

**Основни величини и единици
в медицинската радиология.
Връзка между експозиция
и погълнатата доза**

Проф. М. Израел, д.м.

Основни величини и единици в медицинската радиология

Физиката на йонизиращите лъчения (радиационната физика) е основа на медицинската радиология. Рентгенологията, радионуклидната диагностика (нуклеарната медицина), лъчелечението и лъчезащитата използват термините и величините от радиационната физика.

Основни величини и единици в медицинската радиология

Радиационните ефекти в облъчваните вещества, в т.ч. и в биологичните тъкани, са пропорционални на предадената на веществото лъчева енергия. *Предадената енергия* $d\varepsilon$ от йонизиращото лъчение на веществото в елементарен обем dV е равна на енергията R_{in} на всички частици, които напускат обема R_{out} , плюс сумата ΣW на всички промени на енергийния еквивалент на масата в покой на ядра и елементарни частици, които остават в обема:

$$d\varepsilon = R_{in} - R_{out} + \Sigma W.$$

Основни величини и единици в медицинската радиология

Дефиницията на предадената енергия може да се илюстрира със следния пример:

Нека веществото бъде облъчвано с монохроматично γ -лъчение с енергия $E_\gamma = 2,75$ MeV (от спектъра на (радионуклида ^{24}Na)). Нека в елементарния обем dV влиза един фотон, т.е. $R_{in} = 2,75$ MeV. Фотонът взаимодейства с веществото, създавайки двойка електрон-позитрон, които напускат разглеждания обем със сумарна кинетична енергия $E_{k^-} + E_{k^+} = 0,73$ MeV. Следователно, $R_{out} = 0,73$ MeV. Предадената енергия $d\varepsilon$ в обема dV обаче, е разликата $R_{in} - R_{out}$, защото част от енергията на фотона – $1,022$ MeV, се е изразходвала за създаването на електрона и позитрона. Това е енергията ΣW в горния израз и затова предадената енергия е

$$d\varepsilon = 2,75 - 0,73 - 1,022 \approx 1,00 \text{ MeV.}$$

Основни величини и единици в медицинската радиология

Първата основна радиологична величина е погълнатата доза (или само доза).

Отношението на средната предадена енергия от йонизиращото лъчение в елементарен обем от облъчваната тъкан към масата на тъканта в този обем се нарича **погълнатата доза (доза) D** . Тя се измерва в джаул на килограм ($J \cdot kg^{-1}$) и се нарича **грей, Gy**, или в старата (извънсистемна) единица **рад, rd**; $1 \text{ rd} = 0,01 \text{ Gy}$. Погълнатата доза е основната дозиметрична величина, определяща степента на радиобиологичния ефект.

Основни величини и единици в медицинската радиология

При хомогенно облъчване на веществото, т.е. когато дозата във всяка негова точка има една и съща стойност може да се каже, че погълнатата доза е предадена енергия на единица маса от веществото. Реално дозата не е еднаква във всички части на облъчвания обект. Затова е необходимо разглеждането на един достатъчно малък, елементарен обем, в който предадената енергия и следователно, погълнатата доза, е еднаква. От друга страна този елементарен обем трябва да съдържа достатъчен брой атоми и молекули за осъществяване на взаимодействието на йонизиращото лъчение с веществото, т.е. той не може да бъде безкрайно малък. $D = \frac{d\varepsilon}{dm}$

Основни величини и единици в медицинската радиология

Радиобиологичният ефект зависи не само от погълнатата доза, но и от продължителността на облъчването. При една и съща стойност на дозата, краткотрайното облъчване на биологичните обекти има по-голям ефект от по-продължителното. Оценката на тази зависимост се прави с величината **МОЩНОСТ на дозата** P_D , дефинирана като отношение на нарастването на дозата за малък интервал от време и големината на този интервал:

$$P_D = \frac{dD}{dt}$$

Основни величини и единици в медицинската радиология

Тази величина се измерва в **грей за секунда ($Gy \cdot s^{-1}$)**. Радиобиологичният ефект е по-голям при по-големи мощности на дозата.

При равномерно увеличаване на дозата, нейната мощност е равна на погълнатата доза за единица време.

Величините погълната доза и мощност на погълнатата доза се отнасят за всички видове йонизиращи лъчения (заредени частици, фотони, неутрони) и за всички вещества. Те са универсални величини за оценка на ефекта на йонизиращите лъчения върху облъчваните вещества. Тези величини дават името на раздел от експерименталната ядрена физика, в който се изучават дозиметричните величини и методите за тяхното измерване - **дозиметрията**.

Основни величини и единици в медицинската радиология

Керма K е отношението на сумата от началните кинетични енергии dE_k на всички заредени частици, получени при взаимодействието на индиректно йонизиращите частици в елементарен обем dV от веществото, и масата dm на веществото в този обем:

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

Единицата за керма също е греЙ (Gy).

Основни величини и единици в медицинската радиология

Мощност на кермата P_k е отношението на изменението (нарастването) на кермата dK за малък интервал от време dt и продължителността на този интервал:

$$P_k = \frac{dK}{dt}$$

Единицата за тази величина е грей за секунда ($Gy \cdot s^{-1}$).

Основни величини и единици в медицинската радиология

Експозицията X е въведена през 1928 г. за обективна оценка на рентгеновите и γ -лъчи, използвани в медицината. Тя е мярка за йонизиращата способност на фотонните йонизиращи лъчения във въздуха. Експозицията се дефинира като тношението на сумата от електрическите заряди dq на йоните от един и същ знак (само положителни или само отрицателни), създадено от всички електрони и позитрони, получени при взаимодействието на фотоните с въздуха в елементарен обем dV при условие, че заредените частици са изразходвали цялата си кинетична енергия, и масата dm на въздуха в този обем:

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

Единицата за експозиция е кулон на килограм ($C \cdot kg^{-1}$)

Основни величини и единици в медицинската радиология

Мощност на експозицията P_x е отношението на изменението (нарастването) на експозицията dX за малък интервал от време dt и големината на този интервал:

$$P_x = \frac{dX}{dt}$$

Единицата за мощност на експозицията е кулон на килограм за секунда ($C.kg^{-1}.s^{-1}$). Тъй като отношението кулон за секунда представлява единицата за големината на електрическия ток Ампер ($1 C.s^{-1} = A$), то мощността на експозицията се измерва в единици ампер на килограм ($A.kg^{-1}$).

Основни величини и единици в медицинската радиология

Голяма част от уредите за измерване на експозицията и на мощност на експозицията са градуирани в извънсистемните единици рентген (R) и рентген за секунда ($R \cdot s^{-1}$). Тяхната връзка със съответните единици от системата SI е следната:

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$1 \text{ R} \cdot \text{s}^{-1} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ A} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Основни величини и единици в медицинската радиология

Пренасянето на енергия от фотоните йонизиращи лъчения се характеризира с величините енергиен пренос и мощност на енергийния пренос. **Енергиен пренос** е отношението на енергията dE , пренасяна през елементарната площ dS , разположена перпендикулярно на посоката на разпространение на лъчението, и големината на тази площ:

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

Енергийният пренос се измерва в джаул на квадратен метър ($\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$).

Основни величини и единици в медицинската радиология

Мощност на енергийния пренос (интензитет на лъчението) ψ е отношението на изменението на енергийния пренос за малък интервал от време dt и големината на този интервал:

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

Основни величини и единици в медицинската радиология

Единицата за измерване на мощността на енергийния пренос – ват на квадратен метър ($W \cdot m^{-2}$) – е равна на единиците за интензитет на звука I и за пренос налъчист поток ψ в оптиката; също и за плътност на мощност в електродинамиката.

Мощността на енергийния пренос ψ и мощността на експозицията P_x са пропорционални:

$$P_x \sim \psi.$$

Основни величини и единици в медицинската радиология

Голяма група дозиметрични величини са дефинирани за целите на радиобиологията и радиационната защита.

Две от тези важни величини са **еквивалентна доза** и **ефективна доза**.

Основни величини и единици в медицинската радиология

Радиобиологичният ефект зависи и от вида и енергията на йонизиращото лъчение. За отчитане на тази зависимост е въведена величината **радиационен тегловен фактор** w_R . Тя служи за дефиниране на величината **еквивалентна доза** H_T - произведението на погълнатата доза D_T осреднена за даден орган или тъкан T , и радиационния тегловен фактор w_R . При облъчване с лъчения от различен вид R , произведенията за всяко от тях се сумират:

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

Основни величини и единици в медицинската радиология

Еквивалентната доза се измерва в **сиверт, Sv**. За рентгеновите, гама-, X- и бета-лъченията и за ускорените електрони, $w_R = 1$ и затова еквивалентната доза (в **Gy**) в органа или тъканта, е числено равна на погълнатата доза (в **Sv**). За неутрони стойностите на w_R са между 5 и 20 в зависимост от тяхната енергия. За протони $w_R = 5$; радиационният тегловен фактор е най-голям за алфа-лъчи - $w_R = 20$ - поради голямата им линейна йонизация.

Основни величини и единици в медицинската радиология

Международната комисия по радиологична защита (ICPR) препоръчва стойности за W_R , представени в следващата таблица. Както се вижда, за широко използваните в медицинската радиология йонизиращи лъчения – рентгенови, γ -лъчи и X-лъчи, β -лъчи и ускорени електрони, $W_R = 1$.

Основни величини и единици в медицинската радиология

Радиационен тегловен фактор w_R за различните йонизиращи лъчения

Йонизиращи лъчения	w_R
Фотонни лъчения (рентгенови, γ - и X-лъчи), β -лъчи и ускорени електрони	1
Неутрони с енергия < 10 keV	5
Неутрони с енергия 10 keV – 100 keV	10
Неутрони с енергия 100 keV – 2 MeV	20
Неутрони с енергия 2 MeV – 20 MeV	10
Неутрони с енергия > 20 MeV	5
Протони с енергия > 2 MeV	5
α -лъчи и многозарядни ядра	20

Основни величини и единици в медицинската радиология

Мощност на еквивалентната доза е отношението на изменението (нарастването) на еквивалентната доза dH_T за малък интервал от време dt и големината на този интервал:

$$P_{H_T} = \frac{dH_T}{dt}$$

Единицата за измерване на мощността на еквивалентната доза е сиверт за секунда ($\text{Sv}\cdot\text{s}^{-1}$).

Основни величини и единици в медицинската радиология

Извънсистемните единици за еквивалентна доза и за мощност на еквивалентната доза са бер (rem) и бер за секунда ($\text{rem}\cdot\text{s}^{-1}$) и са сто пъти по-малки от съответните единици в системата SI:

$$1 \text{ rem} = 0,01 \text{ Sv};$$

$$1 \text{ rem}\cdot\text{s}^{-1} = 0,01 \text{ Sv}\cdot\text{s}^{-1}.$$

Основни величини и единици в медицинската радиология

Облъчването на човека с йонизиращи лъчения е свързано с риск от радиационни (лъчеви) увреждания. Големината на този риск се определя от вероятността за получаване на неблагоприятен радиобиологичен ефект. Установено е, че освен от еквивалентната доза, радиационният риск зависи и от облъчения орган (тъкан). Затова се въвежда величината **тъканен тегловен фактор W_T** , с който се отчита относителния принос на всеки отделен орган или тъкан в общото лъчево увреждане на организма.

Този фактор зависи от функциите на органа и неговата чувствителност към лъчево увреждане. Сумата от стойностите на W_T за всички органи е 1.

Основни величини и единици в медицинската радиология

Много често облъчването с йонизиращи лъчения е хетерогенно, т.е. различните органи и тъкани получават различна еквивалентна доза. За оценка на радиационния риск при това облъчване Международната комисия по радиологична защита (МКРЗ) въвежда величината **ефективна доза E** . Тя се дефинира като сума за всички облъчвани органи от произведенията на тъканния **тегловен фактор W_T** и осреднената стойност на еквивалентната доза за всеки орган **H_T** :

$$E = \sum W_T H_T$$

Основни величини и единици в медицинската радиология

Тъканныят тегловен фактор w_T отчита относителния принос на отделния орган или тъкан в общото лъчево увреждане, еквивалентно на увреждането при хомогенно облъчване на цялото тяло. Ефективната доза се измерва също в **сиверт (Sv)**.

Въвежда се също **МОЩНОСТ на ефективната доза**, която се измерва в сиверт за секунда:

$$P_E = \frac{dE}{dt}$$

Основни величини и единици в медицинската радиология

Стойности на тъканния тегловен фактор W_T

$W_T = 0,20$	$W_T = 0,12$	$W_T = 0,05$	$W_T = 0,01$
гонади	червен костен мозък дебело черво бели дробове стомах 10 останали органи	пикочен мехур млечна жлеза черен дроб хранопровод щитовидна жлеза	Кожа Повърхност на костите

Основни величини и единици в медицинската радиология

Връзка между експозицията и погълнатата доза

Погълнатата доза се определя най-често чрез други величини, които се измерват директно. Погълнатата доза D от фотонно лъчение е пропорционална на експозицията:

$$D = fX.$$

Коефициентът на пропорционалност f се нарича *конверсионен фактор експозиция – погълната доза*. Той се измерва в грей на кулон по килограм ($\text{Gy} \cdot \text{C}^{-1} \cdot \text{kg}$) и зависи от енергията на фотоните и от вида на веществото.

Основни величини и единици в медицинската радиология

Конверсионният фактор отразява поглъщането на лъчева енергия от облъчваното вещество. Той е пропорционален на общия линеен коефициент на отслабване μ и отразява частта от енергията на първичните фотони, която се трансформира първо в кинетична енергия на вторичните заредени частици и след това се изразходва за йонизация и възбуждане на атомите на веществото (йонизационни загуби). Образно казано, експозицията представлява възможността за поглъщане на лъчева енергия, а дозата – реализираната възможност.

Основни величини и единици в медицинската радиология

При ниски енергии на фотоните, при които преобладава фотоелектричното поглъщане, конверсионният фактор f е значително по-голям за костите, отколкото за меките тъкани.

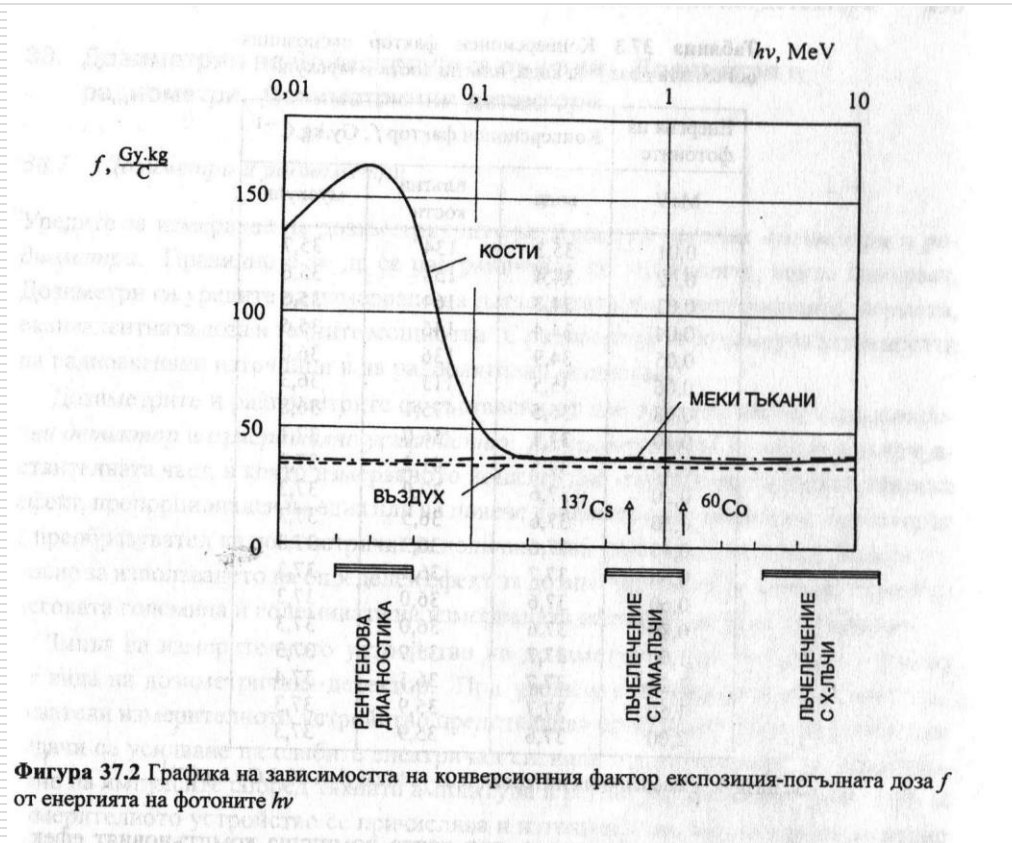
Обяснението е в силната зависимост на линейния коефициент за фотоелектрично поглъщане τ от вида на тъканите. Това означава, че при една и съща експозиция, погълнатата доза в костите е неколнократно по-голяма от дозата в меките тъкани. Тази енергийна област се използва в рентгеновата диагностика (виж долната фигура) и в лъчелечението на костни тумори и метастази.

Основни величини и единици в медицинската радиология

При средни енергии на фотоните, при които доминира Комптъновия ефект, конверсионният фактор f има практически еднакви стойности за кости и за меки тъкани.

Обяснението е в независимостта на линейния коефициент за комптънов ефект σ от вида на тъканите. При една и съща експозиция, погълнатата доза е еднаква във всички облъчвани органи. Тази енергийна област се прилага в лъчелечението на меките тъкани, тъй като едно от условията за оптимален лечебен ефект е хомогенното облъчване на тъканите в лекуваната област (виж фигурата).

Основни величини и единици в медицинската радиология



Фигура 37.2 Графика на зависимостта на конверсионния фактор експозиция-погълната доза f от енергията на фотоните $h\nu$

Основни величини и единици в медицинската радиология

При енергии на фотоните, при които преобладава образуването на двойка електрон-позитрон, конверсионният фактор f отново има по-големи стойности за кости, тъй като линейният коефициент и зависи от вида на тъканите. До енергии на X-лъчите, използвани за лъчелечение (25 MeV), разликата между стойностите на конверсионния фактор f за кости и меки тъкани е малка.

Основни величини и единици в медицинската радиология

Формулата за връзка между експозицията и погълнатата доза може да се използва за определяне на погълнатата доза до енергии на фотоните, при които са осъществими условията за точно измерване на експозицията (до 2-3 MeV). Затова данните за конверсионния фактор f в представената таблица са до енергия

2 MeV.

Таблица 37.3 Конверсионен фактор експозиция-погълната доза f за вода, плътни кости и мускули

Енергия на фотоните MeV	Конверсионен фактор f , Gy.kg.C ⁻¹		
	вода	плътни кости	мускули
0,01	35,3	134	35,7
0,02	34,4	158	35,6
0,03	34,3	164	35,6
0,04	34,4	146	35,6
0,05	34,9	136	36,0
0,06	35,5	113	36,3
0,08	36,5	75,1	36,8
0,10	37,1	56,0	37,1
0,15	37,5	41,2	37,2
0,20	37,6	37,9	37,3
0,30	37,6	36,5	37,3
0,40	37,6	36,2	37,3
0,50	37,7	36,1	37,3
0,60	37,6	36,0	37,3
0,80	37,6	36,0	37,3
1,00	37,7	35,9	37,3
1,25	37,7	36,1	37,4
1,50	37,7	35,9	37,3
2,00	37,6	35,9	37,3

За въздух, в енергийния интервал 0,01–2 MeV, $f = 33,8 \text{ Gy.kg.C}^{-1}$.

Благодаря за вниманието!
