sup> Pole rozciągle: pole wyznaczone na podstawie pola rzeczywistego, w którym fluencja cząstek i jego kierunkowy i energetyczny rozkład, we wchodzącej w rachubę objętości, mają te same wartości jak w rzeczywistym polu w rozpatrywanym punkcie.

Skutki stochastyczne to przede wszystkim zwiększenie prawdopodobieństwa indukowania nowotworów i zmian genetycznych. Nowotwory mogą powstawać w wyniku mutacji komórek somatycznych, a genetyczne uszkodzenia potomstwa, w wyniku mutacji komórek reprodukcyjnych. Efekty stochastyczne występują w długim okresie po napromienieniu (kilka a nawet kilkadziesiąt lat). Ich ostrość nie zależy od wartości dawki, od której zależy jedynie prawdopodobieństwo ich wystąpienia. Przyjmuje się, że nie ma tu progu dawki. (hipoteza LNT). Przestrzeganie podanych w przepisach limitów dawki efektywnej, zmniejsza do akceptowanego, w ochronie radiologicznej, poziomu prawdopodobieństwa wystąpienia skutków stochastycznych promieniowania oraz zabezpiecza, nie napromieniane selektywnie narządy i tkanki, z dużym zapasem przed efektami deterministycznymi.

#### 4. Ocena narażenia

Limitowane w przepisach, związane z narażeniem organizmu człowieka wielkości, dawka równoważna i dawka efektywna, nie są mierzalne. Dla ich oceny posługujemy się w dozymetrii wskaźnikami – wielkościami operacyjnymi. Stosując wielkości operacyjne, należy pamiętać, że dla spełnienia wymagań ochrony radiologicznej, niezbędne jest zapewnienie pesymistycznej oceny narażenia tzn. określenie najwyższych z prawdopodobnych wartości napromienienia człowieka.

Przy określaniu dawki posługujemy się różnymi, w zależności od potrzeb, wielkościami równoważnika dawki. Zostało to ogólnie omówione w punkcie „wielkości operacyjne”. Szczegóły podane są w zestawieniach poniżej.

Kontrola dawek równoważnych w skórze, kończynach i soczewkach oczu.

Kontrola otoczenia: mierzy się równoważnik dawki kierunkowy  $H(0,07, \Omega)$ .

Kontrola indywidualna: mierzy się równoważnik dawki indywidualny  $H_p(0,07)$

Stosując tę praktyczną akceptowaną przez ICRP zasadę, przy dobieraniu odpowiedniego równoważnika dawki, niema potrzeby kierowania się określeniem czy promieniowanie jest silnie czy mało przenikliwe.

Dla soczewek oczu można spotkać się ze stosowaniem równoważników  $H(3, \Omega)$  i  $H_p(3)$ , ale jest to w praktyce bardzo rzadko stosowane.

Kontrola dawek równoważnych jest stosunkowo prosta. Do pomiaru wybiera się reprezentatywne, najbardziej narażone miejsce i zakłada się, że tkanka jest napromieniana równomiernie. Można wtedy przyjąć że moc dawki lub dawka, odpowiada mierzonej mocy równoważnika lub równoważnikowi dawki. Pomiarów indywidualnych dokonuje się najczęściej na palcu lub/i nadgarstku ręki. Przy pomiarach środowiskowych trzeba jeszcze właściwie ocenić czas narażenia.

Kontrola dawki efektywnej

Kontrola otoczenia: mierzy się równoważnik dawki przestrzenny -  $H^*(10)$ .

Kontrola indywidualna: mierzy się równoważnik dawki indywidualny -  $H_p(10)$

Dawka efektywna to suma napromienienia organizmu od źródeł zewnętrznych i wewnętrznych. Gdy przy ocenie narażenia w rachubę wchodzi jedynie narażenie zewnętrzne, sprawa kontroli jest tak samo prosta jak przy ocenie dawki równoważnej. Przy pomiarach indywidualnych dawkomierz umieszcza się w reprezentatywnym miejscu na korpusie ciała (najczęściej na wysokości klatki piersiowej) i mierzy się równoważnik dawki  $H_p(10)$ , który przy równomiernym napromienieniu odpowiada dawce efektywnej.

Gdy zachodzi potrzeba oceny składowej narażenia od źródeł promieniowania znajdujących się wewnątrz organizmu sprawa jest znacznie bardziej skomplikowana.

Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej chcąc ułatwić wdrażanie zaleceń ICRP /3/ rozwinęła praktycznie w swoich przepisach /2/ wzór  $E = \sum_T w_T H_T$  określający dawkę

efektywną. Całkowita dawka efektywna:  $E_T = H_p(d) + \sum_j e(g)_{j,ing} I_{j,ing} + \sum_j e(g)_{j,inh} I_{j,inh}$

gdzie:  $H_p(d)$  – indywidualny równoważnik dawki promieniowania przenikliwego ( t.zn.  $d=10$ )  
 $e(g)_{j,ing}$  i  $e(g)_{j,inh}$  - oznaczają jednostkowe obciążające dawki efektywne osób w grupie wiekowej  $g$  / podział na grupy wiekowe dotyczy narażenia ludności/ otrzymane w wyniku wniknięcia do organizmu drogą pokarmową ( ing ) lub oddechową ( inh ) jednostkowej aktywności nuklidu promieniotwórczego  $j$ .

$I_{j,ing}$  i  $I_{j,inh}$  – oznaczają odpowiednie aktywności nuklidu  $j$ .

Wartości jednostkowych dawek obciążających podane są w przepisach IAEA /2/ i w rozporządzeniu /1/.

Podany przez IAEA wzór na całkowitą dawkę efektywną zawiera jedną nieścisłość, nie należy pisać znaku równości między dawką i równoważnikiem który jest jedynie jej wskaźnikiem

Poprawnie podane jest rozwinięcie wzoru na dawkę efektywną w ostatnim projekcie zaleceń ICRP ( Draft Recommendations 12.01.2007).

$$E \cong H_p(10) + E(50)$$

$$\text{gdzie: } E(50) = \sum_j e(g)_{j,ing} I_{j,ing} + \sum_j e(g)_{j,inh} I_{j,inh}$$

Jest tu jednoznacznie pokazane, że praktycznie do oceny dawki efektywnej od narażenia zewnętrznego na podstawie pomiarów indywidualnych uwzględnia się jedynie równoważnik  $H_p(10)$ , a przy ocenie dawki efektywnej obciążającej w danym roku kalendarzowym przyjmuje się dla narażenia zawodowego, okres 50 lat. Mimo że interesuje nas w tym przypadku dawka obciążająca w roku kalendarzowym w którym nastąpiło wniknięcie, nie popełniamy dużego błędu bo jeśli półokres fizyczny nuklidu jest krótki, na następne lata nic nie zostanie, a nawet jeśli jest długi to co pozostało, zostało już pesymistycznie uwzględnione w obliczonej dawce obciążającej.

Praktycznie stosowany dla kontroli narażenia wzór na całkowitą dawkę efektywną podaje w nieco zmienionej postaci rozporządzenie /1/.

$$E = E_Z + \sum_j e(g)_{j,p} J_{j,p} + \sum_j e(g)_{j,o} J_{j,o}$$

gdzie:  $E_Z$  - dawka od narażenia zewnętrznego

Pozostałe oznaczenia odpowiednio jak we wzorze podanym przez IAEA.

Propozycja ICRP aby szacować w praktyce dawkę efektywną na podstawie wzoru uwzględniającego, przy narażeniu zewnętrznym, tylko  $H_p(10)$  uzupełniona jest w projekcie załącznika „B” do zaleceń Komisji Głównej przez Komitet 2 ICRP. Mianowicie zwraca się tam uwagę na przypadki ekstremaalne gdy **może** zachodzić potrzeba bardziej szczegółowego rozpatrzenia sytuacji i uwzględnienia  $H_p(0,07)$  dla skóry. Są to bardzo duże dawki, które osiągają lub przekraczają wartości graniczne oraz bardzo niejednorodne pole promieniowania. Potrzeba taka nie zawsze musi zachodzić. Zachodzi wtedy gdy zarówno dawka równoważna promieniowania mało przenikliwego jak i dawka promieniowania przenikliwego osiąga lub przekracza wartość graniczną lub gdy dużą dawką promieniowania mało przenikliwego napromieniowana została duża powierzchnia ciała. W pierwszym przypadku nawet niewielka składowa dawki efektywnej może spowodować przekroczenie limitu, a w drugim ( gdy jest to np. całe ciało ) będzie dawać znaczącą wartość dawki efektywnej ( przy dawce równoważnej 500 mSv – dawka efektywna wyniesie 5 mSv). W sytuacjach gdy powierzchnia

napromieniona dużymi dawkami jest mała ( najczęściej spotykany przypadek wybiórczego narażenia rąk ), graniczna dawka w skórze spowoduje składową dawkę efektywnej rzędu  $10^{-1}$  mSv. Wynika to ze sposobu oceny tej składowej na podstawie narażenia skóry (uśrednia się dawkę równoważną na powierzchnię całej skóry). Zasada ta jest jednoznacznie podana w przepisach IAEA /2/.

W podanych przykładach szacowania składowej dawki efektywnej przyjęto graniczną dawkę równoważną 500 mSv, jest to limit, a więc wartość najbardziej pesymistyczna . Jeśli dawka równoważna w skórze będzie większa to należy zmienić technologię pracy albo zrezygnować z jej wykonywania, bo ustalonych w przepisach limitów nie należy przekraczać.

Wymagania, metody badań, oraz charakterystyki dawkomierzy indywidualnych z bezpośrednim odczytem do pomiaru równoważnika dawki i mocy równoważnika dawki, promieniowania  $\alpha$ ,  $\gamma$  i  $\beta$ , podaje norma Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej /4/ przyjęta przez Europejski Komitet Normalizacyjny CEN. Przewiduje się, że w przyszłym roku norma ta zostanie wydana w języku polskim jako Polska Norma.

Zasady wzorcowania dawkomierzy otoczenia i indywidualnych do pomiaru równoważnika dawki i mocy równoważnika dawki promieniowania fotonowego o energii od 8 keV do 9 MeV określone są w Polskiej Normie /5/. Norma ta określa także fantomy wodne stosowane przy wzorcowaniu w zależności od miejsca noszenia dawkomierza.

Palce –  $H_p(0,07)$  – fantom prętowy, walec o długości 300 mm i średnicy 19 mm. Przegub dłoni i

kostki stóp –  $H_p(0,07)$  – fantom kolumnowy, cylinder o długości 300 mm i średnicy 73 mm.

Korpus –  $H_p(10)$  – fantom płytowy, płyta 30 cm x 30 cm x 15 cm. Dla promieniowania o małej energii dawkomierze noszone na korpusie wzorcowane są także dla  $H_p(0,07)$

Ponieważ dawkomierze podczas wzorcowania umieszcza się w powietrzu na powierzchni fantomu /lub w wolnym powietrzu/, norma podaje, dla różnych widm promieniowania, współczynniki przeliczeniowe z kermi w powietrzu na równoważnik dawki.

W zakończeniu należy zwrócić uwagę na niekompletne i błędne podanie w rozporządzeniu / 1 / treści uwagi 2 tabeli I Załącznika, które może prowadzić do niewłaściwej interpretacji zasad wyznaczania dawki efektywnej.

Błędna treść uwagi podana w rozporządzeniu :

„ Do celów obliczeniowych pozycja pozostałe obejmuje następujące tkanki /narządy/ :  
:.....grasicę, macicę lub inne, które mogą zostać napromienione selektywnie”.

Treść podana w Dyrektywie Unii Europejskiej / 6 /, która była podstawą rozporządzenia :

„ Do celów obliczeniowych pozycja pozostałe składa się z następujących tkanek i narządów :  
.....grasica, macica. Lista ta obejmuje narządy które mogą zostać wybiórczo napromienione. Niektóre z wymienionych narządów są znane jako podatne na wywoływanie nowotworów. Jeśli w przyszłości inne tkanki lub narządy zostaną zidentyfikowane jako związane ze znacznym ryzykiem wywoływania nowotworów zostaną wtedy włączone do tablicy z określoną wartością  $w_T$  lub dodatkowo umieszczone w pozycji pozostałe. W ich skład mogą także wchodzić tkanki lub narządy napromienione wybiórczo”.

## 5. Podsumowanie

Dawki równoważne dla skóry, kończyn i soczewek oczu wyznacza się na podstawie wskaźników:  $H_p(0,07)$  i  $H'(0,07)$ .

Dawkę efektywną praktycznie wyznacza się ze wzoru:  $E \cong H_p(10) + E(50)$ .  
uwzględniając dla składowej narażenia zewnętrznego tylko promieniowanie przenikliwe, tzn. przy kontroli indywidualnej mierzy się  $H_p(10)$ .

Przy zawodowym narażeniu wewnętrznym bierze się pod uwagę dawkę obciążającą w okresie 50 lat.

Uwzględnia się tylko tkanki i narządy, dla których ICRP określiła czynniki wagowe  $w_T$ . Lista tych narządów i tkanek może zostać w przyszłości uzupełniona jeśli ICRP uzna, że mogą być one wybiórczo napromieniane i przyczyniać się w sposób znaczący do powstawania w organizmie nowotworów. Wtedy ulegną zmianie wartości innych czynników  $w_T$ , gdyż suma wszystkich czynników musi pozostać równa jedności.

## Bibliografia

1. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 18 stycznia 2005 r. w sprawie dawek granicznych promieniowania jonizującego.
2. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources. Safety Series No. 115. IAEA , Vienna 1996.
3. Recommendations of ICRP. ICRP Publication 60. Pergamon Press, Oxford 1991.
4. IEC 61529 / 1988 . ( pr. EN 61529 / 2006 ). Measurements of personal dose equivalents  $H_p(10)$  and  $H_p(0,07)$  for X, gamma and beta radiations. Direct reading personal dose equivalent and/or dose equivalent rate meters.
5. PN-ISO 4037-3 / 2005 . Wzorcowanie dawkomierzy otoczenia i dawkomierzy indywidualnych oraz określanie ich charakterystyk energetycznych i kierunkowych.
6. Council Directive 96/29 /EURATOM of 13 May 1996.