

Dozymetria promieniowania jonizującego

Dozymetria – dział fizyki technicznej obejmujący metody pomiaru i obliczania dawek (dóz) promieniowania jonizującego, a także metody pomiaru aktywności promieniotwórczej preparatów.

Obecnie termin dawka oznacza w dozymetrii wyłącznie *dawkę pochłoniętą promieniowania jonizującego*. W przeszłości był rozumiany znacznie szerzej i obejmował wiele innych wielkości. Dlatego też dozymetria obejmuje:

1. Ustalenie wielkości dawki pochłoniętej w materii w danym punkcie
2. Ustalenie wielkości energii przekazanej przez cząstki nie jonizujące bezpośrednio (fotony, neutrony) w materiale odniesienia w danym punkcie (np. pomiary ekspozycji lub kermy). Taka wielkość jest wygodnym uproszczonym sposobem opisu promieniowania w tym punkcie. Materiałem odniesienia (dla wyników) może być zarówno rzeczywisty materiał w danym miejscu lub jakiś inny (w tym charakterze używane są np. powietrze, grafit, tkanka)
3. Ustalenie liczby cząstek lub fotonów, lub ich energii, padających na dany punkt (np. strumień, strumień całkowity, natężenie, strumień całkowity energii)
4. Ustalenie wartości pewnej funkcji liczby lub energii cząstek lub fotonów padających na ośrodek w danym miejscu (np. iloczyn dawki pochłoniętej i współczynnika jakości promieniowania dla rodzajów promieniowania o różnym LET – liniowym przekazie energii)

Dozymetria promieniowania jonizującego

W pomiarach dozymetrycznych wykorzystywane są różnego rodzaju urządzenia nazywane ogólnie dozymetrami. Urządzenia te działają na różnych zasadach i służą do pomiarów różnych wielkości dozymetrycznych. Z tego powodu nazwa szczegółowa zawiera zwykle dodatkowe określenie, np.:

- miernik dawki pochłoniętej
- miernik mocy dawki
- miernik strumienia
- miernik ekspozycji (mocy ekspozycji, itd.)

W dozymetrii mierniki klasyfikujemy ogólnie jako *absolutne* i *względne*.

Określenie *absolutny* oznacza miernik, który może być skonstruowany i używany do pomiarów promieniowania bez potrzeby jakiegokolwiek kalibracji (np. w znanym polu promieniowania).

Obecnie używanymi miernikami absolutnymi są:

- komory jonizacyjne (ekspozycja)
- kalorymetry (dawka)
- dozymetry chemiczne Frickego (dawka)

Inne mierniki promieniowania, np.:

- liczniki G-M, liczniki proporcjonalne, scyntylicyjne
- dozymetry termoluminescencyjne, fotoluminescencyjne
- błony fotograficzne, itd.

wymagają kalibracji.

Określenia *absolutny* i *względny* nie mają nic wspólnego z precyzją lub dokładnością miernika. Są to pojęcia nie mające ze sobą żadnego związku, poza tym, że miernika, który nie jest ani dokładny ani precyzyjny nikt nie będzie używał bez względu na jego absolutność.

Przez precyzję miernika rozumiemy, że w wielokrotnie powtarzanych w tych samych warunkach pomiarach daje zbliżone wyniki. Im mniejszy rozrzut (mierzony np. odchyleniem średniokwadratowym) tym większa precyzja miernika. Naturalnym ograniczeniem precyzji pomiarów promieniowania jest stochastyczny charakter procesów oddziaływania promieniowania z materią (a zatem i z miernikiem).

Zwiększanie liczby pomiarów pozwala zwykle zmniejszyć rozrzut wartości średniej, a zatem i precyzję wyniku.

Przez dokładność miernika rozumiemy możliwość uzyskania wyniku, którego wartość nie odbiega od (prawdziwej) wartości mierzonej wielkości. Im mniejsza różnica, tym bardziej dokładny miernik.

Dozymetria promieniowania jonizującego

I Międzynarodowy Kongres Radiologii w 1925 roku powołał Międzynarodową Komisję do spraw Jednostek Radiologicznych ICRU (International Commission on Radiological Units). Później nazwę komisji rozszerzono do Międzynarodowa Komisja do spraw Jednostek i Pomiarów Radiologicznych (International Commission on Radiological Units and Measurements).

W 1928 roku ICRU wprowadziła jednostkę wielkości promieniowania mierzonej przez powietrzną komorę jonizacyjną. Jednostka nazywa się rentgen (r.). Odpowiednie zalecenie komisji brzmiało:

„Ta międzynarodowa jednostka będzie wielkością promieniowania X, które, w warunkach pełnego wykorzystania elektronów wtórnych i bez efektu ścianek komory, wytwarza w jednym centymetrze sześciennym powietrza atmosferycznego przy 0°C i ciśnieniu 76 cm Hg taki stopień przewodnictwa, że w warunkach prądu nasycenia rejestruje się jedną jednostkę elektrostatyczną ładunku.”

Dopiero w 1956 roku ICRU podała definicję wielkości *dawki ekspozycyjnej* (ekspozycji), której jednostką jest rentgen.

W 1937 roku ICRU zmodyfikowała definicję rentgena (ICRU, 1938):

„Międzynarodowa jednostka wielkości lub dawki promieniowania X będzie się nazywała „rentgen” (roentgen) i będzie oznaczana symbolem „r”... Rentgen będzie wielkością promieniowania X lub γ taką, że wywoła w 0,001293 g powietrza towarzyszącą emisję cząsteczek, które wytworzą w powietrzu jony o całkowitym ładunku 1 j.e.s. każdego znaku.”

$$3 \cdot 10^9 \text{ j.e.s.} = 1 \text{ C}$$

W 1950 roku ICRU zaleciła (ICRU, 1951), żeby:

„W celu umożliwienia korelacji dawki jakiegokolwiek promieniowania jonizującego z jego efektami biologicznymi lub pokrewnymi, ICRU zaleca, by dawkę wyrażać za pomocą wielkości energii pochłoniętej przez jednostkę masy (erg na gram) napromieniowanego materiału w danym miejscu.”

Na tej podstawie (ICRU, 1954) stworzono definicję wielkości *dawki pochłoniętej*.

„Dawka pochłonięta dowolnego promieniowania jonizującego jest ilością energii dostarczonej substancji przez cząstki jonizujące, przypadającej na jednostkę masy napromieniowanego materiału w danym miejscu. Wyraża się ją w radach. Rad jest jednostką dawki pochłoniętej i wynosi

$$1 \text{ rad} = \frac{100 \text{ erg}}{1 \text{ g}} .”$$

Dozymetria promieniowania jonizującego

W 1956 ICRU wprowadza pojęcie *dawki ekspozycyjnej* promieniowania X i γ .
„Dawka ekspozycyjna promieniowania X/ γ w danym miejscu jest miarą promieniowania, opartą na jego zdolności wywoływania jonizacji.”

„Jeden rentgen jest dawką ekspozycyjną promieniowania X/ γ taką, że ...”

W 1962 roku ICRU usunęła wyraz dawka w definicji i wielkość mierzona rentgenami nazywa się *ekspozycja*.

W 1956 ICRU zdefiniowała nową wielkość mającą zastosowanie w badaniach oddziaływania promieniowania jonizującego na żywe organizmy (tkanki) – *równoważnik dawki*.

$$\text{„Równoważnik dawki [rem] = } \sum_i ((\text{Dawka[rad]}) \times (\text{WSB}))_i \text{.”}$$

WSB (względna skuteczność biologiczna) – RBE (relative biological effectiveness)

WSB danego promieniowania jest odwrotnością stosunku dawki pochłoniętej tego promieniowania do dawki pochłoniętej promieniowania odniesienia potrzebnej do wywołania takiego samego skutku biologicznego.

Jeżeli dawka pewnego promieniowania D_x wywołuje taki sam skutek biologiczny jak dawka promieniowania odniesienia D_o , to względna skuteczność biologiczna tego promieniowania wynosi

$$\text{WSB}_x = \frac{D_o}{D_x}$$

Dozymetria promieniowania jonizującego

Wielkości dozymetryczne rekomendowane przez ICRU

Wielkość	skrót	wymiar	jednostka	
Dawka pochłonięta	D	EM^{-1}	$J \cdot kg^{-1}$	Gy
Moc dawki pochłoniętej		$EM^{-1}T^{-1}$	$J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$	$Gy \cdot s^{-1}$
Fluencja (cząstek)	Φ	L^{-2}	m^{-2}	
Gęstość strumienia cząstek	ϕ	$L^{-2}T^{-1}$	$m^{-2} \cdot s^{-1}$	
Fluencja energii	F	EL^{-2}	$J \cdot m^{-2}$	
Nateżenie	I	$EL^{-2}T^{-1}$	$J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$	
Kerma	K	EM^{-1}	$J \cdot kg^{-1}$	
Moc kermy		$EM^{-1}T^{-1}$	$J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$	
Ekspozycja	X	QM^{-1}	$C \cdot kg^{-1}$	R (rentgen)
Moc ekspozycji		$QM^{-1}T^{-1}$	$C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}$	$R \cdot s^{-1}$
Masowy współczynnik osłabienia	μ/ρ	L^2M^{-1}	$m^2 \cdot kg^{-1}$	
Masowy współczynnik przekazu energii	μ_K/ρ	L^2M^{-1}	$m^2 \cdot kg^{-1}$	
LET (liniowy przekaz energii)	L	EL^{-1}	$J \cdot m^{-1}$	
Praca jonizacji (średnia)	W	E	J	eV
Aktywność	A	T^{-1}	s^{-1}	Ci, Bq
Stała jonizacyjna (dla promieni γ)	Γ	QL^2M^{-1}	$C \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$	$\frac{R \cdot m^2}{h \cdot Ci}$ $C \cdot m^2 \cdot kg^{-1}$
Równoważnik dawki	DE			rem, Sv

Dozymetria promieniowania jonizującego

Podstawowe pojęcia służące do opisu pól promieniowania

$$\varphi = \frac{\Delta N}{\Delta s \Delta t}$$

gęstość strumienia (cząstek)
 ΔN – liczba cząstek przechodzących przez sferę wokół P w czasie Δt
 Δs – powierzchnia koła wielkiego sfery

$$\Phi = \int_{t_1}^{t_2} \varphi dt$$

fluencja, strumień całkowity

$$\frac{\sum T_i}{\Delta s \Delta t} = \frac{\Delta E_F}{\Delta s \Delta t} = I$$

natężenie, gęstość strumienia energii

$$\varphi = \int_0^{\infty} \varphi'(T) dT$$

$\varphi'(T)$ – widmo (rozkład) gęstości strumienia

$$\varphi(T_1, T_2) = \int_{T_1}^{T_2} \varphi'(T) dT$$

$$\varphi^*(T) = \int_T^{\infty} \varphi'(T) dT$$

$\varphi'(T)$ – rozkład różniczkowy
 $\varphi^*(T)$ – rozkład całkowity

$$\varphi'(T) = -\frac{d\varphi^*(T)}{dT}$$

$$\varphi = \int_0^{\pi} d\Theta \int_0^{2\pi} d\phi \sin\Theta \varphi'(\Theta, \phi)$$

$\sin\Theta d\Theta d\phi = d\Omega$ - element kąta bryłowego

$$\varphi = \int_0^{\Omega} \varphi'(\Theta, \phi) d\Omega$$

$\varphi'(\Theta, \phi)$ - rozkład kierunkowy promieniowania

Dozymetria promieniowania jonizującego

Wielkości opisujące oddziaływanie promieniowania z materią

$$\mu = \frac{1}{N} \frac{dN}{dl} \quad \text{współczynnik osłabienia promieniowania}$$

$$\mu_F = \frac{1}{E_F} \frac{dE_F}{dl} \quad \text{względna zmiana energii strumienia na jednostkę drogi}$$

$$\mu'(\Theta) \quad \text{różniczkowy współczynnik osłabienia}$$

$$N \mu'(\Theta) d\Theta dl \quad \text{liczba cząstek/kwantów, które są rozpraszane pod kątem w przedziale } (\Theta, \Theta + d\Theta)$$

$$\mu = \int_0^{T_m} \mu'(T) dT$$

$$N \mu'(T) dl dT \quad \text{np., liczba kwantów } \gamma, \text{ które w wyniku oddziaływania wytworzą elektrony komptonowskie o energiach z przedziału } (T, T + dT)$$

$$\mu_x = \int_0^{T_m} \mu'(T) [T/T_0] dT \quad \text{ułamek pierwotnej energii wiązki, która zostaje przekazana do wiązki cząstek rozproszonych (wtórnych)}$$

$$\bar{T} = \frac{1}{\mu} \int_0^{T_m} \mu'(T) T dT = \frac{\mu_x}{\mu} T_0 \quad \text{średnia energia promieniowania rozproszonego (wtórnego)}$$

$$\frac{\mu}{\rho} \quad \text{masowy współczynnik osłabienia}$$

$$\sigma = \frac{\mu}{n} \quad \text{przekrój czynny (całkowity), gdzie } n \text{ – liczba cząstek (elektronów, jąder, ...) na jednostkę objętości materiału}$$

$$n_e = \rho \frac{N_A}{A} Z \quad \text{lub} \quad n_n = \rho \frac{N_A}{A}$$

Dozymetria promieniowania jonizującego

Wielkości opisujące oddziaływanie promieniowania cząstek naładowanych z materią

$$S = \frac{dT}{dl} \left[\frac{keV}{\mu m}; \frac{MeV}{cm}; \frac{J}{m} \right] \text{ zdolność hamowania}$$

$$\frac{S}{\rho} \left[\frac{MeV cm^2}{g} \right] \text{ masowa zdolność hamowania}$$

$$\begin{aligned} dT &= \mu dl (T - \bar{T}') = \\ &= \mu dl \left(T - \frac{1}{\mu} \int_0^{T_m} \mu'(T') T' dT' \right) = \\ &= dl \left(\mu T - \int_0^{T_m} \mu'(T') T' dT' \right) = \\ &= dl \int_0^{T_m} \mu'(T') (T - T') dT' \end{aligned}$$

czyli

$$S = \int_0^{T_m} \mu'(T') (T - T') dT'$$

$$R_0 = \int_0^T \frac{dT}{S} \text{ średnia długość drogi do zatrzymania cząstki o energii początkowej } T$$