

2.2.2 Эквивалентная доза

Биологический объект – сложное образование, как по элементному составу, так и структуре. Поэтому введенного ранее «физического» понятия поглощенной дозы здесь недостаточно – нельзя делить поглощенную энергию излучения на массу всего организма, необходимо вычлнить дозу, полученную конкретным органом, обладающим конкретной массой. Поэтому в радиационной защите прежде всего вводится понятие дозы в органе или биологической ткани.

Доза в органе или ткани (D_T) - средняя поглощенная доза в определенном органе или ткани человеческого тела:

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int D^* dm,$$

где m_T - масса органа или ткани, а D - поглощенная доза в элементе массы dm .

Вторым шагом является введение эквивалентной дозы, что позволяет учесть радиобиологический эффект – зависимость эффективности радиационного воздействия от типа излучения (точнее – от плотности ионизации, вызываемой этим типом излучения). Чтобы учесть качественные различия излучений, их биологическая эффективность сравнивается с биологической эффективностью рентгеновского излучения, имеющего энергию кванта 250 КэВ.

Доза эквивалентная ($H_{T,R}$) - поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий взвешивающий коэффициент для данного вида излучения, W_R :

$$H_{T,R} = W_R * D_{T,R},$$

где $D_{T,R}$ - средняя поглощенная доза в органе или ткани T , а W_R - взвешивающий коэффициент для излучения R .

В системе СИ единицей измерения эквивалентной дозы является Джоуль на килограмм. Она имеет специальное наименование **зиверт (Зв)**.

При одновременном воздействии на человека нескольких различных видов излучения с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для этих видов излучения.

$$H_T = \sum_R H_{T,R}$$

Эту величину иногда называют интегральной эквивалентной дозой.

Замечание. До недавнего времени при расчёте «эквивалентной дозы» использовались «коэффициент качества излучения» (K) и «относительная биологическая эффективность» ($ОБЭ$) - поправочные коэффициенты, учитывающий различное влияние на биологические объекты (различную способность повреждать ткани организма) разных излучений при одной и той же поглощённой дозе. Сейчас эти коэффициенты в Нормах радиационной безопасности (НРБ-99) названы «Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчёте эквивалентной дозы» (W_R).

Определение эквивалентной и, следовательно, эффективной дозы включает использование взвешивающих коэффициентов излучения W_R для отдельных видов излучения в качестве множителей поглощенной дозы для учета большего ущерба от данной поглощенной дозы, причиняемого излучением с высокой линейной передачей энергии (ЛПЭ) по сравнению с излучением с низкой ЛПЭ. Рекомендованные величины W_R основываются на анализе опубликованной биологической информации и приведены в **Табл.7**).

Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения при расчете эквивалентной дозы (W_R) - используемые в радиационной защите множители поглощенной дозы, учитывающие относительную эффективность различных видов излучения в индуцировании биологических эффектов.

Табл.7. Взвешивающие коэффициенты для отдельных видов излучения^а.

Фотоны (кванты) любых энергий	1	
Электроны, β^- , β^+ и мюоны любых энергий ^б	1	
Нейтроны с энергией менее 10 кэВ	5	
	от 10 кэВ до 100 кэВ	10
	от 100 кэВ до 2 МэВ	20
	от 2 МэВ до 20 МэВ	10
	более 20 МэВ	5
Протоны с энергией более 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5	
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20	

^аВсе значения относятся к излучению, падающему на тело, а в случае внутреннего облучения - испускаемому при ядерном превращении.

^бИсключая электроны Оже, испускаемые ядрами, связанными с ДНК, для которых требуется особый микродозиметрический анализ.

В целях содействия обеспечению последовательности в расчетах производится сглаживание значений W_R для нейтронов в зависимости от энергии в соответствии с математическим выражением:

$$W_R = 5 + 17e^{-[\ln(2\varepsilon)^2]^{1/6}}$$

где ε - энергия в МэВ.

Линейная передача энергии (ЛПЭ) - отношение энергии dE , переданной среде движущейся заряженной частицей вследствие столкновений при перемещении ее на расстояние dl , к этому расстоянию:

$$L = dE/dl$$

Коэффициенты качества излучения Q используются при определении рабочих величин и основываются на соотношении Q - ЛПЭ. Коэффициенты качества используются также как приближенные значения W_R для видов ионизирующих излучений, не включенных в **Табл.7**. Рекомендуемые значения соотношения Q - ЛПЭ приведены в **Табл.8**.

Табл.8. Значения соотношения Q – ЛПЭ

Неограниченная линейная передача энергии в воде, L (кэВ/мкм)	$Q(L)$
<10	1
10 – 100	$0,32L - 2,2$
>100	$\frac{300}{\sqrt{L}}$

Очевидно, что взвешивающий коэффициент для излучения, W_R , непосредственно связан с величиной линейной потери энергии (ЛПЭ), которая так же используется для сравнения степени радиационного повреждения вещества при воздействии на него различных ионизирующих частиц с разной энергией. Величина линейной передачи энергии (ЛПЭ), определяемая соотношением:

$$ЛПЭ = \frac{d\bar{E}_{перед}}{dl} \Big|_{E_{пор}}$$

где $d\bar{E}$ - средняя энергия, локально переданная среде ионизирующей частицей вследствие столкновений на элементарном пути dl . Пороговая энергия $E_{пор}$ обычно относится к энергии δ -электрона. Если в акте столкновения первичная заряженная частица образует δ -электрон с энергией больше $E_{пор}$, то эта энергия не включается в значение dE , и δ -электроны с энергией больше $E_{пор}$ рассматриваются как самостоятельные первичные частицы.

Выбор пороговой энергии $E_{пор}$ является произвольным и зависит от конкретных условий.

Из определения ЛПЭ следует, что линейная передача энергии является некоторым аналогом тормозной способности вещества. Однако между этими величинами есть различие. Заключается оно в следующем:

1. ЛПЭ не включает энергию, преобразованную в фотоны, т.е. радиационные потери.
2. При заданном пороге $E_{пор}$ ЛПЭ не включает в себя кинетическую энергию частиц, превышающую $E_{пор}$.

Величины ЛПЭ и тормозной способности совпадают, если можно пренебречь потерями на тормозное излучение и $E_{пор} \sim \infty$.

Табл. 9. Средние значения величины линейной передачи энергии и пробега R для электронов, протонов и α -частиц в мягкой ткани.

Частица	$E_{\text{част}}$, МэВ	ЛПЭ, КэВ/мкм	R, мкм
Электрон	0.01	2.3	1
	0.1	0.42	180
	1.0	0.25	5000
Протон	0.1	90	3
	2.0	16	80
	5.0	8	350
	100.0	4	1400
α -частица	0.1	260	1
	5.0	95	35

По величине линейной передачи энергии можно определить весовой множитель данного вида излучения (**Табл. 10**).

Табл.10. Зависимость весового множителя излучения W_r от линейной передачи энергии ионизирующего излучения L для воды.

ЛПЭ, КэВ/мкм	< 3/5	7	23	53	> 175
W_r	1	2	5	10	20