

MONITOROVANIE IONIZUJÚCEHO ŽIARENIA V RADIÁCNEJ OCHRANE

Pod monitorovaním sa rozumie cielené meranie veličín charakterizujúcich ionizujúce žiarenie. Jeho účelom je zabezpečenie optimálnej úrovne ochrany osôb ako aj pracovného alebo životného prostredia pred škodlivými účinkami ionizujúceho žiarenia.

UČEBNÉ CIELE

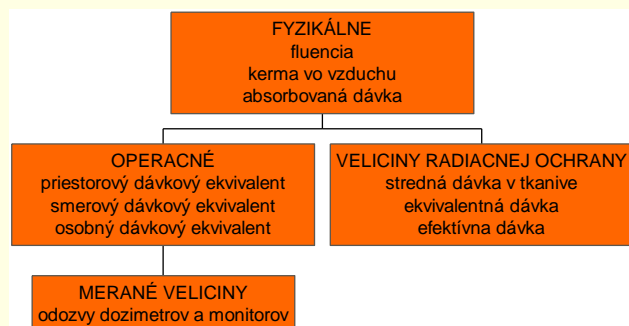
Študent musí vedieť definovať základné veličiny používané v dozimetrii a v ochrane pred ionizujúcim žiarením (IŽ) a ich jednotky. Musí vedieť rozlíšiť veličiny charakterizujúce zdroje IŽ, pole žiarenia, veličiny popisujúce interakciu IŽ s hmotou a veličiny používané v ochrane pred IŽ.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Aktivita, hmotnostná a objemová aktivita, fluencia, absorbovaná dávka, príkon absorbovanej dávky, kerma, kermový príkon, lineárny prenos energie, dávkový ekvivalent, ekvivalentná dávka, príkon ekvivalentnej dávky, efektívna dávka

ÚVOD

Monitorovanie zahŕňa meranie veličín charakterizujúcich pole žiarenia, ako aj interpretáciu a hodnotenie ožiarenia profesionálnych pracovníkov a ďalších potenciálne ožiarených jednotlivcov z populácie. Rozsah monitorovania, hodnotenia a overovania príslušných veličín, parametrov a iných skutočností dôležitých z hľadiska radiačnej ochrany musí zodpovedať rozsahu a spôsobu výkonu činností vedúcich k ožiareniu. Uskutočňuje sa na pracoviskách s ionizujúcim žiarením ako aj v životnom prostredí.



Obr.1. Fyzikálne a operačné veličiny, veličiny radiačnej ochrany a merané veličiny.

Program monitorovania obecné pozostáva z:

- ✓ monitorovania pre bežnú prevádzku
- ✓ pre predvídateľné odchýlky od bežnej prevádzky
- ✓ pre prípady radiačných nehôd a radiačných havárií

Obsahom monitorovania je najmä:

- ✓ vymedzenie veličín, ktoré je potrebné monitorovať,
- ✓ spôsob vyhodnocovania výsledkov merania,
- ✓ hodnoty referenčných úrovní a prehľad príslušných opatrení pri ich prekročení,

- ✓ špecifikácia metodík detekcie žiarenia, spôsobu, rozsahu a frekvencie meraní, ako aj stanovenie neistôt,
- ✓ výber vhodných meracích zariadení a ich parametrov.

Monitorovanie sa všeobecne delí na **kontinuálne** (nepretržité), **periodické** a **operatívne** monitorovanie. Cieľom kontinuálneho monitorovania je preukázať, že pracovné podmienky zostávajú stále bezpečné. Úlohou pravidelného monitorovania je potvrdzovať bezpečnosť pracovných podmienok v stanovených časových intervaloch. Cieľom operatívneho monitorovania je zhodnotiť a zabezpečiť prijateľnosť určitej vybranej činnosti vedúcej k ožiareniu.

Obsah kapitoly je zameraný predovšetkým na problematiku monitorovania pri činnostiach vedúcich k ožiareniu osôb a monitorovania pracovného prostredia.

ZÁKLADNÉ VELIČINY POUŽÍVANÉ V DOZIMETRII A V OCHRANE PRED IONIZUJÚCIM ŽIARENÍM

Základné veličiny používané v dozimetrii a ochrane pred ionizujúcim žiarením delíme na fyzikálne veličiny, operačné veličiny, veličiny radiačnej ochrany a merané **veličiny** (Obr.1). Tieto veličiny charakterizujú zdroje ionizujúceho žiarenia, pole ionizujúceho žiarenia ako aj potreby ochrany pred žiarením.

Veličiny charakterizujúce zdroje ionizujúceho žiarenia

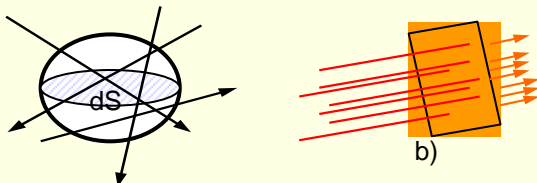
Základnou veličinou charakterizujúcou zdroj ionizujúceho žiarenia z hľadiska množstva rádioaktívnej látky, ktorú obsahuje je **aktivita A**. Je definovaná ako podiel stredného počtu samovoľných rádioaktívnych premien z daného energetického stavu v určitom množstve rádioaktívnej látky dN , ku ktorému dôjde za časový interval dt a tohto intervalu:

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

Jednotkou aktivity je **becquerel** [Bq] s rozmerom v sústave SI [s^{-1}] a predstavuje jednu rádioaktívnu premenu za jednu sekundu. Predtým sa používala jednotka **Curie** [Ci], ktorá zodpovedala aktivite 1g ^{226}Ra . Medzi jednotkou Bq a Ci platí prevodový vzťah:

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

Odvođenými veličinami aktivity rádionuklidu sú **hmotnostná aktivita**, **objemová aktivita** a **plošná aktivita**. Hmotnostná aktivita sa vzťahuje na jednotku hmotnosti rádioaktívnej látky a jej jednotkou je [$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$]. Objemová aktivita sa vzťahuje na jednotku objemu rádioaktívnej látky. Jej jednotkou je [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$]. U plošných zdrojov žiarenia sa hovorí o plošnej aktivite. Jednotkou je [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$] (Hušák a Filip, 1998, Musílek, 2000).



Obr.2. K definícii fluencie častíc častice prichádzajúce zo všetkých smerov, dS je plocha hlavného rezu gule rovnobežný zväzok častíc, prechádzajúcich cez plochu 1 m^2 plochy, kolmej na ich smer

Veličiny charakterizujúce pole ionizujúceho žiarenia

V okolí zdrojov ionizujúceho žiarenia existuje určité pole žiarenia, ktoré je charakterizované veličinou **fluencia častíc** (hustota prechádzajúcich častíc). **Fluencia** (Obr.2.) častíc je definovaná ako podiel počtu častíc dN , ktoré vstúpili do gule s plošným obsahom dS hlavného rezu:

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

Jednotkou fluencie častíc je $[m^{-2}]$. Hustotu prechádzajúcich častíc za časový interval vyjadruje **príkon fluencie častíc** (hustota toku častíc), ktorého jednotkou je $[m^{-2} \cdot s^{-1}]$.

Ďalšími veličinami charakterizujúcimi pole ionizujúceho žiarenia sú **fluencia energie** (hustota prechádzajúcej energie), ktorej jednotkou je $[J \cdot m^{-2}]$ a **príkon fluencie energie** (hustota toku energie), ktorej jednotkou je $[W \cdot m^{-2}]$ (Hušák a Filip, 1998, Musílek, 2000, Stadtman, 2001).

Veličiny charakterizujúce interakciu ionizujúceho žiarenia s hmotou

Základnou veličinou charakterizujúcou interakciu ionizujúceho žiarenia s hmotou je **absorbovaná dávka D** . Je definovaná ako podiel strednej energie odovzdanej ionizujúcim žiarením látke $d\varepsilon$ a hmotnosti látky, ktorej bola energia odovzdaná dm :

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

Jednotkou absorbovanej dávky je gray [Gy], ktorý sa rovná energii 1 joule absorbovanej v 1 kg látky. Staršou jednotkou absorbovanej dávky bol *rad*, ktorého vzťah k terajšej jednotke gray je $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$.

Absorbovaná dávka popisuje fyzikálne efekty v danej látke, nemožno ju preto oddeliť od látky, v ktorej je stanovovaná. Nemôžeme hovoriť o absorbovanej dávke ako takej, musí byť uvedená spoločne s materiálom, napr. absorbovaná dávka v mäkkom tkanive a pod. Absorbovaná dávka popisuje odovzdávanie energie za určité časové obdobie.

Príklad 1

Absorbovaná dávka 4 Gy spôsobí smrť 50 % zasiahnutej populácie. Vypočítajte o koľko by sa zvýšila teplota tela, ak by sa táto energia prejavila v tele vo forme tepla ($c_{\text{tela}} \sim c_{\text{H}_2\text{O}} = 4180 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

Riešenie:

Absorbovanú dávku podľa definície môžeme vyjadriť ako energiu absorbovanú v tele na jednotku hmotnosti a túto energiu vyjadríme ako tepelnú energiu:

$$D = \frac{Q}{m} = \frac{mc\Delta T}{m} \Rightarrow \Delta T = \frac{D}{c} = 0,96 \text{ mK.}$$

Z výsledku vidíme, že poškodenie organizmu účinkami ionizujúceho žiarenia nesúvisí s tepelným ohrevom, ale žiarenie porušuje väzby molekúl a tým funkciu tkaniva, ktoré ho absorbovalo.

Okamžitú situáciu vyjadruje **príkon absorbovanej dávky \dot{D}** (dávkový príkon). Je to prírastok absorbovanej dávky dD za určitý časový interval dt :

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

Jednotkou je $[Gy \cdot s^{-1}]$.

Absorbovaná dávka sa vzťahuje k odovzdávaniu energie v danom mieste (t.j. z nabitých častíc na častice látky). Ak sú primárne častice nenabité, prvým krokom ich interakcie s látkou je odovzdanie energie na nabitú časticu. Tento krok popisuje veličina **kerma K** (z anglického „Kinetic Energy Released in Matter“ – kinetická energia uvoľnená v látke). Táto veličina bola navrhnutá na opis účinkov nepriamo

ionizujúceho žiarenia, medzi ktoré patrí aj röntgenové žiarenie využívané pri rádiologických vyšetreniach. Kerma je definovaná v danom bode ako podiel súčtu počiatkových kinetických energií E_k všetkých nabitých častíc uvoľnených nenabitými ionizujúcimi časticami (nepriamo ionizujúcim žiarením) v elemente látky s hmotnosťou dm a tejto hmotnosti:

$$K = \frac{\sum E_k}{dm}$$

Kerma je tiež definovaná vo vzťahu k danej látke, napr. kerma vo vzduchu, tkanive a pod. Z definície je zrejmé, že je použiteľná len pre nenabité častice. Jednotkou je rovnako ako u dávky [Gy]. Za podmienok rovnováhy nabitých častíc sa kerma rovná absorbovanej dávke. Podobne ako dávkový príkon je definovaný aj **kermový príkon** \dot{K} .

Historicky najstaršou dozimetrickou veličinou je **expozícia X**. Jej podstatným obmedzením je skutočnosť, že je definovaná len pre fotónové žiarenie vo vzduchu. Je to podiel absolútnej hodnoty celkového elektrického náboja dQ iónov rovnakého znamienka, vytvorených vo vzduchu pri úplnom zabrzdení všetkých elektrónov a pozitronov, ktoré boli uvoľnené vo vzduchu s hmotnosťou dm a tejto hmotnosti, určený v danom bode:

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

Expozícia je definovaná výlučne pre vzduch. Jednotkou je [C·kg⁻¹]. V staršej literatúre sa môžeme stretnúť tiež s jednotkou **röntgen (R)**, odvodenou od náboja o veľkosti jednej elektrostatickej jednotky. Nepraktický prevodný vzťah $1 R = 2,58 \cdot 10^{-4} C \cdot kg^{-1}$ a hlavne skutočnosť, že zavedením jednotiek SI prestal platiť pre fotóny vo vzduchu síce približný, ale užitočný vzťah $1 rad = 1 R$, viedli k nahradeniu expozície z radiačnej ochrany veličinou kerma (ICRU, 1993, Hušák a Filip, 1998, Musílek, 2000, Stadtmann, 2001).

Pri rozbere účinkov ionizujúceho žiarenia na živú hmotu je základnou veličinou absorbovaná dávka v skúmanej hmote. Absorbovaná dávka je však makroskopickou veličinou a nezahrňuje okamžité lokálne rozloženie energie odovzdanej hmote, ktoré môže ovplyvniť výsledné účinky žiarenia. Mnoho účinkov vyvolaných ionizujúcim žiarením (chemické zmeny, genetické mutácie, smrť buniek a pod.), závisia od priestorového rozloženia jednotlivých prenosov energie ionizujúcich častíc na ožarovanú hmotu. Z toho dôvodu bola zavedená veličina **lineárny prenos energie (LET)**. Je definovaná ako podiel strednej energie prenesenej v danom mieste nabitou časticou na elektróny dE , pri jej pohybe po dráhe $d\ell$, ktorú ionizujúca častica prešla:

$$L = \frac{dE}{d\ell}$$

Jednotkou lineárneho prenosu energie je [J·m⁻¹]. Často sa používa aj jednotka [keV·μm⁻¹], pričom platí prevodový vzťah $1 keV \cdot \mu m^{-1} = 1,602 \cdot 10^{-10} J \cdot m^{-1}$ (ICRU, 1993, Hušák a Filip, 1998, Musílek, 2000).

Príklad 2

Žiarič ¹³⁷Cs s aktivitou $5 \cdot 10^4$ Bq je umiestnený vo vzdialenosti $d = 1$ m od širšej bočnej steny kvádra vo výške 75 cm od základne kvádra, ktorý má šírku 30 cm, hrúbku 20 cm, výšku 150 cm a je naplnený vodou. 70 % žiarenia, ktoré dopadne na kváder sa v ňom absorbuje. Akú dávku v Gy by obdržal kváder za 8 hodín? Energia γ - žiarenia cézia je $E_{Cs} = 0,66$ MeV.

Riešenie:

Emitované žiarenie sa šíri zo zdroja rovnomerne do celého priestoru. Preto na jednotku plochy vo

$$\Phi_t = \frac{A}{4\pi d^2},$$

vzdialenosti d dopadne žiarenie, ktoré odpovedá fluencii žiarenia za sekundu, t.j.

kde A je aktivita zdroja. Potom na čelnú plochu kvádra S dopadne Φ_k počet častíc

$$\Phi_k = \Phi_t S.$$

Množstvo absorbovaných častíc vo vode bude $\Phi_A = 0,7 \Phi_t S$, ktoré odovzdajú celú svoju energiu E prostrediu valca:

$$E = \Phi_A E_{Cs} = \frac{0,7AS E_{Cs}}{4\pi d^2}.$$

Potom absorbovaná dávka, ktorú obdržal kváder naplnený vodou za 8 hodín ožarovania je

$$D = \frac{E}{m} t,$$

kde m je hmotnosť kvádra, vyjadrená pomocou hustoty a objemu: $m = \rho V$. Absorbovaná dávka žiarenia bude:

$$D = \frac{0,7AS E_{Cs}}{4\pi d^2 \rho V} t.$$

Po dosadení číselných hodnôt $D = 0,04 \mu\text{Gy}$.

Veličiny používané v ochrane pred ionizujúcim žiarením

Absorbovaná dávka, kerma a fluencia častíc nemôžu byť použité priamo na limitovanie radiačnej záťaže z dvoch hlavných dôvodov:

rôzne druhy žiarenia majú pri rovnakej dávke rôzny biologický účinok, rôzne tkanivá a orgány majú odlišnú rádiosenzitivitu.

Z toho dôvodu museli byť zavedené ďalšie veličiny použiteľné v ochrane pred žiarením. Na charakterizovanie rôznej biologickej účinnosti jednotlivých typov žiarenia bola zavedená veličina **dávkový ekvivalent** H . Dávkový ekvivalent je definovaný ako súčin absorbovanej dávky D v tkanive a faktora kvality žiarenia Q :

$$H = D \cdot Q$$

Faktor kvality žiarenia Q vyjadruje rozdielnu biologickú účinnosť rôznych druhov žiarenia a má preto rôzne číselné hodnoty pre jednotlivé druhy žiarenia (pre fotóny röntgenového a γ žiarenia a pre β žiarenie $Q = 1$, pre neutróny a protóny $Q = 10$ a pre α žiarenie $Q = 20$). Pretože Q nemá rozmer, jednotkou dávkového ekvivalentu je $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$. Aby sa táto jednotka odlišila od jednotky absorbovanej dávky, používa sa pre ňu špeciálny názov *sievert* [Sv]. Pre röntgenové, γ a β žiarenie platí, že 1 Sv sa rovná 1 Gy (ICRU, 1993, IAEA, 1996, Hušák a Filip, 1998, Musílek, 2000).

V roku 1990 nahradila ICRP vo svojich odporúčaní č. 60 dávkový ekvivalent veličinou **ekvivalentná dávka** (H_T). Ekvivalentná dávka sa využíva v ochrane pred žiarením pri ožiarení jednotlivých tkanív alebo orgánov. Je definovaná ako súčin strednej absorbovanej dávky v tkanive alebo orgáne D_T a príslušného radiačného váhového faktora w_R :

$$H_T = w_R D_T$$

Radiačný váhový faktor w_R slúži, podobne ako faktor kvality žiarenia, na vyjadrenie rôznej biologickej účinnosti rôznych druhov žiarenia. Radiačný váhový faktor sa vzťahuje hlavne k miere neskorých účinkov ionizujúceho žiarenia, ktoré majú stochastický charakter. Jeho hodnoty sú uvedené v **tabuľke 1**.

Ekvivalentná dávka nereprezentuje účinky ionizujúceho žiarenia na človeka pri veľkých absorbovaných dávkach a nemožno ju teda použiť k určeniu pravdepodobných včasných následkov pri radiačných nehodách. Preto sa používa na vyjadrenie radiačnej záťaže len v oblasti radiačných limitov a nižších dávok. Jednotkou ekvivalentnej dávky je sievert, ktorého hodnoty sa používajú v ochrane pred žiarením na porovnávanie hodnôt H_T s príslušnými hodnotami limitov. Odvedenou veličinou je **příkon**

ekvivalentnej dávky \dot{H} , ktorý je definovaný ako podiel prírastku ekvivalentnej dávky v určitom časovom intervale a tohto časového intervalu. Jednotkou je $[\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1}]$.

Ďalšou zavedenou veličinou bola **efektívna dávka** E , ktorá sa využíva v ochrane pred žiarením pri celotelovom ožiarení. Vznikla z potreby rovnakou mierou vyjadriť ožiarenie rôznych častí tela pri celotelovom ožiarení. Je to súčet stredných hodnôt ekvivalentných dávok v jednotlivých tkanivách alebo orgánoch H_T , vynásobených tkanivovým váhovým faktorom w_T :

$$E = \sum_T w_T H_T$$

Tabuľka 1 - Hodnoty radiačného váhového faktora w_R (IAEA, 1996)

Typ žiarenia	Energia	Radiačný váhový faktor w_R
Fotóny, elektróny, mióny	Všetky	1
Neutróny	< 10 keV	5
	10 keV až 100 keV	10
	100 keV až 2 MeV	20
	2 MeV až 20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protóny (okrem odrazených)	> 2 MeV	5
Alfa častice, ťažké jadrá		20

Tabuľka 2 - Hodnoty tkanivového váhového faktora w_T (ICRP 1990)

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

Tkanivový váhový faktor w_R vyjadruje relatívnu zdravotnú ujmu spojenú so stochastickými účinkami žiarenia v tkanive alebo orgáne pri rovnomernom ožiarení celého tela. Hodnoty w_T sú uvedené v **tabuľke2** , pričom platí:

$$\sum_T w_T = 1$$

Váhové faktory ukazujú, aký podiel z celkového rizika celotelového ožiarenia pripadá na každú jednotlivú časť organizmu. Jednotkou efektívnej dávky je sievert [Sv].

Keďže ekvivalentná dávka a efektívna dávka nie sú merateľnými veličinami, odporúčania ICRU č. 51 z roku 1993 opäť považujú za základnú veličinu v ochrane pred žiarením dávkový ekvivalent.

Príklad 3

Pracovník jadrovej elektrárne s hmotnosťou 75 kg vdýchol 2 mg plutónia ^{237}Pu . Tento izotop sa premieňa α - premenou s dobou polpremeny 24 360 rokov, energia emitovanej α - častice je 5,16 MeV. Plutónium sa v tele pracovníka nachádza 14 h a 90 % emitovaných α - častíc je v tele absorbovaných. Vypočítajte:

- počet atómov plutónia odpovedajúci 2 mg vzorke,
- počet atómov plutónia, ktoré sa premenia počas 14 hodín,
- energiu absorbovanú v tele,
- absorbovanú dávku,
- ekvivalentnú dávku

Riešenie:

a) Počet atómov plutónia v 2 mg vzorky je:

$$N_0 = \frac{m}{M} N_A = \frac{2 \cdot 10^{-6}}{239 \cdot 10^{-3}} 6 \cdot 10^{23} = 5 \cdot 10^{18}.$$

b) Počet atómov, ktoré sa premenia v priebehu 14 hodín:

$$N_p = N_0 - N = N_0 \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t}\right) = 5 \cdot 10^{18} \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{24360 \cdot 365 \cdot 24} \cdot 14}\right) = 2 \cdot 10^{11}.$$

c) Pri každej premene vzniká jedna α - častica s energiou $E_\alpha = 5,16$ MeV. Celková energia vzniknutých α - častíc pri všetkých premenách v priebehu 14 hodín bude: $E = N_p E_\alpha$ a z toho v tele ostáva 90 %:

$$E = 0,9 N_p E_\alpha = 0,9 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 5,16 = 9,3 \cdot 10^{11} \text{ MeV} = 0,15 \text{ J}.$$

d) Absorbovaná dávka v tele pracovníka je:

$$D = \frac{E}{m} = \frac{0,15}{75} = 2 \text{ mGy}.$$

e) Ekvivalentnú dávku dostaneme ako súčin absorbovanej dávky a radiačného váhového faktora W_R , ktorý má pre α - častice hodnotu $W_R = 20$. Potom:

$$H_T = DW_R = 2 \text{ mGy} \cdot 20 = 40 \text{ mSv}.$$

Tkanivo, orgán	Tkanivový váhový faktor w_T	
	ICRP 60	ICRP 103
Gonády	0,20	0,08
Červená kostná dreň	0,12	0,12
Pľúca	0,12	0,12
Hrubé črevo	0,12	0,12
Žalúdok	0,12	0,12
Mliečna žľaza	0,05	0,12
Štítne žľazy	0,05	0,04
Močový mechúr	0,05	0,04
Pečeň	0,05	0,04
Pažerák	0,05	0,04
Povrch kostí	0,01	0,01
Koža	0,01	0,01
Ostatné orgány a tkanivá	0,05	0,12

Tabuľka 3 - Hodnoty tkanivového váhového faktora w_T (ICRP 1990, ICRP 103)

Súčasný systém veličín a limitov v radiačnej ochrane je kompromisným riešením a delí veličiny používané v ochrane pred žiarením na tie, ktoré sú určené pre meranie a výpočty a tie, ktoré slúžia k limitovaniu ožiarenia obyvateľstva, pracovníkov a pacientov. Prvé sú založené na dávkovom ekvivalente, druhé z časti na ekvivalentnej dávke a z časti na efektívnej dávke. Na dávkovom ekvivalente sú napr. založené tri dôležité veličiny, ktoré slúžia k praktickému meraniu pri monitorovaní osôb a prostredia. Nazývajú sa aj **operačné veličiny** a patria sem **osobný dávkový ekvivalent**, **priestorový dávkový ekvivalent** a **smerový dávkový ekvivalent**. Na ekvivalentnej a efektívnej dávke sú založené napr. veličiny **úväzok ekvivalentnej dávky** a **úväzok efektívnej dávky**, ktoré slúžia na limitovanie ožiarenia pri vnútorných žiaričoch (rádionuklidoch). Dôležitými sú aj veličiny **kolektívna ekvivalentná dávka** a **kolektívna efektívna dávka** slúžiace na limitovanie ožiarenia určitých skupín populácie (pracovníci s ionizujúcim žiarením) alebo celej populácie. Uvedené kompromisné riešenie je len dočasným riešením a v budúcnosti určite dôjde k jeho ďalším úpravám (ICRU, 1993, Musílek, 2000, Stadtman, 2001).

V decembri 2007 vydala Medzinárodná Komisia pre Radiologickú Ochranu (ICRP) nové Odporúčania č.103 (Anály ICRP 37 (2-4) Amsterdam, Elsevier 2007), ktoré nahrádzajú doterajšie Odporúčania ICRP 60 z roku 1990. Kľúčovou zmenou nových Odporúčaní je prehodnotenie hodnôt tkanivových váhových faktorov na základe výsledkov rádiobiologického výskumu a epidemiologických štúdií o incidencii nádorových ochorení v exponovaných skupinách obyvateľstva a zodpovedajúcich

výpočtov rizika. Zmena tkanivových váhových faktorov je uvedená v **tabuľke3**, kde sú porovnané staré a nové hodnoty w_T .

Pretože podľa definície súčet všetkých tkanivových váhových faktorov je 1, bude aj po zmene w_T numerická hodnota efektívnej dávky pri rovnomernom ožiarení celého tela rovnaká. Zmeny však budú markantné pri parciálnom ožiarení jednotlivých orgánov, pričom najväčšie zmeny sa očakávajú v súvislosti s nárastom w_T pre mliečnu žľazu a poklesom w_T pre gonády.

OSOBNÁ DOZIMETRIA

Osobná dozimetria slúži k stanoveniu osobných dávok sledovaním, meraním a hodnotením vonkajšieho a vnútorného ožiarenia pracovníkov s ionizujúcim žiarením. Externé ožiarenie osôb je dôsledkom prítomnosti rádionuklidov v životnom a pracovnom prostredí. Tieto rádionuklidy sú prírodného charakteru (predovšetkým rádionuklidy urárovej premenovej rady, thoriovej premenovej rady, draslík), umelé rádionuklidy, ktoré sa v životnom prostredí nachádzajú v dôsledku ľudskej činnosti.

Pod vnútorným ožiarením sa vo všeobecnosti rozumie situácia, keď je osoba ožarovaná rádionuklidmi v organizme, pritom **vnútorná kontaminácia** môže vzniknúť v dôsledku príjmu rádionuklidov nasledovnými cestami:

ingesciou, teda prechodom rádioaktívneho materiálu ústami do zažívacieho traktu,

inhaláciou, t.j. vdýchnutím rádioaktívnej látky vo forme aerosólu, pary, plynu a pod. spolu so vzduchom,

prestupom cez poranenie kože,

absorbciou cez neporanenú kožu.

Na pracoviskách, kde môže prísť k vnútornému ožiareniu pracovníkov, sa príjmy rádionuklidov, resp. úväzky efektívnej dávky od vnútorného ožiarenia zisťujú meraním aktivity rádionuklidov v tele pracovníka, alebo v jeho exkretách a tieto sa prepočítavajú na príjem s využitím modelov dýchacieho traktu, zažívacieho traktu a kinetiky príslušných prvkov. Pri prepočte aktivít prijatých rádionuklidov na úväzok efektívnej dávky sa využívajú konverzné faktory podľa platnej legislatívy (NV SR č. 345).

V programe osobného monitorovania sa vymedzujú tzv. **referenčné úrovne**, ktoré predstavujú hodnoty alebo kritéria rozhodujúce pre určité, vopred stanovené pracovné postupy. Referenčné úrovne sa odvodzujú od stanovených limitov pre profesionálnych pracovníkov a delia sa na:

Záznamová úroveň - stanovuje **najnižšiu** hodnotu monitorovanej veličiny, od ktorej má význam ju hodnotiť a zaznamenávať v dokumentácii. Stanovuje sa ako 1/10 limitov, pričom metódy monitorovania sa volia tak, aby najmenšia detegovateľná hodnota meranej veličiny bola menšia, alebo rovná stanovenej záznamovej úrovni.

Vyšetrovacía úroveň - spravidla sa stanovuje ako horná medza obvykle sa vyskytujúcich hodnôt. Jej prekročenie je dôvodom pre následné vyšetrovanie príčin a možných dôsledkov zistenej odchýlky sledovanej veličiny od dlhodobého priemeru. Spravidla sa stanovuje ako 3/10 príslušného limitu.

Zásahová úroveň - signalizuje **mimoriadnu udalosť** alebo **radiačnú nehodu** a je podnetom k okamžitému varovaniu a podniknutiu krokov k ochrane osôb a prostredia podľa havarijného poriadku pracoviska. Stanovuje sa spravidla na úrovni platného limitu.

Základné veličiny v osobnom monitorovaní

Pre monitorovanie osôb, ICRU Report 51 z roku 1993 uvádza koncept osobného dávkového ekvivalentu $H_p(d)$, ktorý je vhodný tak pre silne ako aj slabo prenikavé žiarenia v závislosti od hodnoty d .

Osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$ je teda dávkový ekvivalent v mäkkom tkanive, vo vhodne určenej hĺbke d pod špecifickým bodom na povrchu tela. Špecifický bod obvykle predstavuje umiestnenie osobného dozimetra. Hrúbka $d = 10$ mm sa používa na stanovenie celkovej efektívnej dávky. Hrúbka $d = 0,07$ mm a 3 mm sú hĺbky pre stanovenie ekvivalentnej dávky kože a očných šošoviek. Mäkkým tkanivom sa rozumie štvorprvkové tkanivo definované v ICRU 39. Definícia $H_p(d)$ je reálna, keďže zahŕňa ľudské telo a aktuálne polia žiarenia. Umiestnenie osobného dozimetra a špecifický bod na ľudskom tele už nie je tak jednoznačne odporúčaný, preto dochádza k rozdielnym hodnoteniam $H_p(d)$ aj v prípade rovnakého

poľa žiarenia. Napriek tomu, že $H_p(d)$ je definované v tele, v praxi sa hodnotí detektor exponovaný na povrchu tela a prikrýty vhodnou hrúbkou tkanivo-ekvivalentného materiálu.

V praxi možno očakávať tri typy ožiarenia pracovníka, poprípade ich kontamináciu:
dominantne v smere predozadnom (v prípade, že pracovník sa pri práci nachádza čelom k zdroju žiarenia)
zo zadného polopriestoru (v prípade transportu rádioaktívnych látok)
sféricky izotropným poľom (v poli rozptýleného žiarenia a zmenách orientácie pracovníka voči polohe zdroja)



Obr.3. Najčastejšie umiestnenie osobného dozimetra pre sledovanie efektívnej dávky pracovníka.

Voľba osobného dozimetra závisí okrem charakteru radiačného poľa aj na tom, akú dozimetrickú informáciu má poskytnúť. V praxi sa najčastejšie používajú nasledujúce typy **osobných dozimetrov**:
dozimetre fotónov (informujú o hodnote veličiny $H_p(10)$ v poliach gama a rtg. žiarenia)
dozimetre gama a beta žiarenia (súčasne informujú o hodnotách $H_p(0,07)$ a $H_p(10)$ v radiačnom poli)
komplexné dozimetre, ktoré pracujú na diskriminačnom princípe (informujú o $H_p(0,07)$, $H_p(10)$, type žiarenia, jeho efektívnej energii a o orientácii osoby v poli žiarenia)
dozimetre neutrónov (informujú o $H_p(10)$ v poli neutrónového žiarenia)
dozimetre extrémít (informujú o uhlovej distribúcii poľa žiarenia a veľkosti ožiarenia v oblasti extrémít a očných šošoviek).

Metódy osobnej dozimetrie

Pre monitorovanie osobných dávok IŽ boli vytvorené predpoklady v rámci rádiologického kongresu vo Frankfurtke už v roku 1950. Tieto všeobecné požiadavky vychádzajú zo skutočnosti, že osobný dozimeter je vždy **umiestnený** (Obr.3.) na ľudskom tele a jeho údaj je ovplyvnený spätným rozptylom, modifikáciou a absorpciou radiačného poľa ľudským telom.

Zásadné požiadavky na veličiny charakterizujúce **vonkajšie ožiarenie** osôb možno špecifikovať nasledovne. Veličina musí:

byť definovaná v bode a jej hodnota musí zodpovedať poľu žiarenia v blízkosti umiestnenia dozimetra

predstavovať dozimetrickú veličinu, ktorá pokrýva široký rozsah rôznych typov žiarenia a rôznych energií

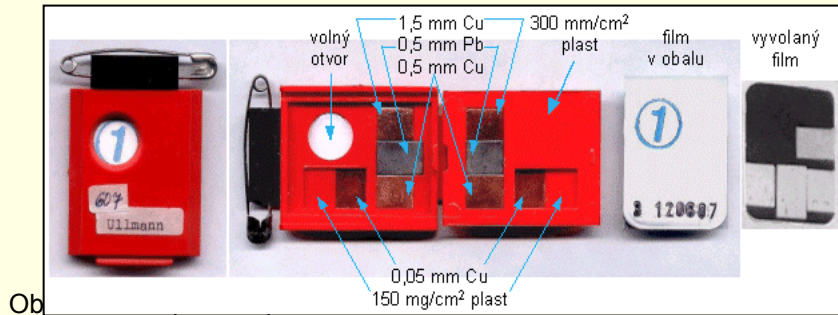
byť aditívna

umožniť odhad efektívnej dávky a dávky na kožu pre najviac exponované situácie (celotelová expozícia, ožiarenie dopadajúce z rôznych smerov a pod.)

byť uhlovo závislá

Správny odhad efektívnej dávky prostredníctvom $H_p(d)$ je možný iba v prípade rovnomerného ožiarenia tela, umiestnenia dozimetra na reprezentatívnom mieste pre konkrétne ožiarenie a zvolený dozimeter má vhodnú energetickú a uhlovú závislosť odozvy. Pre sledovanie veličín osobnej dozimetrie, používané osobné dozimetre musia byť kalibrované na fantóme v súlade s predošlými požiadavkami.

Charakteristika najčastejšie používaných osobných dozimetrov



Celotelové osobné dozimetre pre stanovenie $H_p(10)$ fotónov, elektrónov a neutrónov

Filmové osobné dozimetre

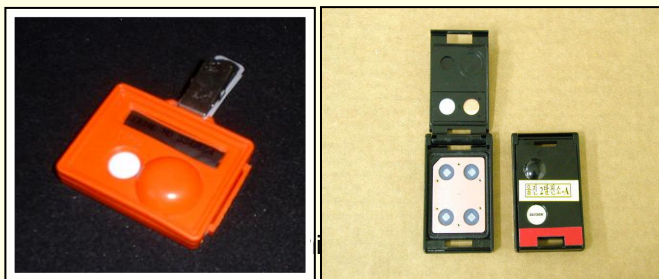
Filmové dozimetre sú založené na fotochemických účinkoch ionizujúceho žiarenia. Fotografické emulzie pozostávajú z mikroskopických zŕn bromidu striebra, rozptýlených v želatíne. Typický rozmer zŕn je (0,2 – 2,0) μm . Fotoemulzia je nanosená na fotografický film, zabalený do čierneho papiera. Ionizujúce žiarenie prechádzajúce obalom filmu vytvára vo fotoemulzii latentný obraz, ktorý sa zviditeľní vyvolaním. Mierou ožiarenia je optická hustota sčernenia filmu stanovená fotometricky a indikujúca dávku žiarenia, ktorá by bola absorbovaná v tkanive vystavenom expozícii. **Filmový dozimeter (Obr.4.)** sa umiestňuje do dozimetrickej kazety vybavenej kompenzačnými filtrami. Sada filtrov je väčšinou z Cu, Al, Pb, Sn a pod. V mnohých poliach žiarenia pre hodnotenie efektívnej dávky postačuje odozva filmového dozimetra pod Pb filtrom a bez filtra. Naopak, v poliach beta žiarenia a v nízkoenergetických poliach rtg. žiarenia sa využívajú kombinácie odoziev netieneného filmu a filmu pod tenkými Cu filtrami. Vyššie energie fotónov (nad 100 keV) vyžadujú použitie filtrov s vysokým atómovým číslom. Vhodne zvolená kombinácia filtrov umožňuje diskrimináciu nízkoenergetických elektrónov od dopadajúcich fotónov a korekciu na odozvu vysokoenergetických fotónov. Prídavný kadmiový filter umožňuje detegovať tepelné a intermediálne neutróny v dôsledku ($n-\gamma$) reakcie v kadmii.

Termoluminiscenčné dozimetre

Termoluminiscencia je fyzikálny jav vyskytujúci sa bežne v prírode. Látky schopné vykazovať túto vlastnosť sa po ožiarení IŽ dostávajú do excitovaného stavu, pričom sa energia prenesie na valenčné elektróny. Ak je táto energia dostatočná, dochádza k prechodu elektrónov na vyššiu úroveň a elektróny môžu prejsť do vodivostného pásu. Ak sa termoluminiscenčná látka použitá ako detektor zahrieva, energia zachytených elektrónov vzrastá a tým vzrastá aj možnosť ich uvoľnenia z pascí. Množstvo excitovaných elektrónov, ktoré sa z látky uvoľňujú, emitujú fotóny v závislosti od termoluminiscenčného materiálu. Emitované svetlo, označované ako TL signál je funkciou teploty a nazýva sa vyhrievacia krivka. Detekcia vyžarovanej energie sa uskutočňuje scintilačnými detektormi. Najznámejšie TL materiály používané v osobnej dozimetrii sú lítium florid (LiF) aktivovaný titanom a magnéziom, ďalej CaF_2 , MgBeO_4 a podobne. (Obr.5.)

Prednosťami **TL detektorov** (Obr.5.) je tkanivoekvivalentnosť, vysoká citlivosť a možnosť presného merania odozvy, široká oblasť lineárnej závislosti medzi dávkou a odozvou detektora, možnosť mnohonásobného použitia, malé rozmery, existencia sofistikovaných vyhodnocovacích systémov, ktoré umožňujú automatické vyhodnotenie.

Nevýhodou TL detektorov je citlivosť na svetlo (vyžaduje sa svetlotesný obal) a k odhadu energetickej distribúcie poľa žiarenia je potrebné použiť sadu absorbných filtrov.



Opticky stimulované luminiscenčné dozimetre

Opticky stimulované luminiscenčné dozimetre tvoria významnú skupinu osobných dozimetrov založenú na tvorbe ionizujúcim žiarením indukovaných luminiscenčných centier v striebrom dopovaných fosfátových sklách. Luminiscencia je vybudená osvetlením ožiareného detektora UV svetlom. Podobne ako u termoluminiscenčných detektorov je vyžiarené svetlo úmerné dávke IŽ, ktoré bolo absorbované v detektore. Vyznačujú sa dlhodobou stabilitou odozvy, vysokou citlivosťou a nízkou energetickou závislosťou. V súčasnosti sa využívajú opticky stimulované rádioluminiscenčné dozimetre $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$, ktorých výhodou je možnosť rýchleho optického odčítavania dávky. V týchto stále častejšie používaných detektoroch sa pre stimuláciu prechodu elektrónov využívajú lasery.

Aktívne elektronické dozimetre

V modernej praxi radiačnej ochrany je nevyhnutné využívať aktívne (väčšinou elektronické) dozimetre (APD) ako operatívne nástroje pre dodržiavanie princípu ALARA (as low as reasonably achievable). APD sú veľmi užitočné pre personál pracujúci v prostredí premenných a vysokých dávkových príkonov, nakoľko umožňujú sledovať akumulovanú dávku a dávkový príkon, ako aj zvukovo signalizovať prekročenie nastavených úrovní. APD detegujú fotóny a elektróny pomocou polovodičových Si detektorov s využitím rôznych filtrov, alebo energeticky kompenzované G-M trubice. Jedným zo sľubných a rozšírených dozimetrov tejto skupiny sú tzv. **pasívne**



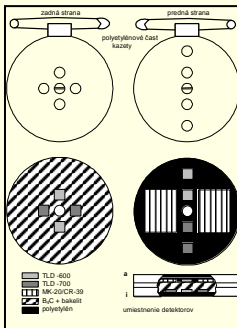
Obr.6. Pasívny elektronický dozimeter DIS (Direct – Ion - Storage) s vyhodnocovacím zariadením

elektronické dozimetre, označované ako „Direct-Ion-storage“ (**DIS** obr.6.) založené na princípe kombinácie IK s tkanivoekvivalentnými stenami, do ktorej je zabudovaná pamäťová jednotka (MOSFET tranzistor). Zmena elektrického náboja po ožiarení DIS zodpovedá veľkosti obdržanej dávky. Výhodou je možnosť archivácie zaznamenaných údajov, široký rozsah meraných dávok ($10 \mu\text{Sv} - 10\text{Sv}$), linearita odozvy, nízka energetická závislosť. DIS je vhodný aj pre registráciu dávok z beta žiarenia, najmä v nukleárnej medicíne ($^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$, ^{85}Kr , ^{147}Pm)

Neutrónové celotelové dozimetre

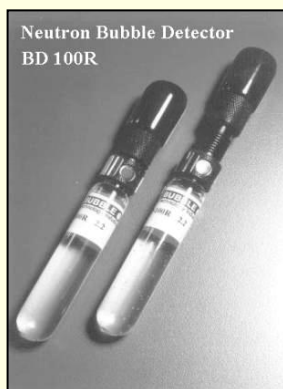
S ohľadom na veľkú energetickú závislosť efektívnej dávky a $H_p(10)$ na jednotkovej fluencii neutrónov, vyžaduje osobná dozimetria neutrónov špeciálne metódy pre jednotlivé energetické oblasti. Pre tepelné a intermediálne neutróny prevládajú reakcie na vodíku a dusíku. Pri vyšších energiách od desiatok keV do 10 MeV je hlavnou interakciou pružný rozptyl na vodíku produkujúci odrazené fotóny. V súvislosti s tým sú najčastejšie používané detektory založené na princípe detektorov stôp v pevnej fáze, na albedo dozimetrii, na využívaní jadrových emulzií. V poslednom období sa do popredia dostávajú bublinkové detektory. V oblasti detektorov stôp v pevnej fáze sa obvykle využívajú tri typy detektorov, ktoré sa líšia materiálom radiátora pre vytvorenie sekundárne nabitých častíc. Pre detekciu tepelných a intermediálnych neutrónov sa využívajú uránové radiátory, obohatené o ^{235}U . Pre detekciu rýchlych

neutrónov slúžia radiátory na báze ^{237}Np , ^{232}Th a ^{238}U . Kombinácia detektorov s dvoma radiátormi (^{235}U , ^{232}Th) je možné využiť k odhadu podielu rýchlych a intermediálnych neutrónov. Ako detektory rýchlych neutrónov, ktoré pracujú na báze odrazených protónov sa používajú látky bohaté na vodík (polykarbonáty, nitráty, celulózy, CR-39). Z merania parametrov stôp je možné odhadnúť aj energiu neutrónov.



Obr. 7. Konštrukcia univerzálneho ALBEDO dozimetra

Špecifickú skupinu osobných neutrónových dozimetrov tvoria **albedo dozimetre**. Sú založené na detekcii neutrónov rozptýlených a spätne odrazených v ľudskom tele a vstupujúcich do detektora zo zadného polopriestoru. Ako **albedo** (Obr. 7.) dozimeter najčastejšie slúžia TL dozimetre, ale používajú sa aj detektory stôp v pevnej fáze, resp. štiepne detektory. Najznámejší je dozimeter tvorený dvojicou ^6LiF - ^7LiF s rozdielnou citlivosťou k neutrónom. Účinný prierez reakcie n-alfa na ^6LiF je o niekoľko rádov vyšší ako ^7LiF , ale citlivosť na gama žiarenie je v podstate rovnaká. Odozva albedo dozimetra je však silne energeticky závislá. Preto je možné používať albedo dozimetre len na základe kalibrácie v neutrónových poliach obdobných, aké sa vyskytujú v praxi. Dostatočne presný odhad dávky od neutrónov v neznámych neutrónových poliach je možné pomocou albedo dozimetrov získať len vtedy, ak je k dispozícii informácia o podiele rýchlych neutrónov, resp. spektrálna distribúcia neutrónového žiarenia. Výhodou albedo dozimetra je, že umožňuje okrem odhadu dávky od neutrónov, získať aj odhad dávky od gama žiarenia.



Obr. 8. Bublínkový neutónový dozimeter.

Bublínkové dozimetre sú založené na princípe interakcie neutrónov s elastickým polymérom, ktorý je zmiešaný s kvapkami prehriatej kvapaliny (napr. freón). Interakciou neutrónov s polymérom vznikajú protóny, ktoré po zrážke s kvapkami prehriatej kvapaliny vytvárajú viditeľné bubliny v polyméri. Počet vytvorených bublín je úmerný dávke neutrónov, absorbovanej v detektore. V súčasnosti sa vyrábajú priamo odčítateľné operatívne dozimetre s možnosťou automatického počítania **bublín** (Obr. 8), pre hromadné spracovávanie odoziev. Výhodou týchto dozimetrov je vysoká citlivosť k neutrónom a praktická necitlivosť ku gama žiareniu. Nevýhodou je vysoká citlivosť detektora k vonkajšej teplote a malý rozsah merateľných dávok neutrónov.

LIMITY ROČNÝCH DÁVOK

Limitovanie efektívnej dávky udržiava riziko stochastických účinkov na akceptovateľnej úrovni a dodatočne pre zabránenie vzniku deterministických účinkov, s výnimkou očí a kože, v ktorých môžu byť obdržané vysoké miestne dávky.

Limity dávok sa neaplikujú na jednotlivcov, ktorí sa podrobujú vyšetreniu, alebo liečbe s využitím IŽ. Nakoľko expozícia pacientov má obvykle priamy prínos pre pacienta, vyžaduje sa iba, aby lekárske ožiarenie bolo optimalizované a odôvodnené a aplikované dávky boli tak nízke, ako je možné v súlade s diagnostickými a terapeutickými požiadavkami.

Tab. 1: Základné ročné limity dávok

Limit	Obyvatelia [mSv]	Pracovníci [mSv]	Študenti a praktikanti [mSv]
efektívna dávka	1	100(50) *	6
ekvivalentná dávka v očnej šošovke	15	150	50
ekvivalentná dávka v koži	50	500	150
ekvivalentná dávka v rukách a v nohách	-	500	150

* efektívna dávka 100 mSv počas piatich za sebou nasledujúcich rokov pričom v žiadnom roku nesmie prekročiť 50 mSv.

Významné poznámky k limitom dávky:

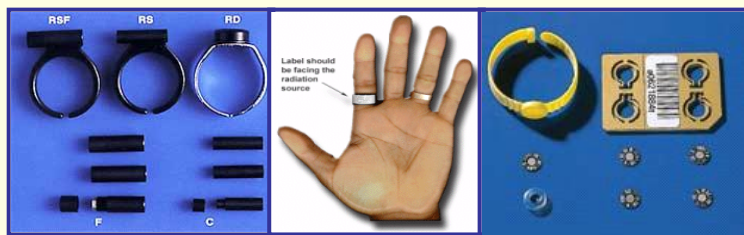
nepredstavujú hrubú demarkačnú čiaru medzi „bezpečnou“ a „nebezpečnou“ dávkou, keďže riziko dlhodobých účinkov ionizujúceho žiarenia je založené na pravdepodobnosti rozdielne limity pre pracovníkov a pre jednotlivcov z populácie sa zdôvodňujú určitým čistým prínosom z ožiarenia u pracovníkov, najmä zo spoločenského hľadiska a ekonomického prínosu udržiavať úroveň ožiarenia pod limitnými hodnotami nie je dostatočné, nadradenou požiadavkou je udržiavanie dávok na tak nízkej úrovni, ako je to možné (ALARA).

Monitorovanie extrémít a očných šošoviek

Ideálny osobný dozimeter by mal obecné zaznamenávať dávky od všetkých typov žiarenia, ktoré sa významnou mierou podieľajú na vonkajšom ožiarení pracovníka. V prípade, ak radiačné pole obsahuje významný podiel slaboprenikavého žiarenia (žiarenie beta, elektróny a fotóny s energiou menšou ako 30 keV) sa vyššie uvedená podmienka nedá splniť použitím jediného dozimetra, nakoľko $H_p(0,07)$, resp. $H_p(0,03)$ môže vykazovať vyššiu hodnotu, ako referenčný dozimeter $H_p(10)$. Preto v odporúčaní ICRP ako aj v slovenskej legislatíve sú uvedené **limity** (Tab.1.) ekvivalentných dávok pre extrémity a očné šošovky. Pracovníka je potrebné vybaviť ďalšími dozimetrami na ruky, očné šošovky alebo iné miesta tela, ktoré sú pri danej praktickej činnosti vystavené ožiareniu v silne nehomogénnych radiačných poliach, v ktorých hodnoty $H_p(0,07)$ alebo $H_p(0,03)$ môžu významne prekročiť $H_p(10)$ alebo pracuje v okolí vymedzeného zväzku žiarenia a vo vzdialenosti menšej ako 0.1 m od zdroja žiarenia. Špecifickým prípadom je ožiarenie pracovníkov pri intervenčných rádiologických vyšetreniach, pri manipulácii s veľkým množstvom otvorených rádioaktívnych látok, resp. úzkym zväzkom urýchlovačov častíc.

Dozimetre pre stanovenie dávok extrémít a očných šošoviek vo väčšine prípadov využívajú TL materiály s ohľadom na energetickú závislosť a vhodné rozmery. Najčastejšie využívané sú TLD typu LiF a $Li_2B_4O_7$. Detektory musia spĺňať podmienku, aby neprišlo k zoslabeniu slaboprenikavého žiarenia dozimetrom a robustnosti voči manuálnym výkonom pracovníkov. Komerčne dostupné dozimetre pozostávajú preto z rovnomerne tenkej vrstvy TL materiálu o hrúbke (5 – 10) $mg \cdot cm^{-2}$ sendvičovo umiestnenej v tenkom bakelitovom kryte o hrúbke (3-4) $mg \cdot cm^{-2}$. Známe sú najmä **prstové** (Obr.9.) dozimetre.

Pre odhad ekvivalentných dávok očných šošoviek v radiačných poliach s energiou väčšou ako 20 keV sa využívajú hrubšie TLD materiály (cca 200 $mg \cdot cm^{-2}$). V súčasnosti sa zavádzajú elektronické monitorovacie systémy extrémít a očných šošoviek, ktorých výhodou je spojitie odčítavanie príkonu ekvivalentnej dávky v priebehu pracovného procesu.



Obr.9. Prstové dozimetre pre monitorovanie extremít

Voľba umiestnenia dozimetra extremít (pravá, ľavá ruka, prstenník, dľaň...) významne ovplyvňuje hodnotu ekvivalentnej dávky. Preto ekvivalentná dávka v koži sa určuje ako priemerná dávka na ploche 1 cm² najviac ožiarenej kože bez ohľadu na veľkosť ožiarenej plochy kože. To znamená, že je potrebné identifikovať s čo najväčšou presnosťou najvyššie hodnoty ekvivalentnej dávky, ktorá sa môže meniť v závislosti od zvoleného pracovného postupu až o 30% pri výkone rovnakej činnosti. Dozimetre extremít a očných šošoviek sú veľmi dôležité v nukleárnej medicíne a to najmä pri zavádzaní nových pracovných metód k overeniu dodržiavania princípu ALARA (as low as reasonably achievable).

Interpretácia a správnosť výsledkov osobného monitorovania

Interpretácia výsledkov osobnej dozimetrie spočíva v správnom prevedení priamo meraných veličín radiačnej ochrany na tie veličiny, v ktorých sú stanovené základné limity ožiarovania, t.j. na efektívnu alebo ekvivalentnú dávku. Pri takejto interpretácii bude presnosť a správnosť efektívnej alebo ekvivalentnej dávky závisieť na kalibrácii použitého dozimetra a presnosti metódy jeho vyhodnocovania. Ideálny dozimeter by mal spĺňať nasledovné vlastnosti:

- ✓ energetickú nezávislosť (schopnosť odhadnúť ožiarenie osoby bez ohľadu na energetickú distribúciu poľa žiarenia)
- ✓ odozvu stabilnú v čase
- ✓ schopnosť oceniť geometriu ožiarenej osoby v danom poli žiarenia
- ✓ necitlivosť k iným fyzikálnym a chemickým zmenám (teplota, svetlo, vlhkosť, elektromagnetické pole a pod.)
- ✓ vhodné technické a ekonomické parametre
- ✓ rozmery, hmotnosť, mechanická odolnosť, cena a náročnosť odozvy

V závislosti na celi, ku ktorému má byť osobný dozimeter použitý, sa volí jedna z alternatív:

pre „čisté“ fotónové pole sa používajú jednoduché, energeticky nezávislé, kompenzované dozimetre, napr. TLD

pre „zložitú“, z hľadiska rizika ožiarovania osôb významné radiačné polia sa preferujú komplexné, viaczložkové dozimetre

Významnú úlohu pri zabezpečení správnosti a presnosti hodnotenia odozvy osobného dozimetra zohráva jeho kalibrácia. Ak má osobný dozimeter merať správne a dostatočne presne, musí mať k dispozícii reprezentatívny súbor referenčných kalibračných polí a technických prostriedkov, ktoré umožnia overiť:

- ✓ linearitu odozvy dozimetra a rozsah merateľnosti dozimetrických veličín
- ✓ závislosť odozvy na uhlovej distribúcii radiačného poľa
- ✓ závislosť odozvy dozimetra k rôznym typom žiarenia
- ✓ citlivosť dozimetra k rôznym fyzikálnym a chemickým vplyvom
- ✓ stabilitu odozvy dozimetra v čase

Odporúčané referenčné polia pre kalibráciu osobných dozimetrov a odporúčané metodiky kalibrácie sú publikované v príslušných STN (Slovenské technické normy).

Požiadavky na presnosť, s akou je možné osobným dozimetrom odhadnúť meranú veličinu, závisia na množstve faktorov vychádzajúcich z cieľa, pre ktorý sa dozimeter používa (systematické hodnotenie profesionálnych expozícií, alebo signalizácia zmeny dávkových príkonov pri pracovných činnostiach). Medzi významné faktory patrí aj typ detegovaného žiarenia, náročnosť detekcie a kvalita radiačného poľa. Preto súčasťou kalibračných postupov musí byť aj analýza nepresností a to náhodných

i systematických. Pre laboratórne podmienky sa odporúča, aby celková nepresnosť merania dozimetrickej veličiny na 95 % hladine spoľahlivosti neprekračovala $\pm 10\%$. Avšak s ohľadom na reálne geometrie ožiarenej osoby, energetickú závislosť dozimetra a pod. sa akceptuje celková neistota stanovenia efektívnej dávky gama žiarenia na úrovni limitov ožiarenia v intervale 1.5-1 do 1.5+1 na 95 % hladine spoľahlivosti.

Monitorovanie vnútornej kontaminácie

V prípade vnútorného ožiarenia je živý organizmus exponovaný žiarením emitovaným rádionuklidmi, ktoré sú prítomné v organizme v dôsledku príjmu umelých alebo prírodných rádionuklidov, prítomnosťou prírodnej izotopickej zmesi prvkov, ktoré sú normálnou súčasťou organizmu, alebo pri lekárskom použití rádionuklidov. Vo všeobecnosti sa rádionuklidy dostávajú do organizmu:

ingesciou (prechod rádioaktívneho materiálu ústami do zažívacieho traktu)

inhaláciou (vdýchnutie rádioaktívnej látky vo forme aerosólov, pár, plynu a pod. spolu so vzduchom)

prestupom cez poranenú kožu

absorbciou cez neporanenú kožu (napr. trícium)

Biokinetika rádionuklidu v organizme je zložitá, preto sa zavádzajú zjednodušujúce predpoklady, pretože kinetika rádionuklidu je daná predovšetkým jeho chemickou formou a fyzikálno-chemickými vlastnosťami. Odhad dávky z vnútorného ožiarenia je zložitejší ako odhad dávky pri externom ožiarení, pretože nie je možné tieto dávky merať priamo, distribúcia rádionuklidu môže byť veľmi nehomogénna, ožiarenie je v dlhšom časovom období (pokiaľ rádionuklid nie je biologickým procesom vylúčený z tela), každý prvok sa chová inak a distribúcia rádionuklidu v tele sa môže časom meniť (kinetika dcérskych rádionuklidov je odlišná od kinetiky materského rádionuklidu).

V dozimetrii vnútorného ožiarenia sa používajú veličiny **úväzok ekvivalentnej dávky** (časový integrál príkonu ekvivalentnej dávky v danom tkanive alebo orgáne, ktorý jednotlivec obdrží po prijímaní rádioaktívnej látky) a **úväzok efektívnej dávky** (úväzok dávkového ekvivalentu vynásobený príslušnými tkanivovými váhovými faktormi a sumovaný cez všetky tkanivá a orgány). V odporúčaniach ICRP, ako aj v nariadení vlády č. 345/2006 Z.z. sú uvedené tabelované hodnoty konverzných faktorov h_{inh} a h_{ing} na prepočet príjmu rádionuklidov vdýchnutím (inhaláciou) aerosólov a požitím (ingesciou) na úväzok efektívnej dávky pre pracovníkov a pre jednotlivcov z obyvateľstva.

S rozvojom rádiobiológie sa v poslednom desaťročí rozvíjajú aj nové biokinetické modely, opierajúce sa o zložitejšiu výpočtovú techniku a zahrňujúce aj biologické procesy, ktoré nie sú viazané k dozimetrickým prístupom. Najvýznamnejší pokrok bol zaznamenaný pri odhade chovania rádionuklidov v dýchacom trakte. Podľa pľúcneho modelu odporúčaného ICRP 66 je možné postihnúť rozdielnu rádiosenzitivitu jednotlivých tkanív dýchacieho traktu a vypočítať vplyv faktorov ako je fajčenie, znečistenie vzduchu a choroby dýchacieho systému. Rádionuklidy, ktoré sa dostanú do dýchacieho traktu podliehajú procesu samočistenia dýchacích ciest a pľúc, čo významne modifikuje primárnu depozíciu aerosólov.

Programy pre monitorovanie vnútornej kontaminácie sa rozdeľujú podľa cieľa na:

rutinné monitorovanie zamerané na pravidelné sledovanie vybraných pracovníkov

operatívne monitorovanie vykonávané v prípadoch podozrenia, že mohlo dôjsť k vnútornej kontaminácii

potvrdzovacie monitorovanie uskutočňované na pracoviskách vo väčších časových intervaloch a slúžiacich k potvrdeniu, že pravidlá k zaobchádzaniu s otvorenými rádionuklidmi sa dodržia.

Rutinné a potvrdzovacie monitorovanie sa uskutočňuje buď meraním in vivo, alebo meraním aktivity rádionuklidov v exkrétoch. Pri špeciálnom monitorovaní je väčšinou známa doba príjmu a v kontaminovanej vzorke sa stanovujú fyzikálno-chemické parametre. V mnohých prípadoch sa meranie in vivo dopĺňa sledovaním časového vývoja retencie a exkrécie. V prípade nehôd je potrebné zrekonštruovať príjem rádionuklidu.

Najvýznamnejšie metódy monitorovania vnútornej kontaminácie využívajú priamy postup stanovenia aktivity rádionuklidu in vivo meraním pomocou celotelového počítača, meraním aktivity rádioizotopov jódu v štítnej žľaze a nepriame metódy, ktoré k odhadu úväzku efektívnej dávky využívajú meranie biologických vzoriek (moč, stolica, vydychovaný vzduch), vzorky z pracovného prostredia (aerosólové filtre, stery z povrchov, atď.).

LITERATÚRA

- HUŠÁK, V. , FILIP, J.: Veličiny a jednotky používané v dozimetrii a ochrane před ionizujícím zářením. In: Kol. autorov. Ochrana při práci se zdroji ionizujícího záření, , Dům techniky, Ostrava, 1998, B1-B11. ISBN 80-02-01230-5.
- MUSÍLEK, L.: Veličiny a jednotky v radiační fyzice a ochrane. In: Princípy a praxe radiační ochrany . AZIN, CZ Praha, 2000, str.46-86, ISBN 80-238-3703-6
- STADTMAN, H.: Dose Quantities in Radiation Protection and Dosimeters Calibration. In: Rad.Prot.Dosim., 96, 2001, NO 1-3, stt. 21-26
- ICRU, 1993. Report 51. Quantities and units in Radiation Protection Dosimetry. Bethesda Mariland USA, 1993
- ICRP 66: Publ. No. 66. Human Respiratory Tract model for radiological Protection. Annal of ICRP 24 (1-3) 1994
- Nariadenie vlády SR č. 345/2006 Z.Z. o základných bezpečnostných požiadavkách na ochranu zdravia pracovníkov a obyvateľov pred ionizujúcim žiarením.

KONTROLNÉ OTÁZKY

1. Čo je obsahom monitorovania?
2. Ako je definovaná aktivita látky a aká je jej jednotka?
3. Čo vyjadrujú veličiny hmotnostná, objemová a plošná aktivita?
4. Čo vyjadruje fluencia častíc, fluencia energie?
5. Ako je definovaná absorbovaná dávka a ako sa nazýva jej jednotka?
6. Čo je to kerma?
7. Čo vyjadrujú veličiny ako dávkový príkon, kermový príkon?
8. Prečo nemôžeme veličiny ako absorbovaná dávka, kerma, použiť na limitovanie radiačnej záťaže?
9. Od čoho závisia biologické účinky žiarenia?
10. Čo je to ekvivalentná dávka a ako sa volá jej jednotka?
11. Ako je definovaná efektívna dávka?
12. Ako je definovaný dávkový ekvivalent a ako sa nazýva jeho jednotka?
13. Čo vyjadruje radiačný váhový faktor?
14. Čo vyjadruje tkanivový váhový faktor?
15. Ako sa nazýva jednotka efektívnej dávky?
16. Čo rozumiete pod pojmom externé ožiarenie?
17. Ako vzniká vnútorná kontaminácia?
18. Čo sú to referenčné úrovne?
19. Ako sa stanovuje záznamová úroveň?
20. Ako sa stanovuje vyšetrovaciu úroveň?
21. Čo signalizuje zásahová úroveň?
22. Ako je definovaný osobný dávkový ekvivalent?
23. Aké typy osobných dozimetrov poznáte?

24. Na akom princípe pracujú filmové dozimetre?
25. Ako sa využíva jav termoluminiscencie v osobnej dozimetrii?
26. Ako pracujú pasívne elektronické dozimetre?
27. Do akej skupiny detektorov patria albedo detektory?
28. Na detekciu čoho sa využívajú bublinkové dozimetre a aká je ich výhoda?
29. Aké dozimetre sa používajú pre stanovenie dávok extrémít a očných šošoviek?
30. Ako sa stanovuje ekvivalentná dávka v koži?
31. Aké vlastnosti by mal spĺňať ideálny dozimeter z hľadiska správnej interpretácie výsledkov osobnej dozimetrie?
32. Aké parametre sa sledujú pri kalibrácii osobných dozimetrov?
33. Akými mechanizmami sa rádionuklidy dostávajú do organizmu?
34. Aké veličiny sa používajú v dozimetrii vnútorného ožiarenia?

ÚLOHY

1. Terčik hmotnosti 5 mg je ožiarený ionizujúcim žiarením energie 5,5 MeV, ktoré je terčikom absorbované. Aká je absorbovaná dávka? (0,176 μGy)
2. Ak ionizujúce žiarenie s radiačným váhovým faktorom $W_R = 10$ spôsobí dávku 1 mGy, aká bude ekvivalentná dávka? (10 mSv)
3. Aká bude efektívna dávka od tohto žiarenia v koži, keď tkanivový váhový faktor pre kožu je $W_T = 0,01$? (0,1 mSv)
4. Vypočítajte hmotnosť rádionuklidu ^{198}Au s dobou polpremeny 2,7 d, využívaného v medicíne, aby jeho aktivita bola $9 \cdot 10^{12}$ Bq. (1,022 mg)
5. Žena s hmotnosťou 60 kg bola ožiarená radiačnou dávkou 0,4 mGy spôsobenou α - časticami. Vypočítajte energiu absorbovanú v tele a ekvivalentnú dávku. ($2,4 \cdot 10^{-2}$ J, 4,8 mSv)
6. Pilot strávi priemerne 20 h týždenne vo výške 11 km, kde je vystavený účinkom kozmického žiarenia. Príkon ekvivalentnej dávky od tohto žiarenia je 7 $\mu\text{Sv/h}$. Aká je ročná efektívna dávka od tohto zdroja? (7,28 mSv)

SÚHRN

Aktivita A - podiel stredného počtu samovoľných rádioaktívnych premien z daného energetického stavu v určitom množstve rádioaktívnej látky, ku ktorému dôjde za časový interval a tohto intervalu.

Jednotka aktivity- becquerel [Bq] s rozmerom v sústave SI [s^{-1}].

Hmotnostná aktivita a_m [$\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$] - podiel aktivity a celkovej hmotnosti rádioaktívnej látky.

Objemová aktivita a_v [$\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$] - podiel aktivity a celkového objemu rádioaktívnej látky

Fluencia častíc Φ [m^{-2}] je rovná počtu častíc dopadajúcich do malej gule v danom bode priestoru, deleného plošným obsahom hlavného rezu tejto gule.

Absorbovaná dávka D - podiel strednej energie odovzdanej ionizujúcim žiarením látke $d\varepsilon$ a hmotnosti látky dm , ktorej bola energia odovzdaná.

Jednotkou absorbovanej dávky : gray [1 Gy= 1 J·kg⁻¹], ktorý sa rovná energii 1 joule absorbovanej v 1 kg látky

Príkion absorbovanej dávky \dot{D} - [Gy·s⁻¹] prírastok absorbovanej dávky za určitý časový interval.

Kerma - v danom bode je podiel súčtu počiatočných kinetických energií E_K všetkých nabitých častíc uvoľnených nenabitými ionizujúcimi časticami v elemente látky s hmotnosťou dm a tejto hmotnosti.

Expozícia X- podiel absolútnej hodnoty celkového elektrického náboja dQ iónov rovnakého znamienka, vytvorených vo vzduchu pri úplnom zabrzdení všetkých elektrónov a pozitronov, ktoré boli uvoľnené vo vzduchu s hmotnosťou dm a tejto hmotnosti, určený v danom bode.

Lineárny prenos energie (LET) [J·m⁻¹]- podiel strednej energie prenesenej v danom mieste nabitou časticou na elektróny dE , pri jej pohybe po dráhe $d\ell$, ktorú ionizujúca častica prešla.

Dávkový ekvivalent H [Sv] - súčin absorbovanej dávky D v tkanive a faktora kvality žiarenia Q .

Ekvivalentná dávka H_T - súčin strednej absorbovanej dávky v tkanive alebo orgáne D_T a príslušného radiačného váhového faktora w_R

Efektívna dávka E - súčet stredných hodnôt ekvivalentných dávok v jednotlivých tkanivách alebo orgánoch H_T , vynásobených tkanivovým váhovým faktorom w_T .

Záznamová úroveň - určuje najnižšiu hodnotu monitorovanej veličiny, stanovuje sa ako 1/10 limitov.

Vyšetrovacía úroveň - horná medza obvykle sa vyskytujúcich hodnôt, spravidla sa stanovuje ako 3/10 príslušného limitu.

Zásahová úroveň - signalizuje *mimoriadnu udalosť* alebo *radiačnú nehodu*, stanovuje sa spravidla na úrovni platného limitu.

Osobný dávkový ekvivalent $H_p(d)$ - dávkový ekvivalent v mäkkom tkanive, vo vhodne určenej hĺbke d pod špecifickým bodom na povrchu tela.

Celotelové osobné dozimetre pre stanovenie $H_p(10)$ fotónov, elektrónov a neutrónov – filmové dozimetre, termoluminiscenčné dozimetre, opticky stimulované luminiscenčné dozimetre, aktívne elektronické dozimetre, albedo dozimetre, bublinkové dozimetre.

Úväzok ekvivalentnej dávky - časový integrál príkonu ekvivalentnej dávky v danom tkanive alebo orgáne, ktorý jednotlivce obdrží po prijíma rádioaktívnej látky.

Úväzok efektívnej dávky - úväzok dávkového ekvivalentu vynásobený príslušnými tkanivovými váhovými faktormi a sumovaný cez všetky tkanivá a orgány.



Návrat z acrobat readera - (zatvorením okna)
