

Dozimetrická terminológia, veličiny a jednotky

Ing. Róbert HINCA

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

1

Veličiny a jednotky charakterizujúce zdroje ionizujúceho žiarenia

- Aktivita, A (Bq)
- Konštanta premeny, λ (s^{-1})
- Stredná doba života rádioaktívnych jadier, τ (s)
- Doba polpremeny (polčas premeny), $T_{1/2}$ (s)
- Energia emitovaných častíc (eV = $1,602 \cdot 10^{-19}$ J, 10^{-15} – femto
 - pre ^{137}Cs predstavuje 661 keV asi 106 fJ)
- Maximálna a stredná energia spojitého β spektra (eV)
- Zastúpenie v diskretnom spektre α , γ (%) príslušnej čiary
- Emisia zdroja
- Uhlová emisia zdroja

$$\dot{N}_z = \frac{dN_z}{dt}$$

$$\dot{N}_{\Omega,z} = \frac{d\dot{N}_z}{d\Omega}$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

2

Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

- Fluencia častíc (m^{-2})
- Príkon fluencie častíc ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- Radiancia častíc ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$)
- Fluencia energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)
- Príkon fluencie energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- Radiancia energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$)
- Hustota prúdu častíc J ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

3

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- Účinný prierez interakcie (celkový σ_t , uhlový σ_Ω , spektrálny σ_E), ($1\text{b} = 10^{-28} \text{ m}^2$)
- Makroskopický účinný prierez interakcie Σ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ zoslabenia μ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ prenosu energie μ_{tr} (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ absorpcie energie μ_E (m^{-1})
- Lineárna brzdná schopnosť S (Jm^{-1})
- Lineárny prenos energie L resp. LET (Jm^{-1})
- Celková ionizačná schopnosť častice
- Lineárna ionizácia, stredná energia ionizácie $W(\text{eV})$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

4

Veličiny dozimetrie ionizujúceho žiarenia

- Charakterizujú energiu absorbovanú v látke alebo jej ionizačné prejavy.
- Dajú sa odvodiť od z veličín popisujúcich pole žiarenia a koeficientov interakcie.
- Môžeme ich definovať priamo a priamo ich aj merať.
- **Dozimetrické veličiny pre meranie a výpočty:**
 - odovzdaná energia, absorbovaná dávka, príkon absorbovanej dávky, lineárny prenos energie, dávkový ekvivalent, príkon DE, osobný, priestorový a smerový DE
- **Dozimetrické veličiny na účely limitovania:**
 - stredná absorbovaná dávka v orgáne, ekvivalentná dávka, efektívna dávka, úväzok ekvivalentnej dávky, úväzok efektívnej dávky, kolektívna ekvivalentná dávka, kolektívna efektívna dávka.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

5

Veličiny používané pri hodnotení ožiarenia

- Príjem rádionuklidu – aktivita (Bq)
- Absorbovaná dávka ($\text{Gy} = \text{J/kg}$)
- Ekvivalentná dávka (Sv), radiačný váhový faktor (1)
- Efektívna dávka (Sv), tkanivový váhový faktor (1)
- Úväzok ekvivalentnej dávky (Sv)
- Úväzok efektívnej dávky (Sv)
- Dávkový ekvivalent, osobný, priestorový, smerový (Sv)

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

6

Aktivita, zákon rádioaktívnej premeny

- **Rádioaktívna premena** predstavuje spontánnu premenu jadier, pričom vznikajú nové jadrá alebo sa mení ich energetický stav
- Pri rádioaktívnej premene jadro emituje najmenej jednu časticu.
- Rádioaktívna premena je vlastnosťou jadra atómu a závisí len od jeho vnútorného stavu. Vonkajšími vplyvmi sa rádioaktívna premena nedá nijak ovplyvniť.

Zákon rádioaktívnej premeny

- Množstvo premenených jadier dN za čas dt je priamo úmerný pôvodnému počtu rádioaktívnych jadier.

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

- Konštanta proporcionality λ sa nazýva konštanta premeny a charakterizuje danú RAL.

Zákon rádioaktívnej premeny

- Integrovaním v časovom intervale $0-t$ za predpokladu, že v čase $t = 0$, $N = N_0$, dostaneme zákon rádioaktívnej premeny:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

- N_0 - je počet rádioaktívnych jadier v čase $t = 0$,
 - N - stredný počet ešte nerozpadnutých jadier v čase t ,
 - λ - konštanta premeny (rozpadová konštanta).
- Rádioaktívna premena je náhodný proces, ktorý sa riadi exponenciálnym rozdelením.
 - Náhodnou veličinou je čas, za ktorý sa jadro rozpadne od začiatku jeho pozorovania – exponenciálne rozdelenie nemá pamäť.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

9

Stredná doba života

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

- Stredná hodnota τ náhodnej veličiny s exponenciálnym rozdelením $N = N_0 e^{-\lambda t}$ sa nazýva **stredná doba života**.
- Stredná doba života udáva čas za ktorý klesne počet rádioaktívnych jadier e -krát, čo vyplýva zo zákona rozpadu.

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \tau} = N_0 \cdot e^{-1} = \frac{N_0}{e} \cong 0,368 N_0$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

10

Konštanta premeny λ [s⁻¹]

- Vyjadruje intenzitu rádioaktívnej premeny. Pre daný rádionuklid v danom energetickom stave ju definujeme ako podiel pravdepodobnosti dP , že jadro tohoto rádionuklidu podľahne za malý časový interval dt rádioaktívnej premene a tohoto časového intervalu.

$$\lambda = \frac{dP}{dt}$$

$$\lambda = \sum_i \lambda_i$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

11

Doba polpremeny $T_{1/2}$ (STN ISO 31-9)

- Polčas premeny $T_{1/2}$, vyjadruje priemerný časový interval, za ktorý sa premení polovica rádionuklidu.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \cdot \ln 2$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

12

Aktivita

- **Aktivita - charakterizuje okamžité množstvo rádioaktívnej látky.**
- Je to podiel strednej hodnoty počtu spontánnych jadrových premien z daného energetického stavu dN vyskytujúcich sa v množstve rádionuklidu, za malý časový interval dt a tohto časového intervalu. (Definícia STN ISO 31-10)

$$A = -\frac{dN}{dt}$$

$$A = \lambda N$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

13

Becquerel

- Jednotkou aktivity je reciproká sekunda $[s^{-1}]$, ktorá dostala názov po objaviteľovi rádioaktivity: Becquerel [Bq].

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

je aktivita 1 g rádia ^{226}Ra

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

14

Veličiny odvodené od aktivity

Veličina			Jednotka		
Názov	Značka	Definícia	Názov	Značka	Rozmer
molárna aktivita	a_n	$a_n = \frac{A}{n}$	becquerel na mol	Bq mol ⁻¹	s ⁻¹ mol ⁻¹
hmotnostná aktivita	a_m	$a_m = \frac{A}{m}$	becquerel na kilogram	Bq kg ⁻¹	kg ⁻¹ s ⁻¹
objemová aktivita	a_V	$a_V = \frac{A}{V}$	becquerel na meter kubický	Bq m ⁻³	m ⁻³ s ⁻¹
plošná aktivita	a_S	$a_S = \frac{A}{S}$	becquerel na meter štvorcový	Bq m ⁻²	m ⁻² s ⁻¹
dĺžková aktivita	a_l	$a_l = \frac{A}{l}$	becquerel na meter	Bq m ⁻¹	m ⁻¹ s ⁻¹
rýchlosť emisie (emanácia) aktivity	$\dot{A}$	$\dot{A} = \frac{A}{t}$	becquerel za sekundu	Bq·s ⁻¹	s ⁻²

***n** - látkové množstvo rádioaktívnej látky o aktivite A*

***m** - hmotnosť rádioaktívnej látky o aktivite A*

***V** - objem rádioaktívnej látky o aktivite A*

***S** - plocha na ktorej je aktivita A rozložená*

***l** - dĺžka na ktorej je aktivita A rozložená*

***t** - časový interval, za ktorý sa rovnomerne uvoľňuje aktivita A*

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

15

Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

- Využívajú spojité funkcie v priestore a čase, ktoré vyjadrujú:
 - počty častíc prechádzajúce daným miestom za dané časové **obdobie**
 - počty častíc prechádzajúce daným miestom v danom časovom **okamžiku**
 - sumárnu energiu častíc prechádzajúcich daným miestom za dané časové **obdobie**
 - sumárnu energiu častíc prechádzajúcich daným miestom v danom časovom **okamžiku**

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

16

Veličiny popisujúce pole ionizujúceho žiarenia

- Fluencia častíc (m^{-2})
- Príkon fluencie častíc ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- Radiancia častíc ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$)
- Fluencia energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$)
- Príkon fluencie energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- Radiancia energie ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$)
- Hustota prúdu častíc J ($\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

17

Fluencia častíc

- **Fluencia častíc** Φ [m^{-2}] vyjadruje počet častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.

$$\Phi = \frac{dN}{dS}$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

18

Príkon fluencie

● Príkon fluencie (hustota toku častíc)

φ [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$] popisuje okamžitú situáciu v danom bode. Definuje ju pomer fluencie častíc $d\Phi$ za časový interval dt .

$$\varphi = \frac{d\Phi}{dt}$$

Radiancia častíc, Radiancia energie

- Radiancia častíc p [$\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$]
vyjadruje uhlové rozdelenie častíc na danom mieste.

$$p = \frac{d\varphi}{d\Omega}$$

- Radiancia energie r [$\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$]

$$r = \frac{d\psi}{d\Omega}$$

Fluencia energie častíc, Príkon fluencie energie častíc

- **Fluencia energie častíc** $\Psi [\text{J m}^{-2}]$
je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc dR dopadajúcej do malej gule s plochou hlavného rezu dS a tejto plochy.

$$\Psi = \frac{dR}{dS}$$

- **Príkon fluencie energie častíc**
(hustota toku energie) $\psi [\text{J m}^{-2}\text{s}^{-1}]$

$$\psi = \frac{d\Psi}{dt}$$

Hustota prúdu častíc

- **Hustota prúdu častíc** $J [\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}]$
je definovaná ako vektorová veličina, ktorej integrál normálovej zložky cez určitú plochu sa rovná celkovému počtu častíc I prechádzajúcich cez element plochy $e_n dA$ za malý časový interval dt , delený týmto intervalom.
 - Je mierou šírenia častíc určitým smerom. V izotropnom poli je hustota prúdu častíc nulová, v rovnobežnom zväzku sa v smere zväzku rovná hustote toku častíc a v opačnom smere zápornej hodnote hustoty toku častíc.

$$J e_n dA = \frac{dI}{dt}$$

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- Účinný prierez interakcie (celkový σ_t , uhlový σ_Ω , spektrálny σ_E), ($1b = 10^{-28} \text{ m}^2$)
- Makroskopický účinný prierez interakcie Σ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ zoslabenia μ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ prenosu energie μ_{tr} (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ absorpcie energie μ_E (m^{-1})
- Lineárna brzdná schopnosť S (Jm^{-1})
- Lineárny prenos energie L resp. LET (Jm^{-1})
- Celková ionizačná schopnosť častice
- Lineárna ionizácia, stredná energia ionizácie $W(\text{eV})$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

23

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- Lineárny súčiniteľ zoslabenia μ (m^{-1})
- Lineárny súčiniteľ prenosu energie μ_{tr} (m^{-1})
sa používa na popis prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabité sekundárne častice
 - N je počet častíc s energiou E dopadajúcich kolmo na vrstvu dx pričom vznikajú nabité častice so sumárnou kinetickou energiou dE_K
- Lineárny súčiniteľ absorpcie energie μ_E (m^{-1}) zohľadňuje tú časť odovzdanej energie, ktorá sa odnesie mimo uvažovaného objemu.
 - $\mu_E = \mu_{tr} (1 - G)$, kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.

$$\mu = -\frac{1}{J} \frac{dJ}{dx}$$

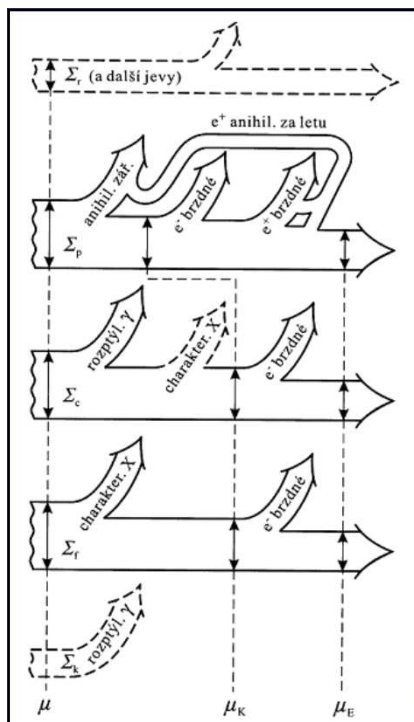
$$\mu_{tr} = \frac{1}{NE} \frac{dE_K}{dx}$$

$$\mu_E = \mu_{tr} (1 - G)$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

24



Koeficient prenosu energie
Koeficient absorpcie energie

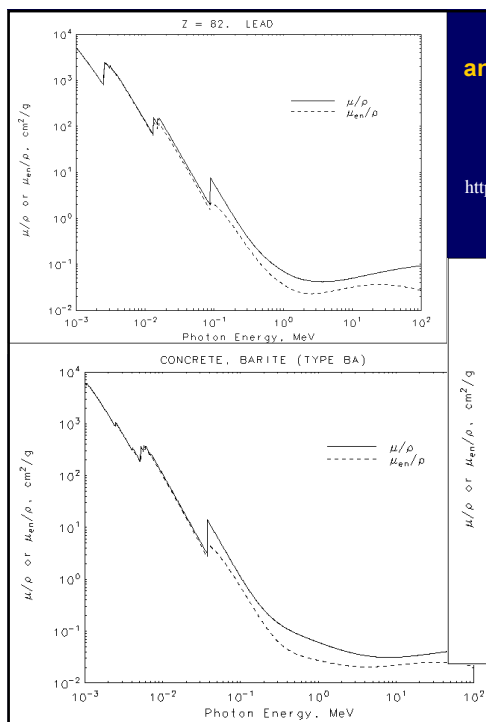
Σ_K - koherentný rozptyl
 Σ_r - fotoefekt
 Σ_C - Comptonov rozptyl
 Σ_p - tvorba párov
 Σ_t - fotojadrové reakcie

Z hľadiska prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabité sekundárne častice sa preto používa **koeficient prenosu energie** μ_{tr} [m^{-1}] (μ_K).

Časť odovzdanej energie sa odnesie mimo uvažovaného objemu. To zohľadňuje **koeficient absorpcie energie** $\mu_E = \mu_{tr} (1-G)$ [m^{-1}], kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.

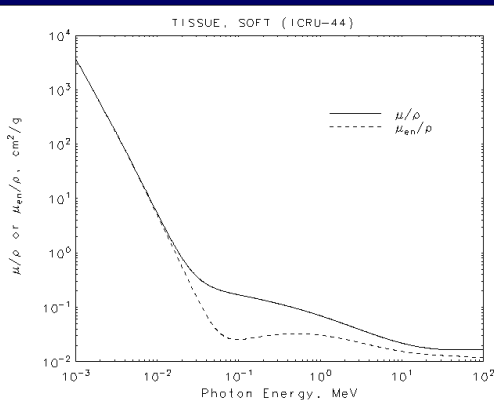
metria a radiačná ochrana

25



Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients

<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html>



radiačná ochrana

26

Veličiny popisujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s látkou

- **Lineárna brzdná schopnosť S** ($\text{J}\cdot\text{m}^{-1}$) aj [$\text{eV}\cdot\text{m}^{-1}$] vyjadruje mieru energetických strát pozdĺž dráhy nabitej častice v danom materiále.

$$S = -\frac{dE}{dx}$$

- Nabité častice strácajú energiu hlavne zrážkami s elektrónmi, pri ktorých dochádza k ionizácii a excitácii atómov (ionizačné resp. zrážkové straty) a **radiačnými stratami** prejavujúcimi sa emisiou brzdného žiarenia

- **Lineárny prenos energie L** (LET) [$\text{MeV}\cdot\text{cm}^{-1}$] je mierou energie **odovzdanej** pri prechode ionizujúceho žiarenia elektrónom látky v danom mieste. Niekedy je LET ohraničená energiou Δ , ktorá ohraničuje minimálnu energiu elektrónov ktoré berieme do úvahy. Elektróny s vyššou energiou uletia preč.

$$S = S_{col} + S_{rad}$$

- Pre $\Delta=\infty$ platí $\text{LET}=S$

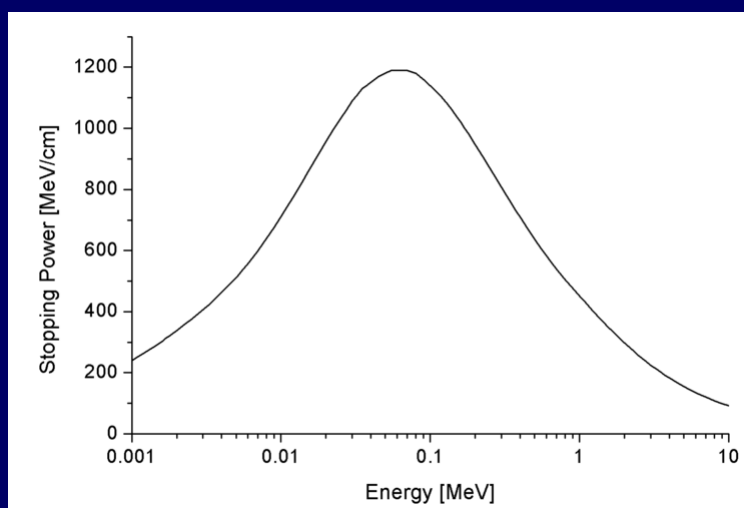
$$L = \frac{dE}{dx}$$

- **Lineárna ionizácia J** (m^{-1}) vyjadruje počet vytvorených iónových párov na jednotku dráhy vyjadruje veličina

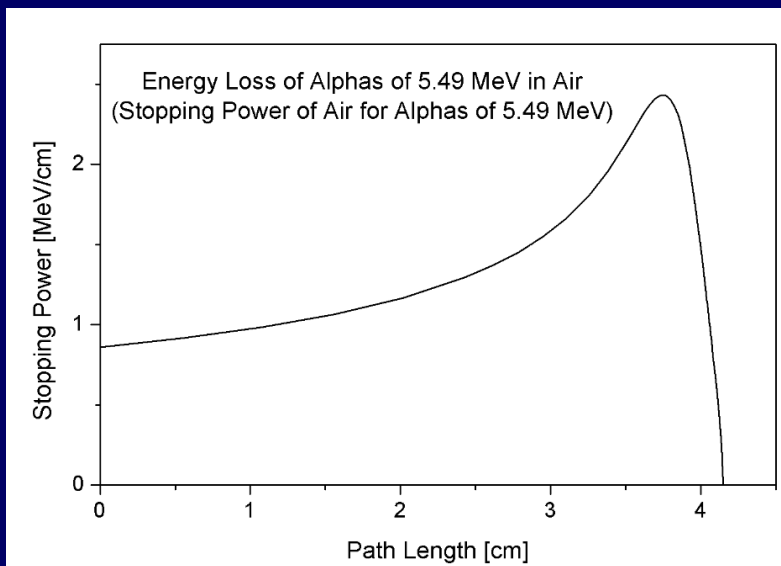
- **Stredná energia ionizácie** $W_x(\text{eV})$

$$L = W_x \cdot J = \frac{\text{energia}}{1 \text{ iónový pár}} \cdot \frac{\text{počet iónových párov}}{\text{jednotka dráhy}} = \frac{\text{energia}}{\text{jednotka dráhy}}$$

Brzdná schopnosť hliníka pre protóny



Brzdná schopnosť vzduchu pre alfa častice



16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

29

Intenzita ionizácie vzduchu α časticami



16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

30

Veličiny dozimetrie ionizujúceho žiarenia

- Charakterizujú energiu absorbovanú v látke alebo jej ionizačné prejavy.
- Dajú sa odvodiť z veličín popisujúcich pole žiarenia a koeficientov interakcie.
- **Dozimetrické veličiny pre meranie a výpočty:**
 - odovzdaná energia, absorbovaná dávka, príkon absorbovanej dávky, lineárny prenos energie, dávkový ekvivalent, príkon DE, osobný, priestorový a smerový DE
- **Dozimetrické veličiny na účely limitovania:**
 - stredná absorbovaná dávka v orgáne, ekvivalentná dávka, efektívna dávka, úväzok ekvivalentnej dávky, úväzok efektívnej dávky, kolektívna ekvivalentná dávka, kolektívna efektívna dávka.

Odovzdaná energia

$$E = R_{in} - R_{out} + \sum Q$$

- Ionizujúce žiarenie odovzdá v určitom objeme látke energiu E , ktorá sa nazýva odovzdaná energia alebo tiež integrálna absorbovaná dávka dávka. Jednotkou je [J] alebo [MeV]
- R_{in} (R_{out}) vyjadruje sumárnu energiu všetkých častíc iž vstupujúcich do uvažovaného objemu (vychádzajúcich z objemu)
- $\sum Q$ - vyjadruje sumu všetkých energetických ekvivalentov zmien pokojových hmotností jadier a elementárnych častíc v danom objeme pri akýchkoľvek jadrových premenách. Pokles vyjadruje kladné znamienko, nárast záporné.

Hmotnostná odovzdaná energia

- **Hmotnostná odovzdaná energia z [$\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]** je podiel odovzdanej energie látke v uvažovanom objeme a hmotnosti tejto látky.
- Limitná hodnota strednej hmotnostnej odovzdanej energie pre $m \rightarrow 0$ sa blíži k absorbovanej dávke v bode.

$$z = \frac{E}{m}$$

$$D = \lim_{m \rightarrow 0} \bar{z}$$

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

33

Absorbovaná dávka

- **Absorbovaná dávka [$\text{Gy} = \text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$]** v danom bode pre každé IŽ je podiel strednej odovzdanej energie $d\bar{E}$ látke v objemovom elemente dV a jeho hmotnosti dm .
- Dávka závisí od ožarovaneho materiálu, preto sa pre presnosť uvádza aj látka, ku ktorej sa vzťahuje, napr. D_{vzd} - vzduch, D_{tk} - tkanivo...
- Dávka popisuje odovzdávanie energie za určitý časový úsek. Okamžitú situáciu popisuje dávkový príkon.
- **Príkon absorbovanej dávky (dávkový príkon)** vyjadruje prírastok dávky dD v časovom intervale dt delený časovým intervalom dt .

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm}$$

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt}$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

34

Lineárny prenos energie Lineárna zrážková brzdná schopnosť

$$L = \frac{dE}{dl}$$

dE je energia odovzdaná v danom mieste látky pri prechode malej vzdialenosti cez látku

dl je vzdialenosť v látke

L [eV·m⁻¹, keV·μm⁻¹]

LET - Linear Energy Transfer
S - Stopping power

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

35

KERMA K [Gy = J·kg⁻¹]

- Dávka sa vzťahuje k odovzdávaniu energie v danom mieste (t.j. z nabitých častíc na častice látky). Ak sú primárne častice nenabité, prvým krokom je interakcia s látkou a odovzdanie energie nabitým časticiam. Tento krok popisuje **kerma** (Kinetic Energy Released in MATter).
- Kerma sa vzťahuje len na nenabité žiarenie a pre danú látku.
- dE_K je sumárna počiatočná kinetická energia všetkých nabitých častíc v uvažovanom objeme dV uvoľnených nenabitými časticami žiarenia.

$$K = \frac{dE_K}{dm}$$

Okamžitú situáciu popisuje
kermový príkon.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

36

Vzťah medzi kermou a fluenciou častíc

$$K = \Psi \cdot \mu_{tr,m} = \Phi \cdot E \cdot \mu_{tr,m} = F_K \cdot \Phi$$

$$\Phi = \frac{dN}{dS}$$

$$\Psi = \frac{dR}{dS}$$

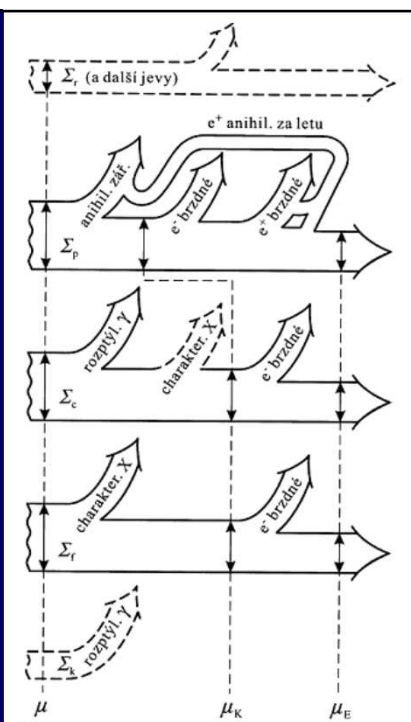
$$\mu_{tr} = \frac{1}{NE} \frac{dE_K}{dx}$$

- **Fluencia častíc** Φ [m^{-2}] vyjadruje počet častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.
- F_K - kermový faktor, tabelovaná veličina
- **Fluencia energie častíc** Ψ [J m^{-2}] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc dR dopadajúcej do malej gule s plochou hlavného rezu dS a tejto plochy.
- **Koeficient prenosu energie** μ_{tr} [m^{-1}] (μ_K)
- N je počet častíc s energiou E dopadajúcich kolmo na vrstvu dx pričom vznikajú nabité častice so sumárnou kinetickou energiou dE_K .

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

37



Koeficient prenosu energie Koeficient absorpcie energie

- Σ_K - koherentný rozptyl
- Σ_f - fotoefekt
- Σ_c - Comptonov rozptyl
- Σ_p - tvorba párov
- Σ_t - fotojadrové reakcie

Z hľadiska prenosu energie od nepriamo ionizujúcich častíc na nabitú sekundárne častice sa preto používa **koeficient prenosu energie** μ_{tr} [m^{-1}] (μ_K).

Časť odovzdanej energie sa odnesie mimo uvažovaného objemu. To zohľadňuje **koeficient absorpcie energie** $\mu_E = \mu_{tr} (1 - G)$ [m^{-1}], kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie.

etria a radiačná ochrana

38

Vzt'ah medzi dávkou a fluenciou častíc

$$D = \Psi \cdot \mu_{E,m} = \Phi \cdot E \cdot \mu_{E,m}$$

- **Koeficient absorpcie energie** $\mu_E = \mu_{tr} (1-G)$ [m^{-1}], kde G je časť energie nabitých častíc, stratená ako brzdné žiarenie. Vyjadruje teda energiu ktorá zostane absorbovaná v danom objeme.
 - **Fluencia častíc** Φ [m^{-2}] vyjadruje počet častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, delený plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.
 - **Fluencia energie častíc** Ψ [$J m^{-2}$] je obdoba fluencie častíc a vyjadruje podiel sumárnej energie častíc dR dopadajúcej do malej gule s plochou hlavného rezu dS a tejto plochy.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

39

Vzt'ah medzi kermou a dávkou

$$D = \Psi \cdot \mu_{E,m}$$

$$K = \Psi \cdot \mu_{tr,m}$$

Energia (MeV)	100 · (μ _{tr} - μ _E) / μ _{tr}		
	Z=6	Z=29	Z=82
0,1	0	0	0
1,0	0	1,1	4,8
10,0	3,5	13,5	26

E(MeV)	1-G vzduch
0,01	1,0
0,1	1,0
1	1,0
1,5	0,996
2,0	0,995
3,0	0,991
5,0	0,984
8,0	0,972
10,0	0,964

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

40

Expozícia

$$X = \frac{|dQ|}{dm}$$

$$X = \Psi \cdot \mu_{E,m} \frac{e}{W_i}$$

▪ $\mu_{E,m}$ - hmotnostný koeficient absorpcie energie

▪ W_i - stredná energia ionizácie

▪ e - elementárny náboj

- Expozícia (ožiarenie) je najstaršia dozimetrická veličina.
- Je definované len pre fotónové žiarenie vo vzduchu.
- Vyjadruje podiel absolútnej hodnoty celkového elektrického náboja dQ iónov rovnakého znamienka vzniknutých vo vzduchu po zabrzdení všetkých uvoľnených elektrónov a pozitronov v objemovom elemente o hmotnosti dm a tejto hmotnosti.**
- Jednotkou expozície je $[C \cdot kg^{-1}]$.
- Staršou jednotkou je röntgen $1R = 2,58 \cdot 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$.
- Vo vzduchu platí prevod na kermu: $1R = 8,76 \text{ mGy}$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

41

Kermová výdatnosť $V_{K,\delta}$ $[Gy \cdot m^2 \cdot s^{-1}]$

$$V_{K,\delta} = \dot{K}_\delta l^2$$

$$\Gamma^\delta = \frac{V_{K,\delta}}{A}$$

- Kermová výdatnosť $V_{K,\delta}$ je charakteristika zdroja uvádzaná v jeho dokumentácii.
- Je obdobou expozičnej výdatnosti.
- Závisí na druhu rádionuklidu, jeho aktivite, konštrukcii a rozmerov zdroja.
- δ je minimálna energia uvažovaných fotónov.
- Kermu z rádionuklidového zdroja môžeme vypočítať z kermovej výdatnosti $[Gy \cdot m^2 \cdot s^{-1}]$.
- Univerzálnejšou charakteristikou rádionuklidov je kermová konštanta gama Γ^δ .

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

42

Dávkový ekvivalent

- **Dávkový ekvivalent** v ľubovoľnom mieste biologického väziva je daný vzťahom

$$H = D \cdot Q \cdot N^* \quad [Sv]$$

- D - absorbovaná dávka, [Gy]
- Q - faktor kvality, [1 (bezrozmerná veličina)]
- N - súčin všetkých ďalších (v súčasnosti ešte neznámych) modifikujúcich faktorov. V súčasnosti hodnota N = 1 a teda sa nemusí pri výpočte zohľadňovať.
 - * - norma STN ISO 31-10 obsahuje uvedenú definíciu, iná norma STN 01 1310 už zohľadňuje odporúčanie ICRU vypustiť hodnotu N.
- Pri presných výpočtoch sa využíva dávkový ekvivalent v závislosti od presnej veličiny lineárneho prenosu energie L.

$$H = \int_L Q(L) D_L dL$$

$$D_L = \frac{dD}{dL}$$

D_L - rozdelenie absorbovanej dávky podľa lineárneho prenosu energie,
- je podiel príspevku dávky dD v intervale $(L, L+dL)$ a tohto intervalu dL

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

43

Dávkový ekvivalent operačné veličiny

- je veličina používaná na základe odporúčaní ICRU* (Medzinárodná komisia pre radiačné jednotky a merania), ktoré definujú tzv. operačné – pracovné veličiny
 - priestorový dávkový ekvivalent
 - smerový dávkový ekvivalent
 - osobný dávkový ekvivalent
- Pre účely radiačnej ochrany sa používa ekvivalentná dávka.

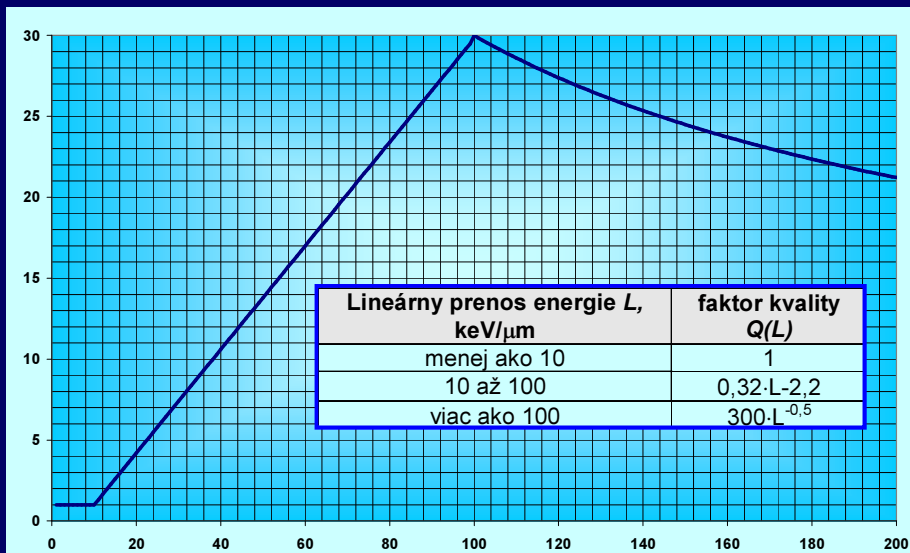
*ICRU Publication No. 51/1993

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

44

Výpočet faktora kvality $Q(L)$



16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

45

Veličiny používané na účely limitovania.

- Stredná absorbovaná dávka v orgáne D_T
- Radiačný váhový faktor w_R
- Tkanivový váhový faktor w_T
- Ekvivalentná dávka v tkanive alebo orgáne H_T
- Efektívna dávka E
- Úväzok ekvivalentnej dávky $H_T(\tau)$
- Úväzok efektívnej dávky $E(\tau)$
- Kolektívna ekvivalentná dávka S_T
- Kolektívna efektívna dávka S

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

46

Stredná absorbovaná dávka v orgáne D_T

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D \cdot dm$$

- m_T je hmotnosť tkaniva alebo orgánu
- D je absorbovaná dávka v hmotnostnom elemente dm
- D_T sa rovná pomeru odovzdanej energie ε_T tkanivu alebo orgánu a hmotnosti tkaniva alebo orgánu m_T
- Nazýva sa tiež aj orgánová dávka.

Ekvivalentná dávka v tkanive alebo orgáne H_T

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

- $D_{T,R}$ je stredná absorbovaná dávka v biologickom tkanive T spôsobená žiarením typu R.
- Radiačný váhový faktor w_R vyjadruje rozdielny biologický účinok jednotlivých druhov ionizujúceho žiarenia (RBU).
- Názov hlavnej jednotky dávkového ekvivalentu a ekvivalentnej dávky je sievert (Sv) = J.kg⁻¹.

Hodnoty radiačného váhového faktora w_R

Druh žiarenia a jeho energia	w_R
Fotóny všetkých energií	1
Elektróny všetkých energií	1
Neutróny, energia E	
< 10 keV	5
10 keV - 100 keV	10
100 keV - 2 MeV	20
2 MeV - 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protóny > 2 MeV	5
α - častice, fragmenty, ťažké jadrá	20

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

49

Hodnoty radiačného váhového faktora w_R

Druh žiarenia a jeho energia	w_R , (ICRP 60)	w_R , (ICRP 103)
Fotóny všetkých energií	1	1
Elektróny všetkých energií	1	1
Neutróny, energia E		spojitá funkcia:
< 10 keV	5	$2,5 + 18,2e^{-[\ln(E_n)]^2/6}, E_n < \text{MeV}$
10 keV - 100 keV	10	$5,0 + 17,0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}, 1\text{MeV} < E_n < 50\text{MeV}$
100 keV - 2 MeV	20	
2 MeV - 20 MeV	10	$2,5 + 3,25e^{-[\ln(0,04E_n)]^2/6}, E_n > 50\text{MeV}$
> 20 MeV	5	
Protóny > 2 MeV	5	2
α - častice, fragmenty, ťažké jadrá	20	20

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

50

Efektívna dávka

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T$$

- **Efektívna dávka** E je súčtom ekvivalentných dávok H_T vo všetkých orgánoch alebo tkanivách vynásobených príslušným tkanivovým váhovým faktorom w_T .
- w_T vyjadruje vzťah medzi pravdepodobnosťou náhodných účinkov žiarenia a ekvivalentnou dávkou

$$E = \sum_T w_T \cdot \sum_R w_R \cdot D_{T,R} = \sum_R w_R \sum_T w_T \cdot D_{T,R}$$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

51

Tkanivový váhový faktor w_T

Tkanivo, orgán	Tkanivový váhový faktor w_T
Gonády	0,20
Červená kostná dreň	0,12
Hrubé črevo	0,12
Pľúca	0,12
Žalúdok	0,12
Močový mechúr	0,05
Mliečna žľaza	0,05
Pečeň	0,05
Pažerák	0,05
Štítna žľaza	0,05
Koža	0,01
Povrchy kostí	0,01
Ostatné orgány a tkanivá	0,05

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

52

Tkanivový váhový faktor w_T

Tkanivo, orgán	Tkanivový váhový faktor w_T , (ICRP 60)	Tkanivový váhový faktor w_T , (ICRP 103)
Gonády	0,20	0,08
Červená kostná dreň	0,12	0,12
Hrubé črevo	0,12	0,12
Plúca	0,12	0,12
Žalúdok	0,12	0,12
Močový mechúr	0,05	0,04
Mliečna žľaza	0,05	0,12
Pečeň	0,05	0,04
Pažerák	0,05	0,04
Štítna žľaza	0,05	0,04
Koža	0,01	0,01
Povrchy kostí	0,01	0,01
Slinná žľaza	-	0,01
Mozog	-	0,01
Ostatné orgány a tkanivá	0,05	0,12

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

53

Úväzok ekvivalentnej dávky Úväzok efektívnej dávky

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

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

- τ ak nie je špecifikované, tak sa normálne ráta pre profesionálnych pracovníkov 50 rokov u obyvateľstva 70 rokov

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

54

Kolektívna ekvivalentná dávka

$$S_T = \sum_i \bar{H}_{T,i} \cdot N_i$$

- N_i je počet jednotlivcov v populačnej skupine i , ktorí obdržali strednú ekvivalentnú dávku $H_{T,i}$

Kolektívna efektívna dávka S

$$S = \sum_i \bar{E}_i P_i$$

- E_i je stredná efektívna dávka pre jednotlivca z populačnej podskupiny i , ktorej zodpovedá počet členov P_i .

Pracovné (operačné) veličiny pre ožiarenie z vonkajších zdrojov

- Boli definované pre praktické merania, pre monitorovanie priestoru a osôb.
- Sú odvodené z dávkového ekvivalentu v bode fantómu alebo tela, závisia od typu a energie žiarenia v bode a preto môžu byť vypočítané na základe fluencie v bode.
- Pre monitorovanie osôb sa používa **osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$** .
- Pre monitorovanie priestoru **priestorový dávkový ekvivalent a smerový dávkový ekvivalent $H^*(d)$ a $H'(d, \Omega)$** .

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

57

Osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$

- $H_p(d)$ je dávkový ekvivalent v mäkkých tkanivách v hĺbke d pod stanoveným bodom tela.
- Jeho jednotkou je J.kg^{-1} a nazýva sa sievert [Sv].
- Veličina $H_p(d)$ je meraná detektorom, ktorý sa nosí na povrchu tela a je obklopený primeranou hrúbkou materiálu tkanivu ekvivalentného.
- V osobnej dozimetrii sa používa:
 - $H_p(10)$ - pre odhad efektívnej dávky E
 - $H_p(0,07)$ - pre odhad ekvivalentnej dávky na kožu
 - $H_p(3)$ - pre odhad ekvivalentnej dávky v očnej šošovke

16. mája 2014

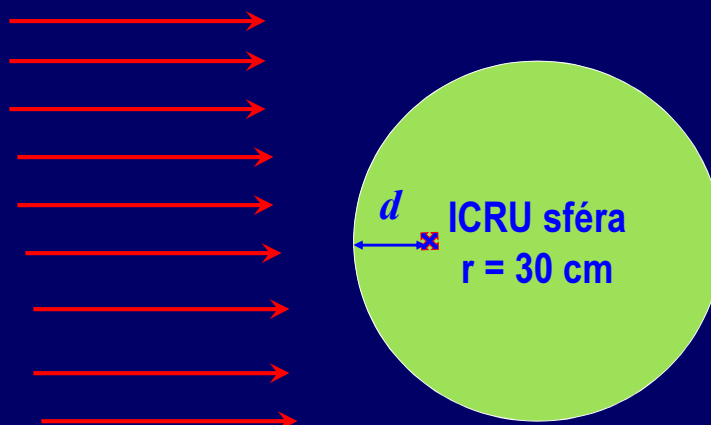
Dozimetria a radiačná ochrana

58

Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$

- Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$ je dávkový ekvivalent v bode radiačného poľa, ktorý by bol vytvorený zodpovedajúcim **rozšíreným a usporiadaným poľom** v ICRU sfére v hĺbke d na polomere, ktorý je opačný ako smer poľa.
- Jednotkou je sievert (Sv) = J.kg⁻¹.
- Pre silno prenikavé žiarenie sa odporúča hĺbka $d=10$ mm.
- Pre slabo prenikavé žiarenie sa používa pre kožu hĺbka 0,07 mm a pre očné šošovku 3 mm.
- Hodnota $H^*(10)$ predstavuje dávkový ekvivalent v hĺbke 10 mm ICRU gule a slúži ako odhad ekvivalentnej dávky u osoby, vyskytujúcej sa v meranom priestore, v hĺbke 10 mm.

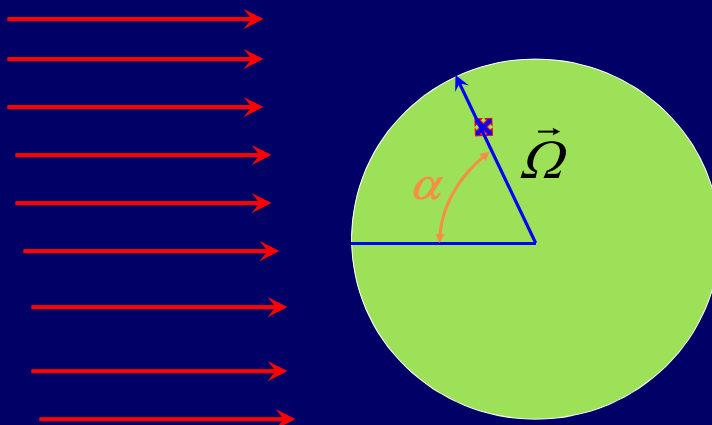
Priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$



Smerový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$

- Pre smerový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$ treba špecifikovať smer Ω , teda uhol pod ktorým je meraný objekt otočený k smeru poľa ionizujúceho žiarenia.
- Smerový dávkový ekvivalent môže byť určený aj len pre **rozšírené pole**, teda bez smerového usmernenia. Vtedy treba zvoliť vhodný súradnicový systém, s ohľadom na ktorý sa bude definovať smer Ω .

Smerový dávkový ekvivalent $H^*(d, \Omega)$



ICRU sféra

- **sféra s priemerom 30 cm, vyhotovená z tkanivu ekvivalentného materiálu:**
 - hustotou $1\text{g}\cdot\text{cm}^3$ a hmotnostným zložením
 - 76,2% kyslíka,
 - 11,1 % uhlíka,
 - 10,1% vodíka a
 - 2,6% dusíka.

Silno (slabo) prenikavé žiarenie

- ak dávkový ekvivalent odovzdaný malej ploche citlivej vrstvy kože je menej (viac) ako 10-násobok efektívneho dávkového ekvivalentu pre danú orientáciu tela v homogénnom a jednosmernom poli ionizujúceho žiarenia
- pre slabo prenikavé žiarenie je dôležité poznať dávkový ekvivalent v očnej šošovke alebo v koži
- za slabo prenikavé žiarenie sa považuje fotónové žiarenie s energiou do 15 keV, alfa a beta žiarenie

Hodnotenie vonkajšieho a vnútorného ožiarenia

- Pri osobnom monitorovaní a monitorovaní priestorov sa pre prenikavé žiarenie odporúča používať hĺbka 10 mm, pre slabo prenikavé 0,07 mm a pre oko 3 mm.
- Pri vonkajšom ožiarení ekvivalentnej dávke v každom orgáne s výnimkou kože zodpovedá hĺbkový osobný dávkový ekvivalent $H_p(10)$, ekvivalentnej dávke v koži povrchový osobný dávkový ekvivalent $H_p(0,07)$.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

65

Hodnotenie ožiarenia

- Ak ide o nerovnomerné ožiarenie, pre ekvivalentnú dávku v koži sa berie do úvahy priemer z plochy 1 cm^2 v najviac ožiarenej oblasti.
- Ekvivalentnej dávke v očnej šošovke zodpovedá osobný dávkový ekvivalent $H_p(3)$ v hĺbke 3 mm.
- Pri monitorovaní prostredia sa používa priestorový dávkový ekvivalent $H^*(d)$, smerový dávkový ekvivalent $H'(d, \Omega)$, pričom d je hĺbka v mm pod povrchom ICRU sféry a Ω je uhol dopadu.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

66

Porovnanie s limitom

- Limity efektívnej dávky E sa vzťahujú na súčet efektívnej dávky z vonkajšieho ožiarenia a úväzkov efektívnej dávky z jednotlivých príjmov rádioaktívnej látky v kalendárnom roku zo všetkých zdrojov ionizujúceho žiarenia, ktorým sú vystavené osoby pracujúce so zdrojmi žiarenia a jednotlivci z obyvateľstva.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

67

Celková efektívna dávka, (mSv)

$$E = E_{\text{external}} + \sum_j h(g)_{j,\text{ing}} \cdot I_{j,\text{ing}} + \sum_j h(g)_{j,\text{inh}} \cdot I_{j,\text{inh}}$$

E_{external} je príslušná efektívna dávka z vonkajšieho ožiarenia,

$I_{j,\text{ing}}$ je príjem rádionuklidu j (Bq) potravou za rok,

$I_{j,\text{inh}}$ je príjem rádionuklidu j (Bq) dýchaním za rok,

$h(g)_{j,\text{ing}}$ je konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) potravou pre rôzne vekové skupiny g ,

$h(g)_{j,\text{inh}}$ je konverzný faktor na výpočet úväzku efektívnej dávky z príjmu rádionuklidu j (Sv/Bq) dýchaním pre rôzne vekové skupiny g .

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

68

Príjem rádionuklidov potravou $I_{j,ing}$ (Bq)

$$I_{j,ing} = \sum_P a_{P,j} \cdot P_P$$

$a_{P,j}$ je priemerná ročná merná aktivita j-tého rádionuklidu v potravine P a vode [Bq/kg, resp. Bq/l],

P_P je spotreba potravy P v jednom roku [kg].

Ročnú spotrebu potravy je potrebné určiť zo štatistických prehľadov, a to osobitne pre jednotlivé vekové kategórie.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

69

Príjem rádionuklidov dýchaním $I_{j,inh}$ (Bq)

$$I_{j,inh} = a_{V,j} \cdot B$$

$a_{V,j}$ je priemerná ročná merná aktivita j-tého rádionuklidu vo vzduchu [Bq.m⁻³],

B je množstvo vdychovaného vzduchu v jednom roku [m³.rok⁻¹].

Hodnoty množstva vdychovaného vzduchu pre jednotlivé skupiny osôb

Skupina osôb	Vek v rokoch	B (m ³ .rok ⁻¹)
Pracovníci so zdrojmi ionizujúceho žiarenia	nad 18	2000
	0 – 1	1000
Ostatní obyvatelia	1 – 2	2000
	2 – 7	4000
	7 – 12	6000
	12 – 17	8000
	nad 17	8500

Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing}

Tabuľka č. 4
Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing} na prepočet príjmu rádionuklidov vdýchnutím (inhaláciou) aerosólov a požitím (ingesciou) na úroveň efektívnej dávky pre pracovníkov

Prvok	Polčas rozpadu	Inhalácia				Ingescia	
Nuklid		typ	f _i	h _{inh} [Sv/Bq]		f _i	h _{ing} [Sv/Bq]
				d _{ama} = 1 μm	d _{ama} = 5 μm		
vodík							
H-3	12,3 r			Pozri tabuľku 7		1	1.8.10 ⁻¹¹
(tríciovaná voda)							
organicky viazané trícium	12,3 r			Pozri tabuľku 7		1	4.2.10 ⁻¹¹
berýlium							
Be-7	53,3 d	M	0,005	4.8.10 ⁻¹¹	4.3.10 ⁻¹¹	0,005	2.8.10 ⁻¹¹
		S	0,005	5.2.10 ⁻¹¹	4.6.10 ⁻¹¹		
Be-10	1,60 10 ⁶ r	M	0,005	9.1.10 ⁻⁹	6.7.10 ⁻⁹	0,005	1.1.10 ⁻⁹
		S	0,005	3.2.10 ⁻⁸	1.9.10 ⁻⁸		
uhlík							
C-11	0,340 h			Pozri tabuľku 7		1	2.4.10 ⁻¹¹
C-14	5,73 10 ³ r			Pozri tabuľku 7		1	5.8.10 ⁻¹⁰
fluór							
F-18	1,83 h	F	1	3.0.10 ⁻¹¹	5.4.10 ⁻¹¹	1	4.9.10 ⁻¹¹
		M	1	5.7.10 ⁻¹¹	8.9.10 ⁻¹¹		
		S	1	6.0.10 ⁻¹¹	9.3.10 ⁻¹¹		
sodík							
Na-22	2,60 r	F	1	1.3.10 ⁻⁹	2.0.10 ⁻⁹	1	3.2.10 ⁻⁹
Na-24	15,0 h	F	1	2.9.10 ⁻¹⁰	5.3.10 ⁻¹⁰	1	4.3.10 ⁻¹⁰
horčík							
Mg-28	20,9 h	F	0,5	6.4.10 ⁻¹⁰	1.1.10 ⁻⁹	0,5	2.2.10 ⁻⁹

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

71

Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing}

- Konverzné faktory h_{inh} pre príjem inhaláciou sú uvedené v závislosti od typu absorpcie v pľúcach.
- Pri bližšie neidentifikovaných rádionuklidoch a chemických formách rádioaktívnych látok alebo vlastností vdychovaného aerosólu sa aktivita prisudzuje tým rádionuklidom a ich formám, prípadne takému aerosólu, pre ktorý je stanovený najvyšší konverzný faktor.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

72

Konverzné faktory h_{inh} a h_{ing}

- Absorpcia v pľúcach je vyjadrená typom **F**, **M** alebo **S** charakterizujúcim v modelových výpočtoch rýchlosť, ktorou látka prechádza z pľúc do telesných tekutín (F – rýchlo, M – stredne, S – pomaly), a koeficientom f_1 charakterizujúcim frakciu, ktorá prechádza v tráviacom ústrojenstve do telesných tekutín.

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

73

Konverzné faktory na prepočet objemových aktivít vzácnych rádioaktívnych plynov na príkon efektívnej dávky u dospelých jednotlivcov z obyvateľstva a u pracovníkov

Nuklid	Konverzný faktor [Sv.d ⁻¹ /(Bq.m ⁻³)]
Ar-37	$4,1 \cdot 10^{-15}$
Ar-39	$1,1 \cdot 10^{-11}$
Ar-41	$5,3 \cdot 10^{-9}$
Kr-74	$4,5 \cdot 10^{-9}$
Kr-76	$1,6 \cdot 10^{-9}$
Kr-77	$3,9 \cdot 10^{-9}$
Kr-79	$9,7 \cdot 10^{-10}$
Kr-81	$2,1 \cdot 10^{-11}$
Kr-83m	$2,1 \cdot 10^{-13}$
Kr-85	$2,2 \cdot 10^{-11}$

Nuklid	Konverzný faktor [Sv.d ⁻¹ /(Bq.m ⁻³)]
Kr-85m	$5,9 \cdot 10^{-10}$
Kr-87	$3,4 \cdot 10^{-9}$
Kr-88	$8,4 \cdot 10^{-9}$
Xe-120	$1,5 \cdot 10^{-9}$
Xe-121	$7,5 \cdot 10^{-9}$
Xe-122	$1,9 \cdot 10^{-10}$
Xe-123	$2,4 \cdot 10^{-9}$
Xe-125	$9,3 \cdot 10^{-10}$
Xe-127	$9,7 \cdot 10^{-10}$
Xe-129m	$8,1 \cdot 10^{-11}$

Nuklid	Konverzný faktor [Sv.d ⁻¹ /(Bq.m ⁻³)]
Xe-131m	$3,2 \cdot 10^{-11}$
Xe-133m	$1,1 \cdot 10^{-10}$
Xe-133	$1,2 \cdot 10^{-10}$
Xe-135m	$1,6 \cdot 10^{-9}$
Xe-135	$9,6 \cdot 10^{-10}$
Xe-138	$4,7 \cdot 10^{-9}$

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

74

Tabuľka č. 7
Koeficienty efektívnej dávky pre rozpustné alebo reaktívne plyny

Nuklid/chemická forma	$t_{1/2}$	$h_{inh} [Sv.Bq^{-1}]$
H-3 plyn	12,3 r	$1,8 \cdot 10^{-15}$
H-3 vodná para	12,3 r	$1,8 \cdot 10^{-11}$
H-3 organicky viazané trícium	12,3 r	$4,1 \cdot 10^{-11}$
I-120 para	1,35 h	$3,0 \cdot 10^{-10}$
I-120m para	0,88 h	$1,8 \cdot 10^{-10}$
I-121 para	2,12 h	$8,6 \cdot 10^{-11}$
I-123 para	13,2 h	$2,1 \cdot 10^{-10}$
I-124 para	4,18 d	$1,2 \cdot 10^{-8}$
I-125 para	60,1 d	$1,4 \cdot 10^{-8}$
I-126 para	13,0 d	$2,6 \cdot 10^{-8}$
I-128 para	0,42 h	$6,5 \cdot 10^{-11}$
I-129 para	$1,57 \cdot 10^7$ r	$9,6 \cdot 10^{-8}$
I-130 para	12,4 h	$1,9 \cdot 10^{-9}$
I-131 para	8,04 d	$2,0 \cdot 10^{-8}$
I-132 para	2,30 h	$3,1 \cdot 10^{-10}$
I-132m para	1,39 h	$2,7 \cdot 10^{-10}$
I-133 para	20,8 h	$4,0 \cdot 10^{-9}$
I-134 para	0,88 h	$1,5 \cdot 10^{-10}$
I-135 para	6,61 h	$9,2 \cdot 10^{-10}$

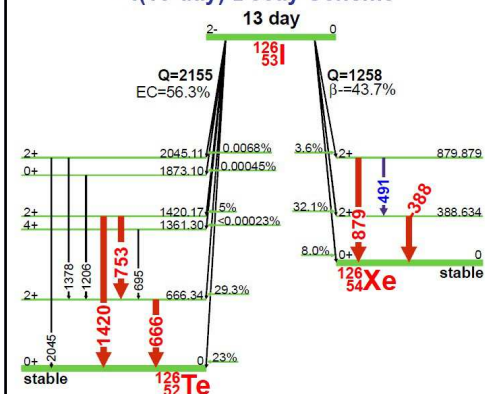
16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

75

I-126 para $h_{inh}=2,6 \cdot 10^{-8}$

^{126}I (13 day) Decay Scheme



GAMMA-RAY ENERGIES AND INTENSITIES

Nuclide: ^{126}I Half Life: 13.11(5) day
 Detector: 2.5 cm² x 4 mm Ge (Li) Method of Production: $^{127}\text{I}(\gamma, n)$

E_γ (keV)	σE_γ	I_γ (rel)	I_γ (%)	σI_γ	S
388.633	0.011	100.	34.	3.	1
491.243	0.011	9.5	2.86	0.25	2
511.006		5.8	2.3	0.3	2
666.331	0.012	94.0	33.1	2.4	1
695.		0.0002			4
753.819	0.013	11.6	4.2	0.3	1
879.876	0.013	2.5	0.76	0.07	1
1206.8	0.3		0.0004	0.0001	4
1378.76			0.0024	0.0002	4
1420.19	0.03	0.85	0.29	0.02	1
2045.09	0.05		0.0046	0.0004	4

$E_\gamma, \sigma E_\gamma, I_\gamma, \sigma I_\gamma$ - 1998 ENSDF Data

16. mája 2014

Dozimetria a radiačná ochrana

76

