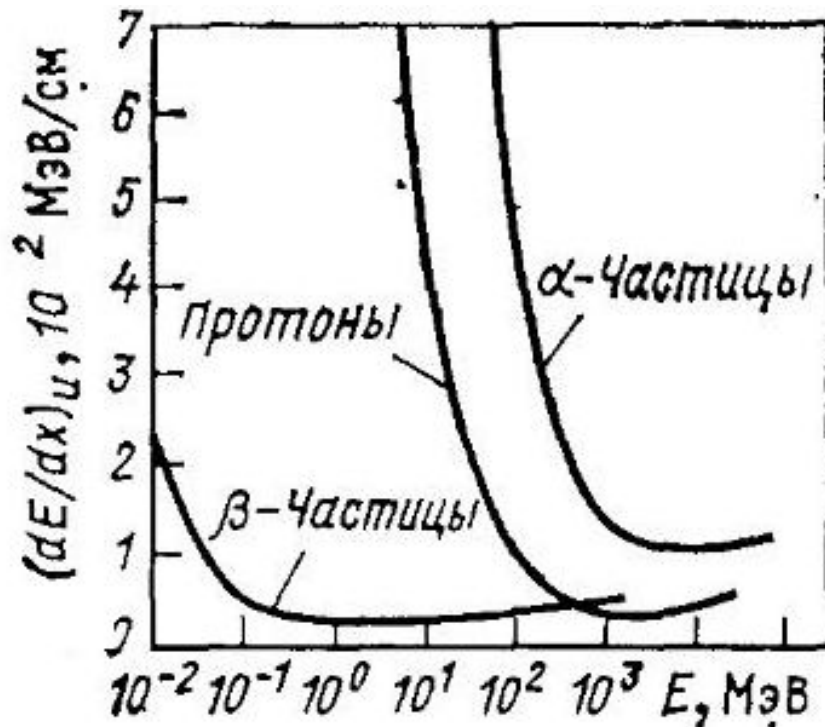


# Формула Бете:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{mv^2} N_0 \rho \frac{Z}{A} \left[ \ln \frac{2mv^2}{I(1+\beta^2)} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$



**Длина пробега альфа частицы в воздухе:**

$$\bar{R}_\alpha \approx \frac{\sqrt{E_\alpha^3}}{3}$$

**Пример 1.** Определить длину пробега  $\alpha$ -частиц с энергией  $E_\alpha = 5$  МэВ в воздухе.

**Решение.** По формуле

$$\bar{R}_{\alpha_{\text{в}}} = \sqrt{E_\alpha^3} / 3 = \sqrt{\frac{5^3}{3}} = 3,7 \text{ см.}$$

**Длина пробега альфа частицы в других средах:**

$$\bar{R}_\alpha \approx 10^{-4} \frac{\sqrt{AE_\alpha^3}}{\rho} \qquad \bar{R}_\alpha = 10^{-4} \frac{A \sqrt{E_\alpha^3}}{\rho \sqrt{Z^2}}$$

Пример 2. Определить длину пробега  $\alpha$ -частиц с энергией  $E_\alpha = 5$  МэВ в биологической ткани, если  $A_{TK} = 15,7$ ,  $Z_{\phi} = 7,5$ ,  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>

Решение По формуле

$$\bar{R}_{\alpha_{TK}} = \frac{10^{-4} \sqrt{15,7 \cdot 5^3}}{1} = 44,5 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

По формуле

$$\bar{R}_{\alpha_{TK}} = \frac{10^{-4} \cdot 15,7 \sqrt{5^3}}{1 \sqrt{7,5^2}} = 46,3 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$$

Энергия $\alpha$ -частиц, МэВ	Воздух, см	Алюминий, мкм	Биологическая ткань, мкм	Энергия $\alpha$ -частиц, МэВ	Воздух, см	Алюминий, мкм	Биологическая ткань, мкм
4,0	2,37	16,5	26,2	7,0	5,58	36,2	62,4
4,5	2,82	19,2	31,2	7,5	6,23	40,1	69,9
5,0	3,29	22,2	36,7	8,0	7,19	43,4	78,0
5,5	3,82	25,4	42,6	9,0	8,66	52,2	94,4
6,0	4,97	28,8	48,8	10,0	10,2	61,6	112
6,5	4,96	32,4	55,5				

Под *эффективным атомным номером*  $Z_{эф}$  сложного вещества следует понимать атомный номер такого простого вещества, для которого коэффициент поглощения энергии, рассчитанный на один электрон среды, является таким же, как и для данного сложного вещества.

$$Z_{эф} = \sum a_i Z_i$$

Вещества, имеющие тот же эффективный атомный номер, что и воздух, называются *воздухоэквивалентными* веществами, а вещества, имеющие одинаковый эффективный атомный номер с тканью, — *тканеэквивалентными*.

Пробег  $\alpha$ -частиц в различных веществах можно выразить через пробег в воздухе, используя относительную тормозную способность вещества  $S$ . *Относительной тормозной способностью* называется отношение тормозной способности воздуха  $S_B$  к тормозной способности вещества (с атомным номером  $Z$ )  $S_Z$  (при этом энергию частиц считают одинаковой).

При выражении тормозной способности как потери энергии на единице длины пути получают *линейную тормозную способность*. Тогда *относительная линейная тормозная способность*

$$S_L = S_B/S_Z = \bar{R}_{\alpha_B}/\bar{R}_{\alpha_Z},$$

где  $\bar{R}_{\alpha_Z}$ ,  $\bar{R}_{\alpha_B}$  — пробег частиц в веществе с атомным номером  $Z$  и в воздухе соответственно, см.

*Относительная массовая тормозная способность*

$$S_m = \rho_B \bar{R}_{\alpha_B}/(\rho_Z \bar{R}_{\alpha_Z})$$

определяется потерей энергии на единице толщины слоя вещества, выраженной через массу, приходящуюся на единицу площади.

Относительную тормозную способность можно рассчитать также на атом вещества; тогда *относительная атомная тормозная способность*

$$S_a = \frac{\rho_B \bar{R}_{\alpha_B}}{\rho_Z \bar{R}_{\alpha_Z}} : \frac{A_B}{A_Z},$$

где  $\rho_Z, \rho_B$  — плотность вещества и воздуха соответственно, г/см<sup>3</sup>;  $A_Z, A_B = 14,4$  — атомная масса вещества и воздуха соответственно.

$$\frac{S_a}{\sqrt{A_Z}} = 0,3 = \frac{\rho_B \bar{R}_{\alpha_B} \sqrt{A_Z}}{\rho_Z \bar{R}_{\alpha_Z} A_B}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \bar{R}_{\alpha_Z} &= \frac{\rho_B \bar{R}_{\alpha_B} \sqrt{A_Z}}{0,3 A_B \rho_Z} = \frac{1,293 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4}}{0,3 \cdot 14,4} : \frac{\bar{R}_{\alpha_B}}{\rho_Z} \sqrt{A_Z} = \\ &= 3 \cdot 10^{-8} \frac{\bar{R}_{\alpha_B} \sqrt{A_Z}}{\rho_Z}, \text{ см.} \end{aligned}$$

Пример 3. Определить длину пробега  $\alpha$ -частицы с энергией  $E_\alpha = 5$  МэВ в биологической ткани, если  $A_{\text{тк}} = 15,7$ ,  $\rho_{\text{тк}} = 1$  г/см<sup>3</sup>,  $\bar{R}_{\alpha_{\text{в}}} = 3,7$  см (см пример 1).

Решение. По формуле (17)

$$\bar{R}_{\alpha_{\text{тк}}} = 3 \cdot 10^{-8} \frac{3,7}{1} \sqrt{15,7} = 44 \cdot 10^{-4} \text{ см,}$$

Как видно из приведенных примеров, значение пробега  $\alpha$ -частиц в биологической ткани малó (около  $44 \cdot 10^{-4}$  см при  $E_\alpha = 5$  МэВ), поэтому толщина поверхностного слоя кожи вполне достаточна для защиты.

При работе с открытыми  $\alpha$ -источниками необходимо предотвращать попадание радиоактивных веществ внутрь организма. Для этой цели используют средства индивидуальной защиты (СИЗ) органов дыхания, пищеварения и кожных покровов человека.

## Взаимодействие бета-излучения с веществом

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{mv^2} N_0 \rho \frac{Z}{A} \left[ \ln \frac{2mv^2}{I(1+\beta^2)} - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right]$$

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{mv^2} N_0 \rho \frac{Z}{A} \left[ \ln \frac{1,16mv^2}{2I} \right]$$

$$-\left( \frac{dE}{dx} \right)_{\text{ион}} = 0,306 \rho \frac{Z}{A} \beta^{-2} \ln \frac{1,16E}{\omega}, \text{ МэВ/см.}$$



Радиационные потери – формула Гайтлера:

$$\begin{aligned}
 -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}} &= n_A r_0^2 \frac{Z^2}{137} (E + m_a c^2) \left[ 4 \ln \frac{2(E + m_a c^2)}{m_a c^2} - \frac{4}{3} \right] = \\
 &= 3,44 \cdot 10^{-4} (E + m_a c^2) \frac{Z^2}{A} \rho \left[ 4 \ln \frac{2(E + m_a c^2)}{m_a c^2} - \frac{4}{3} \right],
 \end{aligned}$$

где  $r_0 = e^2 / (m_a c^2)$  — классический радиус электрона, равный  $2,8 \cdot 10^{-13}$  см.

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}} / -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{(E + m_a c^2) Z}{1600 m_a c^2}$$

Потери становятся равными при критической энергии

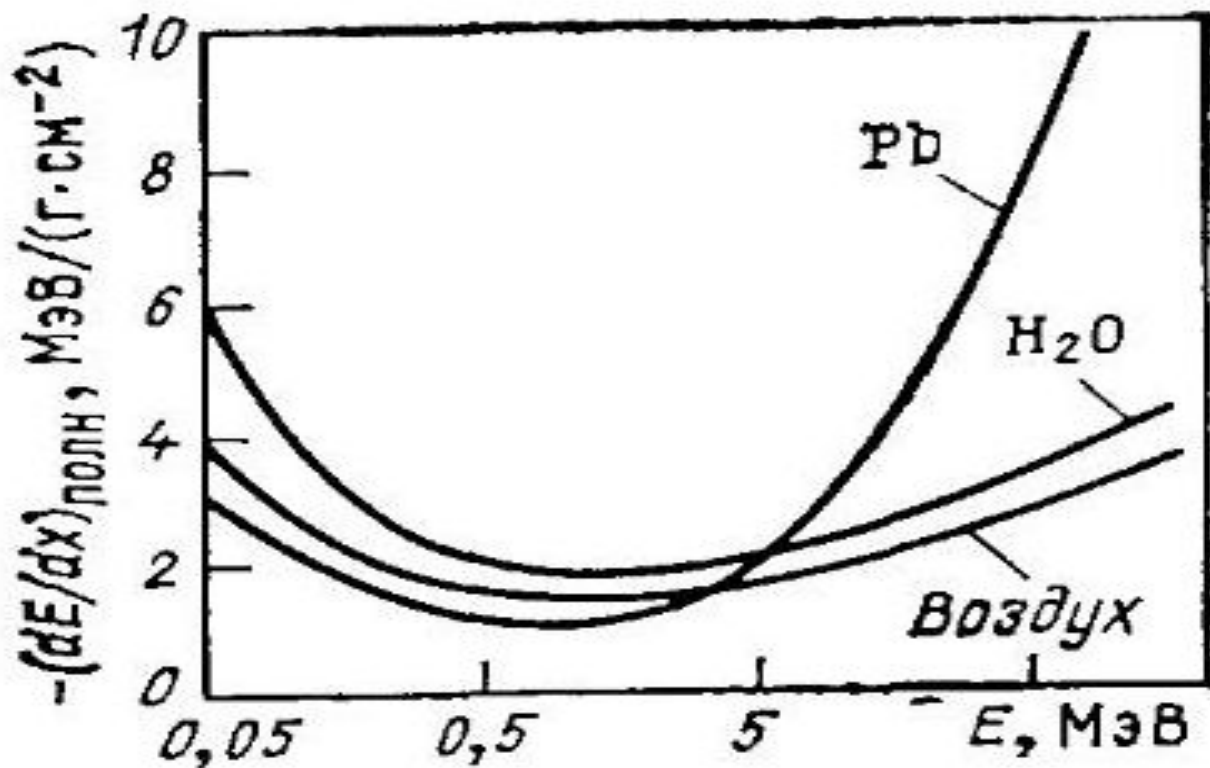
$$E_{\text{кр}} \approx 1600 \frac{m_a c^2}{Z}.$$

Так, для свинца

$$E_{\text{кр}}^{\text{Pb}} \approx \frac{1600 \cdot 0,5}{82} \approx 10 \text{ МэВ}.$$

Полная потери энергии:

$$-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{полн}} = -\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}} + \left[-\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{рад}}\right]$$



# Пробег:

Для практических целей предпочитают использовать экстраполированный пробег  $R_{\text{экс}}$ . Для моноэнергетических электронов с энергией от 0,0003 до 30 МэВ при нормальном падении на вещество с  $Z_{\text{эф}}$ , равным от 5,3 до 82, экстраполированный пробег  $R_{\text{экс}}$ , г/см<sup>2</sup>, может быть определен по соотношению

$$R_{\text{экс}} = a_1 [1/a_2 \ln(1 + \alpha_0 a_2) - \alpha_0 a_3 / (1 + \alpha_0^2 a_4)],$$

где  $\alpha_0 = E_e / m_e c^2$  ( $E_e$  — энергия электрона, МэВ;  $m_e c^2 = 0,511$  МэВ — энергия покоя электрона);  $a_1 = 0,2335 A / Z^{1,209}$ ;  $a_2 = 1,78 \cdot 10^{-4} Z$ ;  $a_3 = 0,9891 - 3,01 \cdot 10^{-4} Z$ ;  $a_4 = 1,468 - 1,18 \cdot 10^{-2} Z$ ;  $a_5 = 1,232 / Z^{0,109}$ ;  $A$  — атомная масса;  $Z$  — атомный номер.

# Для практических расчетов:

Толщина защиты, г/см<sup>2</sup>, из алюминия определяется по  $R_{\beta_{\text{макс}}}$   $\beta$ -частиц:

$$R_{\beta_{\text{макс}}} = 0,407E_{\beta}^{1,38} \text{ для } 0,15 \leq E_{\beta_{\text{макс}}} \leq 0,8 \text{ МэВ};$$

$$R_{\beta_{\text{макс}}} = 0,542E_{\beta} - 0,133 \text{ для } 0,8 \leq E_{\beta_{\text{макс}}} \leq 3 \text{ МэВ}.$$

Для  $R_{\beta_{\text{макс}}}$ , см, для воздуха и легких материалов (оргстекло, алюминий и др.) рекомендуются следующие формулы:

$$R_{\beta_{\text{макс}}}^{\text{возд}} \approx 400E_{\beta} \text{ см};$$

$$R_{\beta_{\text{макс}}} \approx 0,2E_{\beta} \text{ см для } E_{\beta} > 0,5 \text{ МэВ};$$

$$R_{\beta_{\text{макс}}} \approx 0,1E_{\beta} \text{ см для } E_{\beta} < 0,5 \text{ МэВ}.$$

**Пробег в различных веществах:**

$$R_{e_2} \rho_2 = R_{e_1} \rho_1 \frac{Z_1/A_1}{Z_2/A_2}.$$

Так как  $Z/A$  изменяется незначительно, произведение  $R_{e\rho}$  близко к постоянному значению. Действительно, для платины и алюминия эти величины отличаются на 20 %.

**Закон ослабления излучения:**

$$\varphi_{\beta} = \varphi_{\beta_0} \exp(-\mu x),$$

где  $\varphi_{\beta}$ ,  $\varphi_{\beta_0}$  — плотность потока  $\beta$ -частиц за слоем поглотителя толщиной  $x$  и до поглотителя соответственно, част/(см<sup>2</sup>·с);  $\mu$  — линейный коэффициент ослабления, зависящий от энергии  $\beta$ -частиц и от атомного номера поглотителя, см<sup>-1</sup>.

**Пример 4.** Определить максимальную длину пробега  $\beta$ -частиц в воздухе и алюминии, если максимальная энергия  $\beta$  спектра  $E_{\beta_{\text{макс}}} = 3,15$  МэВ (источник RaC)

Решение 1. По формуле находим  $R_{\beta_{\text{макс}}}^{\text{возд}} = 400 \cdot 3,15 \cdot 10^{-2} = 12,6$  м

2 По формуле  $R_{\beta_{\text{макс}}}^{\text{Al}} = 0,542 \cdot 3,15 - 0,133 = 1,58$  г/см<sup>2</sup>

**Пример 5.** Определить пробег моноэнергетических электронов в алюминии, если известен их пробег в воздухе  $L_0 = 3,15$  МэВ,  $\rho_{\text{Al}} = 2,7$  г/см<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{возд}} = 1,293 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>,  $R_{\beta_{\text{макс}}}^{\text{возд}} = 12,6$  м

Решение По формуле  $R_{\beta_{\text{макс}}}^{\text{Al}} = 12,6 \cdot 1,293 \cdot 10^{-3} / 2,7 = 0,606$  см.

**Пример 6** Определить максимальную длину пробега  $\beta$ -частиц в алюминии для источника  $\beta$ -частиц RaC.

Решение. По формуле  $R_{\beta_{\text{макс}}}^{\text{Al}} = 0,2 \cdot 3,15 = 0,63$  см

## Взаимодействие нейтронного излучения с веществом

1. *Ультрахолодные нейтроны* — нейтроны с энергией менее  $10^{-7}$  эВ.

2. *Холодные нейтроны* — нейтроны с энергией меньше  $5 \cdot 10^{-3}$  эВ. Ультрахолодные и холодные нейтроны отличаются аномально большой проникающей способностью при прохождении через поликристаллические вещества.

3. *Тепловые нейтроны*, находящиеся в термодинамическом равновесии с рассеивающими атомами окружающей среды, диффундируют через относительно слабо поглощающие среды так, что их скорости стремятся к максвелловскому распределению. Поэтому их называют тепловыми. Их энергия 0,025—0,1 эВ.

5. *Нейтроны промежуточных энергий* от 0,5 кэВ до 0,2 МэВ. Для нейтронов этих энергий наиболее типичный процесс взаимодействия с веществом — упругое рассеяние.

6. *Быстрые нейтроны* с энергией от 0,2 до 20 МэВ. Характеризуются как упругим, так и неупругим рассеянием и возникновением пороговых ядерных реакций.

7. *Сверхбыстрые нейтроны* обладают энергией выше 20 МэВ. Они отличаются ядерными реакциями с вылетом большого числа частиц. При энергии нейтронов выше 300 МэВ наблюдается слабое взаимодействие нейтронов с ядром (прозрачность ядер для сверхбыстрых нейтронов) и появление «реакции скалывания», в результате которой бомбардируемое ядро испускает несколько осколков.

При рассмотрении замедляющих свойств различных материалов вводится величина  $\bar{\xi}$ , называемая *среднелогарифмической потерей энергии* (логарифмическим декрементом энергии):

$$\bar{\xi} = \overline{\ln \frac{E_0}{E_H}} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}.$$

$$i = \frac{\ln\left(\frac{E_0}{E_i}\right)}{\xi}$$



При достаточно больших значениях  $A$  ( $A \geq 12$ )

$$\bar{\nu} \approx \frac{2}{A + 2/3} \approx \frac{2}{A}.$$

Тогда

$$\bar{n} \approx \frac{A}{2} \ln \frac{E_0}{E_n}.$$

При малом значении  $A$  рекомендуется более точная формула

$$\bar{n} = \left( \frac{A}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{18A} \right) \ln \frac{E_0}{E_n}.$$

Замедление от 2 МэВ до 0,025 МэВ

Вещество	$A$	$\bar{\nu}$	$\bar{n}$
Водород	1	1,0	15
Дейтерий	2	0,726	25
Бериллий	9	0,208	85
Углерод	12	0,158	115
Уран	238	0,00838	2172