

3. ДОЗА ОТ БЕТА-ИЗЛУЧЕНИЯ

3.1 Параллельный пучок

Мощность дозы в поле β -излучателя пропорциональна его активности и зависит от энергии β -спектра, формы и размеров препарата и глубины погружения в среду. Например, доза на одну β -частицу, падающую на см^2 данной области среды при переходе от одного из самых мягких среди наиболее распространенных β -излучателей – ^{35}S (максимальная энергия β -спектра 0,169 МэВ) к самому жесткому – ^{144}Pr (максимальная энергия 3 МэВ), изменяется от $15 \cdot 10^{-8}$ рад до $2,8 \cdot 10^{-8}$ рад В пучке электронов, получаемом с помощью ускорителя, мощность дозы может быть очень высока. При напряжении 3000 кВ и силе тока 4 мА в пучке сечением 100 см^2 можно получить мощность дозы 10^7 р/с.

При определении дозы от источника β -излучения учитывают ряд особенностей, связанных с природой β -частиц, прежде всего - непрерывность спектра β -излучения. В связи с этим в расчетные формулы вводят не табличные значения максимальной энергии β -спектра, а ее среднее значение:

$$E_{\text{ср}} = 0,4E_{\text{max}}$$

Учитывая значительные поглощение β -частиц в воздухе, не следует пренебрегать ослаблением потока Φ для β -излучения до достижения объекта, в котором следует определить поглощенную дозу. При расчете доз от β -излучателей с достаточной точностью можно считать толщину облучаемого объекта равной толщине слоя полного поглощения β -частиц R_{max} .

Для расчета дозы β -излучения в любой точке объекта облучения необходимо знать плотность потока и спектр β -частиц в заданной точке или усредненную по действующему в заданной точке β -спектру величину потери энергии. Тогда поглощенная доза (в рад) на глубине x :

$$D_{\beta}(x) = 1,6 \cdot 10^{-8} \Phi_{\beta}(x) \cdot \Delta E_{\beta}(x) \cdot t,$$

где Φ_{β} - плотность потока β -частиц на глубине x ; $\Delta E_{\beta}(x)$ – потери энергии, усредненные по действующему на глубине x спектру β -частиц.

Энергия β -излучения $E_{\text{ногл}}$ с интенсивностью J , поглощенное веществом, в слое, равному максимальному пробегу β -частиц, определяется выражением:

$$E_{\text{ногл}} = JSt = 0,4E_{\text{max}}\Phi St.$$

Поскольку масса m слоя вещества с площадью S , полностью поглотившая β -излучение в слое R_{max} , равна:

Энергия β -частиц, Мэв	Воздух, м	Вода, мм	Алюминий, мм	Энергия β -частиц, Мэв	Воздух, м	Вода, мм	Алюминий, мм
0,01	0,00229	0,00247	0,00127	0,70	2,513	2,78	1,315
0,02	0,00773	0,00841	0,00422	0,75	2,746	3,04	1,437
0,03	0,0161	0,0175	0,00870	0,80	2,985	3,31	1,559
0,04	0,0266	0,0290	0,0143	0,85	3,217	3,57	1,685
0,05	0,0394	0,0431	0,0212	0,90	3,449	3,84	1,807
0,06	0,0541	0,0591	0,0289	0,95	3,697	4,11	1,933
0,07	0,0708	0,0774	0,0378	1,0	3,936	4,38	2,059
0,08	0,0889	0,0974	0,0474	1,2	4,896	5,47	2,563
0,09	0,109	0,119	0,0578	1,4	5,868	6,56	3,070
0,10	0,130	0,143	0,0693	1,6	6,821	7,66	3,574
0,15	0,256	0,281	0,135	1,8	7,781	8,75	4,074
0,20	0,407	0,448	0,214	2,0	8,732	9,84	4,593
0,25	0,747	0,638	0,304	2,2	9,683	10,90	5,074
0,30	0,763	0,841	0,400	2,4	10,611	12,00	5,593
0,35	0,959	1,06	0,504	2,6	11,510	13,10	6,074
0,40	1,168	1,29	0,611	2,8	12,459	14,20	6,593
0,45	1,384	1,52	0,722	3,0	13,411	15,30	7,141
0,50	1,601	1,77	0,837	4,0	17,858	20,60	9,841
0,55	1,817	2,01	0,952	5,0	22,281	25,80	11,889
0,60	2,050	2,27	1,070	6,0	25,156	31,00	14,259
0,65	2,274	2,52	1,193	8,0	34,377	41,30	—

Табл.5. Максимальные пробеги β -частиц в воздухе, в воде (или биологической ткани) и алюминии.

$$\Delta m = SR_{\text{max}},$$

то поглощенную дозу можно определить:

$$D_{\text{ногл}} = It/R_{\text{max}} = 0,4E_{\text{max}}\Phi t/R_{\text{max}}.$$

$$D_{\text{ногл}} = \frac{It}{R_{\text{max}}} = \frac{0,4E_{\text{max}}\Phi t}{R_{\text{max}}}$$

Выражая поглощенную дозу в радах, получим:

$$D_{\beta} = 1,60 \cdot 10^{-8} \frac{\Phi_{\beta,0} \cdot \bar{E}_{\beta} \cdot t}{R_{\beta}} = 1,60 \cdot 10^{-8} \frac{J_{\beta,0} t}{R_{\beta}}$$

Замечание. Сравним число β -частиц и γ -квантов с одинаковой энергией, необходимых для создания мощности

дозы в 1 рад за 1 сек. Пусть $E_{\beta} = E_{\gamma} = 1$ МэВ. Для мягкой биологической ткани $\mu'_{\text{e}} = 0,003 \text{ см}^2/\text{г}$, $R_{\beta} = 0,48 \text{ г}/\text{см}^2$. Тогда

$$\Phi_{\gamma} = 6,25 \cdot 10^7 \frac{1}{1,0 \cdot 0,03 \cdot 1,0} = 2,3 \cdot 10^9 \frac{\gamma\text{-квантов}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$$

$$\Phi_{\beta} = 6,25 \cdot 10^7 \frac{0,48}{0,4 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 9,0 \cdot 10^7 \frac{\beta\text{-частиц}}{\text{см}^2 \cdot \text{сек}}$$

Таким образом, на расстоянии, существенно меньшим полного пробега β -частиц в воздухе, доза от источника β -излучения в десятки раз больше, чем от источника γ -излучения одинаковой энергии и активности.

3.2 Точечный источник

Мощность дозы от точечного источника β -излучения в воздухе на расстоянии r от источника (для одной линии β -спектра) с учетом поглощения излучения в воздухе:

$$D_{\text{нозл}} = \frac{At}{4\pi r^2} \frac{\sum n_i 0,4 E_{\text{max},i} e^{-\mu_i r}}{R_{\text{max},i}}$$

Подставив в эту формулу активность источника в милликюри, максимальную энергию β -спектра E_{max} в МэВ, расстояние r препарата до объекта облучения в см, время t в час, коэффициент линейного поглощения β -излучения в воздухе μ в см^{-1} и выражая дозу в рентгенах (точнее, в физических эквивалентах рентгена), получим

$$D = \frac{3,7 * 10^7 * A * 0,4 * 10^6 * 3600 * t}{4\pi r^2 * 5,47 * 10^{13}} \sum_{i=1}^n \frac{n_i E_{\text{max},i} e^{-\mu_i r}}{R_{\text{max},i}}$$

или

$$D = 71 \frac{At}{r^2} \sum_i^N \frac{n_i E_{\text{max},i} e^{-\mu_i r}}{R_{\text{max},i}} \text{ фЭр}$$

Формула для поглощенной дозы в радах в гомогенной среде на расстояниях $r < R_{\text{max}}$:

$$D_{\beta} = 1,6 * 10^{-8} \frac{A * 3,7 * 10^7 \sum_i n_i \bar{E}_{\beta,i} * e^{-\mu_{\beta,i} r} * t}{4\pi r^2 * R_{\beta,\text{max}}} = 4,7 * 10^{-2} \frac{At}{r^2} \sum_i \frac{n_i \bar{E}_{\beta,i} e^{-\mu_{\beta,i} r}}{R_{\text{max},\beta,i}} \text{ рад,}$$

где A - активность (мКи); n_i - число β -частиц со средней энергией спектра $\bar{E}_{\beta,i}$, на один акт распада; $R_{\beta,i}$ - толщина слоя полного поглощения β -частиц с максимальной энергией спектра $E_{\text{max},\beta,i}$ в веществе объекта облучения; $\mu_{\beta,i}$ - линейный коэффициент ослабления потока β -частиц (в см^{-1}) с максимальной энергией спектра $E_{\text{max},\beta,i}$ в среде между источником и облучаемым объектом, который для воздуха может быть вычислен по эмпирической формуле

$$\mu_{\beta,i}(\text{возд}) = \frac{16\rho}{(E_{\beta,i} - 0,036)^{1,4}}$$

Массовый коэффициент ослабления в алюминии в зависимости от максимальной энергии β -частиц приблизительно описывается соотношением:

$$\mu' = \frac{\mu}{\rho} = \frac{22}{E_{\text{max}}^{4/3}} \text{ см}^2 / \text{г},$$

а линейный коэффициент ослабления

$$\mu = \frac{59,4}{E_{\text{max}}^{4/3}} \text{ см}^{-1}$$

3.3 Доза от тормозного излучения

Энергия квантов тормозного излучения, возникающего при взаимодействии β -излучения с веществом, примерно равно половине максимальной энергии тормозящихся β -частиц, если $E_{\text{макс}} \leq 10$ МэВ, и одной трети максимальной энергии, если $10 \text{ МэВ} \leq E_{\text{макс}} \leq 30$ МэВ.

Если точечный изотропный источник тормозного излучения испускает $E_{\text{тор}}$ МэВ энергии на один распад ядра, то мощность экспозиционной дозы тормозного излучения:

$$P = \frac{A * 3,7 * 10^7 * E_{\text{тор}} \mu_e}{4\pi r^2 * 7,1 * 10^4} \text{ р/с},$$

где A - активность источника, с кюри; $E_{\text{тор}}$ - энергия тормозного излучения МэВ/распад; μ_e - линейный коэффициент истинного поглощения в воздухе, взятый для эффективной энергии квантов тормозного излучения, см^{-1} ; r - расстояние от источника до точки детектирования, см; $7,1 * 10^4$ - энергетический эквивалент рентгена.