

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Оренбургский государственный университет»

Т.М. Чмерева, Т.В. Климова

# ЗАДАЧИ ПО РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКЕ

Учебное пособие

Рекомендовано ученым советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательным программам высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 Физика

Оренбург  
2017

УДК 539.1(075.8)  
ББК 22.383я73  
Ч75

Рецензент - кандидат технических наук, доцент А.С. Лелюхин

**Чмерева, Т.М.**  
Ч75 **Задачи по радиационной физике : учебное пособие/ Т.М. Чмерева, Т.В. Климова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2017**  
**ISBN 978-5-7410-1717-3**

Пособие предназначено для самостоятельного овладения студентами методикой решения задач по радиационной физике. Пособие состоит из пяти разделов, в которых рассматриваются взаимодействие ионизирующего излучения с веществом, основы дозиметрии и защита от ионизирующих излучений. Каждый раздел содержит краткую теоретическую справку, задачи с подробными решениями и задачи для самостоятельной работы.

Материалы пособия могут быть также использованы при проведении практических занятий по физике ядра и элементарных частиц.

УДК 539.1(075.8)  
ББК 22.383я73

ISBN 978-5-7410-1717-3

© Чмерева Т.М.  
Климова Т.В., 2017  
© ОГУ, 2017

## Содержание

Предисловие.....	4
Вводные положения .....	5
1 Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом .....	7
1.1 Примеры решения задач .....	8
1.2 Задачи для самостоятельного решения .....	22
2 Взаимодействие электронов с веществом .....	25
2.1 Примеры решения задач .....	27
2.2 Задачи для самостоятельного решения .....	37
3 Взаимодействие рентгеновского и $\gamma$ -излучения с веществом .....	40
3.1 Примеры решения задач .....	41
3.2 Задачи для самостоятельного решения .....	58
4 Основы дозиметрии.....	62
4.1 Примеры решения задач .....	64
4.2 Задачи для самостоятельного решения .....	85
5 Защита от ионизирующего излучения .....	90
5.1 Примеры решения задач .....	93
5.2 Задачи для самостоятельного решения .....	109
Список использованных источников .....	114
Приложение А.....	115

## Предисловие

Учебное пособие, представляющее собой сборник задач, соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению подготовки 03.03.02 – Физика.

Учебное пособие предназначено для самостоятельной аудиторной и внеаудиторной работы студентов при освоении учебной дисциплины «Радиационная физика», предусмотренной учебным планом профиля «Медицинская физика».

Пособие содержит пять разделов: «Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом», «Взаимодействие электронов с веществом», «Взаимодействие рентгеновского и  $\gamma$ -излучения с веществом», «Основы дозиметрии», «Защита от ионизирующего излучения». В каждом разделе пособия приводятся необходимые для решения задач формулы, даются подробные примеры решения типовых задач и содержатся задачи для самостоятельной работы. В приложении приведен необходимый справочный материал.

При записи формул используется как гауссова система единиц (СГС), так и система СИ. Для корректного применения формул указаны единицы измерения входящих в них физических величин.

Учебное пособие может быть полезно студентам других естественнонаучных направлений подготовки при изучении дисциплин, связанных с использованием ионизирующих излучений в науке и практике.

## Вводные положения

*Радионуклид* – атомное ядро, способное к радиоактивному распаду.

*Альфа-распад* – самопроизвольное превращение атомного ядра, при котором испускается альфа-частица (ядро атома гелия) и зарядовое число  $Z$  ядра уменьшается на 2 единицы, массовое число  $A$  – на 4 единицы.

*Бета-распадом* называется самопроизвольное превращение атомного ядра, при котором его зарядовое число  $Z$  меняется на единицу, а массовое число  $A$  остается неизменным.

Различают три вида бета-распада:

$\beta^-$ -распад, при котором из ядра испускается электрон ( $e^-$ ) и антинейтрино ( $\bar{\nu}_e$ ). При  $\beta^-$ -распаде  $\Delta Z = +1$ .

$\beta^+$ -распад, при котором из ядра испускается позитрон ( $e^+$ ) и нейтрино ( $\nu_e$ ).  $\beta^+$ -распад может происходить, если масса исходного атома превышает массу конечного атома на величину большую, чем  $2m_e c^2 = 1,022 \text{ МэВ}$ . При  $\beta^+$ -распаде  $\Delta Z = -1$ .

*Электронный захват*, при котором один из электронов атомной оболочки поглощается ядром и при этом испускается нейтрино ( $\nu_e$ ). Чаще всего электрон поглощается с ближайшей к ядру  $K$ -оболочки атома ( $K$ -захват). При электронном захвате  $\Delta Z = -1$ .

При  $\beta^+$ – и  $\beta^-$ -распаде из ядра испускаются две частицы. Выделяющаяся в каждом единичном акте распада энергия делится между бета-частицей и нейтрино (энергией отдачи ядра можно пренебречь), так что кинетическая энергия электрона (или позитрона) может принимать любые значения от нуля до максимально возможной величины  $T_{\beta \text{ max}}$ .

*Гамма-излучение* – коротковолновое электромагнитное излучение, появляющееся в результате перехода атомных ядер из возбужденных в более низкие энерге-

тические состояния, ядерных реакций, аннигиляции и торможения заряженных частиц высоких энергий.

*Основной закон радиоактивного распада* – уменьшение со временем числа радиоактивных ядер

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  – постоянная распада, определяющая вероятность распада ядра в единицу времени;

$N_0$  – начальное количество радиоактивных ядер.

*Период полураспада* – время, за которое количество радиоактивных ядер уменьшается вдвое

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}.$$

*Среднее время жизни радионуклида*

$$\tau = \frac{1}{\lambda}.$$

# 1 Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом

Удельные ионизационные потери энергии тяжелой заряженной нерелятивистской частицы (система СГС) [1]

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{4\pi n Z e^4 z^2}{m_e v^2} \ln \frac{2m_e v^2}{\bar{J}}, \text{ эрг/см}, \quad (1.1)$$

где  $e$  – элементарный заряд;

$z$  – заряд частицы, выраженный в элементарных зарядах;

$v$  – скорость частицы;

$n$  – концентрация атомов среды;

$m_e$  – масса электрона;

$\bar{J}$  – средняя энергия ионизации атома вещества.

Для атома с порядковым номером  $Z$  энергия ионизации  $\bar{J} \approx 13,5Z$ , эВ.

В системе СИ в формуле (1.1) появляется множитель  $(4\pi\epsilon_0)^{-2}$ ,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная.

*Средний пробег  $\alpha$ -частицы в воздухе при нормальных условиях [2]*

$$R_\alpha = 0,31T_\alpha^{3/2}, \text{ см}, \quad 4 \text{ МэВ} < T_\alpha < 7 \text{ МэВ}, \quad (1.2)$$

где  $T_\alpha$  – кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы, МэВ.

*Средний пробег протона в воздухе при нормальных условиях [2]*

$$R_p(T) = R_\alpha(4T) - 0,2, \text{ см}, \quad T > 0,5 \text{ МэВ}, \quad (1.3)$$

где  $R_\alpha(4T)$  – средний пробег в воздухе  $\alpha$ -частицы с кинетической энергией  $4T$ .

*Средний пробег  $\alpha$ -частицы в веществе с массовым числом  $A$  (в массовых единицах длины) [2]*

$$R'_\alpha = 0,56A^{1/3}R_\alpha, \text{ мг/см}^2, \quad (1.4)$$

где  $R_\alpha$  – пробег  $\alpha$ -частицы (1.2) с той же энергией в воздухе, см.

Чтобы получить пробег  $\alpha$ -частицы в веществе в обычных единицах длины, нужно пробег в массовых единицах длины (1.4) разделить на плотность вещества.

Формулы (1.2) – (1.4) являются эмпирическими.

*Кривая Брэгга* - зависимость удельной ионизации (числа пар ионов, образуемых на единице пути заряженной частицей) от расстояния, пройденного частицей (рисунок 1.1) [3].

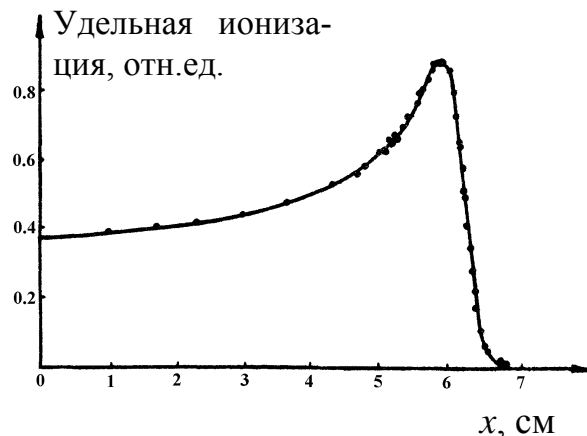


Рисунок 1.1 – Кривая Брэгга

## 1.1 Примеры решения задач

1.1.1 Мимо покоящегося свободного электрона пролетела  $\alpha$ -частица с кинетической энергией  $T_\alpha = 20$  МэВ, имея прицельный параметр  $b = 30$  пм. Определить кинетическую энергию  $T_e$  электрона отдачи, считая, что траектория  $\alpha$ -частицы прямая, и за время пролета электрон остается неподвижным.

*Решение.*

В результате взаимодействия  $\alpha$ -частицы с электроном последний приобретает импульс в направлении, перпендикулярном к направлению движения  $\alpha$ -частицы (рис. 1.2):

$$p = \int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp} dt,$$

где  $\int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp} dt$  – импульс силы за время взаимодействия;

$F_{\perp} = F \cos\theta$  – нормальная к траектории  $\alpha$ -частицы сила, действующая на электрон;

$F = qe/r^2$  – сила кулоновского взаимодействия ( $q$  – заряд альфа-частицы,  $e$  – заряд электрона).

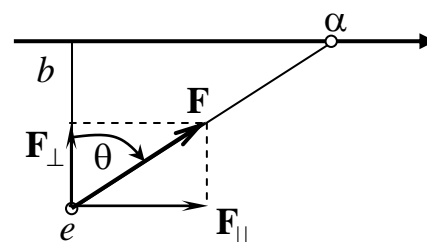


Рисунок 1.2 – Взаимное расположение  $\alpha$ -частицы и электрона



Сделаем в интеграле замену переменных

$$dt = \frac{dt}{d\theta} d\theta = \frac{d\theta}{\dot{\theta}},$$

получим

$$p = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{qe \cos\theta d\theta}{r^2 \dot{\theta}}.$$

Учтем закон сохранения момента импульса  $m_\alpha r^2 \dot{\theta} = m_\alpha v b$ , где  $b$  – прицельный параметр,  $v$  – скорость  $\alpha$ -частицы. После интегрирования получим  $p = 2qe/(vb)$ . Теперь выразим кинетическую энергию электрона через кинетическую энергию  $\alpha$ -частицы  $T_\alpha = m_\alpha v^2 / 2$

$$T_e = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{2q^2 e^2}{v^2 b^2 m_e} = \frac{m_\alpha q^2 e^2}{m_e b^2 T_\alpha}.$$

Подставляя значения величин в системе СГС, получим

$$T_e = \frac{4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} (2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10})^2 (4,8 \cdot 10^{-10})^2}{0,91 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^{-9})^2 20 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} = 5,4 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} = 3,4 \text{ эВ}.$$

*Замечание.* В системе СИ формула для кинетической энергии электрона имеет вид

$$T_e = \frac{m_\alpha q^2 e^2}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e b^2 T_\alpha}.$$

Подставим значения величин в этой системе  $m_\alpha = 4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}$  кг;  $m_e = 0,911 \cdot 10^{-30}$  кг;  $q = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $b = 3 \cdot 10^{-11}$  м;  $T_\alpha = 3,2 \cdot 10^{-12}$  Дж и получим  $T_e = 5,4 \cdot 10^{-19}$  Дж = 3,4 эВ.

1.1.2 Какую энергию теряет на единице пути  $\alpha$ -частица, движущаяся со скоростью  $v$  через среду с концентрацией электронов  $n$ ? Считать, что  $\alpha$ -частица взаимо-

действует с электронами, относительно которых ее прицельный параметр заключен в интервале от  $b$  до  $b + db$ .

*Решение.*

Как показано в предыдущей задаче, в результате взаимодействия с  $\alpha$ -частицей электрон получает энергию

$$T_e = \frac{2q^2 e^2}{v^2 b^2 m_e},$$

где  $q = z e$  – заряд частицы.

Такую же энергию теряет  $\alpha$ -частица. При движении через среду  $\alpha$ -частица взаимодействует со всеми электронами, находящимися в пределах цилиндрического слоя с внутренним радиусом  $b$  и внешним  $b + db$ , ось которого совпадает с траекторией движения частицы, как показано на рисунке 1.3. Число электронов в данном слое равно:

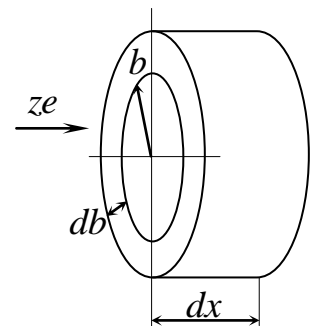


Рисунок 1.3 – Цилиндрический слой

$$dN = 2\pi n Z r dr dx,$$

где  $n$  – концентрация атомов.

Кинетическая энергия, потерянная частицей при взаимодействии со всеми указанными электронами, будет равна

$$-dT(b) = -T_e dN = \frac{4\pi n Z z^2 e^4}{m_e v^2} \frac{db}{b} dx.$$

Удельная потеря энергии на ионизацию составляет

$$-\frac{dT(b)}{dx} = \frac{4\pi n Z z^2 e^4}{m_e v^2} \frac{db}{b}.$$

Для получения полной удельной потери энергии частицей необходимо проинтегрировать  $-\frac{dT(b)}{dx}$  по всем возможным значениям параметра  $b$

$$-\frac{dT}{dx} = - \int_b^{b+db} \frac{dT(b)}{dx} db = \frac{4\pi n Z z^2 e^4}{m_e v^2} \ln \frac{b+db}{b}.$$

1.1.3 Протон и  $\alpha$ -частица одинаковых энергий  $T = 4$  МэВ движутся в азоте, находящемся при нормальных условиях. Найти отношение удельных ионизационных потерь протона и  $\alpha$ -частицы.

*Решение.*

Сделаем в формуле (1.1) подстановку  $v^2 = 2T/m$ , получим

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi n Z e^4 z^2 m}{m_e T} \ln \frac{4m_e T}{\bar{J} m},$$

где  $m$  – масса частицы.

Тогда отношение ионизационных потерь будет равно

$$\frac{(dT/dx)_{\text{ион } p}}{(dT/dx)_{\text{ион } \alpha}} = \frac{z_p^2 m_p}{z_\alpha^2 m_\alpha} \frac{\ln \frac{4m_e T}{\bar{J} m_p}}{\ln \frac{4m_e T}{\bar{J} m_\alpha}},$$

где  $z_p$  и  $z_\alpha$  – заряд протона и  $\alpha$ -частицы,

$m_p$  и  $m_\alpha$  – масса протона и  $\alpha$ -частицы.

Так как ищется отношение величин, то при подстановке данных из условия задачи значения величин переводить в систему СГС необязательно

$$\frac{(dT/dx)_{\text{ион } p}}{(dT/dx)_{\text{ион } \alpha}} = \frac{1^2 \cdot 1}{2^2 \cdot 4} \ln \frac{4 \cdot 9,1 \cdot 10^{-28} \cdot 4 \cdot 10^6}{13,5 \cdot 7 \cdot 1,67 \cdot 10^{-24}} \left( \ln \frac{4 \cdot 9,1 \cdot 10^{-28} \cdot 4 \cdot 10^6}{13,5 \cdot 7 \cdot 4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} \right)^{-1} = 0,09.$$

1.1.4 Найти отношение удельных ионизационных потерь  $\alpha$ -частицы с кинетической энергией  $T = 5$  МэВ в алюминии и меди.

*Решение.*

Воспользуемся формулой зависимости ионизационных потерь от кинетической энергии частицы, полученной в предыдущей задаче

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi n Z e^4 z^2 m}{m_e T} \ln \frac{4m_e T}{\bar{J} m}.$$

Концентрацию электронов в веществе определим по формуле

$$n = \frac{\rho}{m_0 A},$$

где  $\rho$  – плотность вещества;

$m_0$  – атомная единица массы;

$A$  – массовое число.

Тогда искомое отношение будет иметь вид

$$\frac{(dT/dx)_{\text{ион Al}}}{(dT/dx)_{\text{ион Cu}}} = \frac{A_{\text{Cu}} Z_{\text{Al}} \rho_{\text{Al}}}{A_{\text{Al}} Z_{\text{Cu}} \rho_{\text{Cu}}} \frac{\ln \frac{4m_e T}{\bar{J}_{\text{Al}} m_{\alpha}}}{\ln \frac{4m_e T}{\bar{J}_{\text{Cu}} m_{\alpha}}}.$$

Подстановка данных из условия задачи приводит к следующему результату

$$\begin{aligned} \frac{(dT/dx)_{\text{ион Al}}}{(dT/dx)_{\text{ион Cu}}} &= \frac{65 \cdot 13 \cdot 2,7}{27 \cdot 29 \cdot 9,8} \ln \frac{4 \cdot 9,1 \cdot 10^{-28} \cdot 5 \cdot 10^6}{13,5 \cdot 13 \cdot 4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} \times \\ &\times \left( \ln \frac{4 \cdot 9,1 \cdot 10^{-28} \cdot 5 \cdot 10^6}{13,5 \cdot 29 \cdot 4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} \right)^{-1} = 0,42. \end{aligned}$$

1.1.5 Точечный источник  $\alpha$ -частиц с кинетической энергией  $T = 5,0$  МэВ расположен в центре сферической ионизационной камеры радиусом  $R = 100$  мм. Определить давление воздуха в камере, при котором ток насыщения не будет зависеть от давления?

*Решение.*

На рисунке 1.4 показана зависимость ионизационных потерь  $\alpha$ -частиц, испускаемых различными источниками, в воздухе от давления. Из рисунка видно, что имеется область, в которой потери пропорциональны давлению. Тогда в этой области пробег  $\alpha$ -частицы обратно пропорционален давлению. Если пробег совпадает с радиусом сферы, то увеличение давления не приведет к возрастанию ионизационного тока, т.к. весь пробег будет укладываться в камере. Запишем связь между давлением  $p$  и пробегом  $R$  в виде  $R = a/p$ , где  $a$  – некоторый коэффициент. При нормальных условиях эта формула имеет вид  $R_0 = a/p_0$ . Исключая из этих формул коэффициент  $a$ , получим

$$p = \frac{R_0 p_0}{R}.$$

Используя эмпирическую формулу зависимости пробега  $\alpha$ - частицы  $R_0$  от ее энергии  $T$  при нормальных условиях (1.2), окончательно имеем:

$$p = \frac{0,31 \cdot T^{3/2}}{R} p_0.$$

Подставив числовые данные, получим  $p \geq 0,35$  атм.

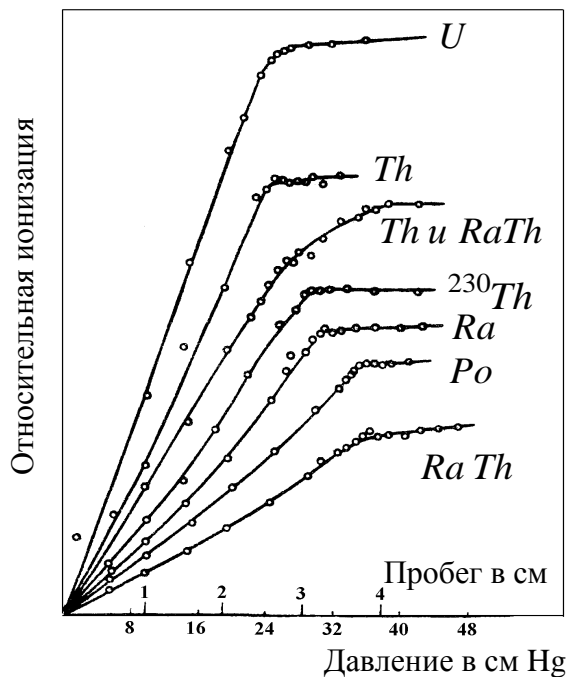


Рисунок 1.4 – Зависимость ионизации, создаваемой  $\alpha$ - частицей, от давления [4]

1.1.6 В некоторой среде с одинаковыми скоростями движутся протон и дейтрон. Определить с помощью формулы (1.1) зависимость между пробегами этих частиц. Воспользовавшись полученной зависимостью и эмпирическими формулами (1.2) и (1.3), вычислить пробег в воздухе дейтрона с кинетической энергией  $T = 2,0$  МэВ.

*Решение.*

Формулу (1.1) можно представить в следующем виде:

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = z^2 f(v),$$

где  $f(v)$  – функция скорости частицы.

Отсюда выразим  $dx$ , тогда пробег частицы за время, когда ее скорость изменяется от  $v$  до нуля, определяется интегралом

$$R = -\int_v^0 dx = \int_v^0 \frac{dT}{z^2 f(v)} = \int_v^0 \frac{m v dv}{z^2 f(v)} = \frac{m}{z^2} F(v),$$

где  $m$  – масса частицы;

$F(v)$  – функция, зависящая только от скорости частицы и свойств среды.

Отсюда  $R_d(v) = 2R_p(v)$ . Так как  $m_d/m_p = 2$ , при одинаковых скоростях кинетические энергии протона и дейтрона относятся как 1 : 2, тогда для пробегов получаем следующую связь

$$R_d(T) = 2R_p(T/2).$$

Чтобы определить пробег дейтрона с энергией 2,0 МэВ, необходимо найти пробег протона с энергией 1,0 МэВ. Из (1.3) следует, что сначала нужно вычислить пробег альфа-частицы с энергией 4,0 МэВ. Используя (1.2), получаем  $R_\alpha = 0,31 \cdot 4^{3/2} = 2,48$  см. Подставляя этот пробег в (1.3), найдем  $R_p = 2,28$  см. Окончательно для пробега дейтрона получим  $R_d = 2R_p = 4,56$  см.

1.1.7 Какое количество пар ионов образуется на первом сантиметре пути  $\alpha$ -частицы, движущейся с начальной кинетической энергией  $T_{\alpha 0} = 6$  МэВ в воздухе? Энергия образования одной пары ионов равна  $W = 34$  эВ.

*Решение.*

По эмпирической формуле (1.2) найдем полный путь  $\alpha$ -частицы указанной энергии в воздухе

$$R_{\alpha} = 0,31 \cdot 6^{3/2} = 4,56 \text{ см.}$$

Из этой же формулы выразим начальную энергию частицы, у которой пробег на 1 см меньше, т.е.  $R_{\alpha 1} = 3,56$  см

$$T_{\alpha 1} = \left( \frac{R_{\alpha 1}}{0,31} \right)^{2/3} = 5,1 \text{ МэВ.}$$

Таким образом, на первом сантиметре пути  $\alpha$ -частица теряет энергию

$$\Delta T = T_{\alpha 0} - T_{\alpha 1} = 0,9 \text{ МэВ.}$$

Разделив потерянную энергию на энергию образования одной пары ионов, определим искомое количество пар ионов

$$N = \frac{\Delta T}{W} = \frac{0,9 \cdot 10^6}{34} = 2,6 \cdot 10^4.$$

1.1.8 Протон с начальной кинетической энергией  $T_{p0} = 1,5$  МэВ движется в воздухе. Определить относительное число пар ионов, образующихся на первой половине среднего пробега протона. Энергия образования одной пары ионов равна  $W = 34$  эВ.

*Решение.*

Чтобы определить средний пробег протона по эмпирической формуле (1.3), сначала нужно найти пробег  $\alpha$ -частицы с энергией  $4T_{p0}$  в воздухе по формуле (1.2)

$$R_{\alpha 0} = 0,31 \cdot 6^{3/2} = 4,56 \text{ см.}$$

Тогда пробег протона составит

$$R_{p0} = 4,56 - 0,2 = 4,36 \text{ см.}$$

Теперь определим начальную энергию протона, у которого пробег наполовину меньше  $R_{p1} = 2,18 \text{ см}$ . При этом пробег  $\alpha$ -частицы будет равен  $R_{\alpha 1} = R_{p1} + 0,2 = 2,38 \text{ см}$ , а ее начальная энергии из формулы (1.2)

$$T_{\alpha 1} = \left( \frac{R_{\alpha 1}}{0,31} \right)^{2/3} = 3,9 \text{ МэВ.}$$

Тогда энергия протона с пробегом  $R_{p1}$  будет равна  $T_{p1} = T_{\alpha 1}/4 \approx 1 \text{ МэВ}$ . Таким образом, на первой половине пути протон теряет  $\Delta T_p = T_{p0} - T_{p1} = 0,5 \text{ МэВ}$ . Определим теперь относительное количество пар ионов, образующихся на первой половине пути протона

$$\eta = \frac{\Delta T_p / W}{T_{p0} / W} = \frac{\Delta T_p}{T_{p0}} = 0,33.$$

1.1.9 Средний пробег  $\alpha$ -частиц в графите составляет  $R'_\alpha = 40 \text{ мкм}$ . Определить кинетическую энергию этих частиц, воспользовавшись эмпирическими формулами.

*Решение.*

Воспользуемся формулой (1.4), предварительно выразив пробег в массовых единицах. Для этого умножим данный в условии задачи пробег на плотность графита  $\rho = 1600 \text{ мг/см}^3$ , получим  $R'_\alpha = 40 \cdot 10^{-4} \cdot 1600 = 6,4 \text{ мг/см}^2$ . Из (1.4) получаем пробег  $\alpha$ -частицы в воздухе

$$R_\alpha = \frac{R'_\alpha}{0,56 \cdot A^{1/3}} = \frac{6,4}{0,56 \cdot 12^{1/3}} = 5 \text{ см.}$$



Теперь выразим из формулы (1.2) кинетическую энергию

$$T_{\alpha} = \left( \frac{R_{\alpha}}{0,31} \right)^{2/3} = \left( \frac{5}{0,31} \right)^{2/3} = 6,4 \text{ МэВ.}$$

1.1.10 На металлическую подложку наносят радиоактивный препарат  $^{210}\text{Po}$ , испускающий  $\alpha$ -частицы с энергией  $T_{\alpha} = 5,3$  МэВ. При некоторой минимальной толщине слоя дальнейшее добавление препарата не приводит к увеличению интенсивности потока испускаемых  $\alpha$ -частиц. Найти эту толщину.

*Решение.*

Интенсивность потока испускаемых препаратом  $^{210}\text{Po}$   $\alpha$ -частиц перестанет увеличиваться, когда толщина слоя совпадет со средней длиной пробега  $\alpha$ -частицы в полонии. Определим длину пробега по эмпирической формуле (1.4). Для этого сначала найдем пробег  $\alpha$ -частицы в воздухе по формуле (1.2)

$$R_{\alpha} = 0,31 \cdot (5,3)^{3/2} = 3,78 \text{ см,}$$

тогда

$$R'_{\alpha} = 0,56 \cdot 210^{1/3} \cdot 3,78 = 12,58 \text{ мг/см}^2.$$

Чтобы выразить пробег в сантиметрах, нужно полученное значение разделить на плотность  $^{210}\text{Po}$ , равную  $\rho = 9,4 \text{ г/см}^3$ . В результате получим

$$l_{\min} = \frac{R'_{\alpha}}{\rho} = \frac{12,58 \cdot 10^{-3}}{9,4} = 13 \text{ мкм.}$$

1.1.11 Пробег  $\alpha$ -частицы в алюминии составляет  $R'_{\alpha \text{ Al}} = 15$  мкм. Найти пробег  $\alpha$ -частицы такой же энергии в свинце.

*Решение.*

Запишем формулы среднего пробега  $\alpha$ -частицы в алюминии и свинце в обычных единицах длины. Для этого пробег в веществе (1.4), выраженный в массовых единицах, разделим на плотность вещества

$$R'_{\alpha \text{ Pb}} = 0,56 A_{\text{Pb}}^{1/3} R_{\alpha} / \rho_{\text{Pb}},$$

$$R'_{\alpha \text{ Al}} = 0,56 A_{\text{Al}}^{1/3} R_{\alpha} / \rho_{\text{Al}}.$$

Разделим первое выражение на второе и выразим пробег в свинце

$$R'_{\alpha \text{ Pb}} = \frac{A_{\text{Pb}}^{1/3} \rho_{\text{Al}}}{A_{\text{Al}}^{1/3} \rho_{\text{Pb}}} R'_{\alpha \text{ Al}}.$$

Подставим значения величин, получим

$$R'_{\alpha \text{ Pb}} = \frac{207^{1/3} \cdot 2,7 \cdot 15 \cdot 10^{-4}}{27^{1/3} \cdot 11,3} = 7 \text{ мкм.}$$

1.1.12 На алюминиевую фольгу падают нормально  $\alpha$ -частицы с кинетической энергией  $T_0 = 7$  МэВ. Определить толщину фольги, при которой энергия прошедших частиц равна  $T = 4$  МэВ.

*Решение.*

Сначала определим полный пробег  $\alpha$ -частицы с энергией  $T_0$  в алюминии. Для этого подставим пробег в воздухе (1.2) в формулу (1.4), записанную в обычных единицах длины, и получим

$$R'_{\alpha}(T_0) = \frac{0,56}{\rho} A^{1/3} \cdot 0,31 T_0^{3/2} = \frac{0,56 \cdot 27^{1/3} \cdot 0,31 \cdot 7^{3/2}}{2700} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

Аналогичным образом найдем пробег частицы с энергией  $T$

$$R'_{\alpha}(T) = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

Искомая толщина фольги равна

$$l = R'_\alpha(T_0) - R'_\alpha(T) = (3,6 - 1,5) \cdot 10^{-3} = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ см или } 21 \text{ мкм.}$$

1.1.13 Какова должна быть минимальная толщина алюминиевой фольги, расположенной на расстоянии  $r = 2$  см от радиоактивного источника  $\alpha$ -частиц с энергией  $T_{\alpha 0} = 7,0$  МэВ, чтобы фольга задерживала все  $\alpha$ -частицы?

*Решение.*

Сначала нужно определить, какая энергия будет у  $\alpha$ -частицы после прохождения 2 см в воздухе. Для этого найдем полный пробег в воздухе по формуле (1.2)

$$R_{\alpha 0} = 0,31 \cdot (7,0)^{3/2} = 5,74 \text{ см.}$$

Теперь из той же формулы (1.2) найдем начальную энергию частицы, у которой пробег  $R_{\alpha 1} = R_{\alpha 0} - r = 3,74$  см

$$T_{\alpha 1} = \left( \frac{R_{\alpha 1}}{0,31} \right)^{2/3} = \left( \frac{3,74}{0,31} \right)^{2/3} = 5,3 \text{ МэВ.}$$

Таким образом, фольга должна задержать частицы с энергией 5,3 МэВ. Воспользовавшись формулой (1.4), получим

$$R'_\alpha = 0,56 \cdot 27^{1/3} \cdot 3,74 = 6,28 \text{ мг/см}^2.$$

В обычных единицах длины  $R'_\alpha = 23$  мкм.

1.1.14 Найти средний пробег дейтронов с кинетической энергией  $T_d = 3,5$  МэВ в алюминии.

*Решение.*

В задаче 1.1.6 была получена формула пробега частицы в веществе

$$R = \frac{m}{z^2} F(v),$$

где  $m$  – масса частицы;

$z$  – ее заряд, выраженный в элементарных зарядах;

$F(v)$  – функция, зависящая только от скорости частицы.

Запишем отношение пробегов  $\alpha$ -частицы и дейтрона, движущихся с одинаковыми скоростями, при этом их кинетические энергии относятся как  $T_\alpha/T_d = 2:1$ , т.к. масса  $\alpha$ -частицы в два раза больше массы дейтрона.

$$\frac{R_\alpha(2T_d)}{R_d(T_d)} = \frac{m_\alpha z_d^2}{z_\alpha^2 m_d} = \frac{4 \cdot 1^2}{2^2 \cdot 2} = \frac{1}{2}.$$

Из этого отношения следует, что  $R_d(T_d) = 2R_\alpha(2T_d)$ . Поэтому чтобы найти пробег дейтрона, нужно определить пробег  $\alpha$ -частицы с удвоенной энергией  $T_\alpha = 7$  МэВ. В предыдущей задаче был найден пробег частицы такой энергии в воздухе  $R_\alpha = 5,74$  см. Тогда пробег  $\alpha$ -частицы в алюминии, выраженный в обычных единицах длины, составит

$$R'_\alpha = \frac{0,56 \cdot 27^{1/3} \cdot 5,74}{2700} = 36 \text{ мкм.}$$

Окончательно, пробег дейтрона в алюминии будет равен  $R_d = 72$  мкм.

1.1.15 В результате прохождения быстрой тяжелой заряженной частицы через фотоэмульсию вдоль траектории образуются  $\delta$ -электроны, число которых на единице длины траектории в системе СГС дается формулой

$$N_\delta = \frac{2\pi n q^2 e^2}{m_e v^2} \left( \frac{1}{T_{пор}} - \frac{1}{2m_e v^2} \right),$$

где  $n$  – концентрация электронов в фотоэмульсии;

$q$  и  $v$  – заряд и скорость тяжелой частицы;

$T_{пор}$  – пороговая кинетическая энергия электрона, необходимая для образования видимого следа в фотоэмульсии;

$m_e$  – масса электрона.

Какова минимальная энергия  $\alpha$ -частицы, при которой в фотоэмульсии с  $T_{nop} = 10$  кэВ начинают образовываться  $\delta$ -электроны?

*Решение.*

При минимальной кинетической энергии выражение в скобках в формуле числа  $\delta$ -электронов обращается в ноль, откуда получаем  $2m_e v^2 = T_{nop}$ . Выразим из этого равенства скорость  $\alpha$ -частицы и найдем ее кинетическую энергию

$$T_\alpha = \frac{m_\alpha v^2}{2} = \frac{m_\alpha T_{nop}}{4m_e}.$$

Подставив в полученную формулу значения величин, найдем

$$T_\alpha = \frac{4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot 10}{4 \cdot 9,1 \cdot 10^{-28}} = 18200 \text{ кэВ} = 18,2 \text{ МэВ}.$$

1.1.16 В условиях предыдущей задачи определить энергию  $\alpha$ -частицы, при которой образующееся число  $\delta$ -электронов максимально, и вычислить это число на  $l = 100$  мкм пути  $\alpha$ -частицы. Характеристики эмульсии  $n = 6,0 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$  и  $T_{nop} = 17,5$  кэВ.

*Решение.*

Чтобы ответить на вопрос задачи, необходимо определить скорость  $\alpha$ -частицы, при которой функция  $N_\delta(v)$  максимальна. Для этого вычислим производную

$$\begin{aligned} \frac{dN_\delta}{dv} &= -\frac{4\pi n q^2 e^2}{m_e v^3} \left( \frac{1}{T_{nop}} - \frac{1}{2m_e v^2} \right) + \frac{2\pi n q^2 e^2}{m_e v^2} \frac{1}{m_e v^3} = \\ &= \frac{4\pi n q^2 e^2}{m_e v^3} \left( \frac{1}{m_e v^2} - \frac{1}{T_{nop}} \right). \end{aligned}$$

Приравняв к нулю производную, найдем, что  $m_e v^2 = T_{nop}$ . Теперь можно записать выражение для кинетической энергии  $\alpha$ -частицы

$$T_\alpha = \frac{m_\alpha T_{nop}}{2m_e} = \frac{4 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot 17,5}{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-28}} = 64000 \text{кэВ} = 64 \text{МэВ}.$$

Чтобы ответить на второй вопрос задачи, подставим скорость, отвечающую максимальному значению  $N_\delta$ , в исходную формулу числа  $\delta$ -электронов, получим

$$N_\delta = \frac{\pi n q^2 e^2 l}{T_{nop}^2}.$$

Подставляя числовые данные в системе СГС, получаем

$$N_\delta = \frac{\pi \cdot 6,0 \cdot 10^{23} \cdot (2 \cdot 4,8 \cdot 10^{-10})^2 \cdot (4,8 \cdot 10^{-10})^2 \cdot 100 \cdot 10^{-4}}{(17,5 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12})^2} = 5,1.$$

1.1.17 В условиях задачи 1.1.15 определить заряд тяжелой частицы, если максимальная плотность  $\delta$ -электронов, образуемых ею, в 4 раза меньше максимальной плотности  $\delta$ -электронов от  $\alpha$ -частицы.

*Решение.*

Заряд  $\alpha$ -частицы равен  $q_\alpha = 2e$ . Заряд неизвестной частицы обозначим как  $q_x = xe$ . Плотность  $\delta$ -электронов пропорциональна квадрату заряда, поэтому

$$\frac{N_\delta(\alpha)}{N_\delta(x)} = \frac{(2e)^2}{(xe)^2} = 4.$$

Откуда следует, что  $x = 1$  и заряд неизвестной частицы  $q_x = e$ .

## 1.2 Задачи для самостоятельного решения

1.2.1 Определить удельные ионизационные потери энергии дейтрона с кинетической энергией  $T_d = 4 \text{МэВ}$  в азоте при нормальных условиях.

*Ответ.*  $-(dT/dx)_{\text{ион}} = 0,17 \text{ МэВ/см.}$

1.2.2 Найти отношение удельных ионизационных потерь протонов и  $\alpha$ -частиц, движущихся в кислороде с одинаковыми скоростями.

*Ответ.*  $-(dT/dx)_{\text{ион, p}} / -(dT/dx)_{\text{ион, \alpha}} = 0,25.$

1.2.3 Найти отношение удельных ионизационных потерь протонов и  $\alpha$ -частиц с одинаковой кинетической энергией  $T = 1 \text{ МэВ}$  в углероде.

*Ответ.*  $-(dT/dx)_{\text{ион, p}} / -(dT/dx)_{\text{ион, \alpha}} = 0,11.$

1.2.4 В неоне с одинаковой кинетической энергией  $T = 5 \text{ МэВ}$  движутся  $\alpha$ -частица и протон. Определить отношение удельных ионизационных потерь этих частиц.

*Ответ.*  $-(dT/dx)_{\text{ион, \alpha}} / -(dT/dx)_{\text{ион, p}} = 11.$

1.2.5 Каково отношение удельных ионизационных потерь протонов с кинетической энергией  $T = 10 \text{ МэВ}$  в углероде и свинце?

*Ответ.*  $-(dT/dx)_{\text{ион, C}} / -(dT/dx)_{\text{ион, Pb}} = 0,34.$

1.2.6 Ток насыщения в сферической ионизационной камере с точечным источником  $\alpha$ -частиц перестает зависеть от давления воздуха в ней при  $p = 27 \text{ кПа}$ . Определить радиус камеры. Кинетическая энергия  $\alpha$ -частиц равна  $T = 5,3 \text{ МэВ}$ .

*Ответ.*  $R = 14 \text{ см.}$

1.2.7 С помощью эмпирической формулы определить энергию  $\alpha$ -частицы, пробег которой в воздухе составляет  $R_{\alpha} = 4 \text{ см}$ .

*Ответ.*  $T_{\alpha} = 5,5 \text{ МэВ.}$

1.2.8 С помощью эмпирической формулы определить энергию протона, пробег которого в воздухе составляет  $R_p = 4 \text{ см}$ .

*Ответ.*  $T_p = 1,4 \text{ МэВ.}$

1.2.9 Определить пробег  $\alpha$ -частицы с начальной кинетической энергией  $T_{\alpha} = 5,5 \text{ МэВ}$  в железе.

*Ответ.*  $R_{\alpha} = 11 \text{ мкм.}$

1.2.10 Пробег  $\alpha$ -частицы в свинце равен  $R'_{\alpha Pb} = 8$  мкм. Определить пробег  $\alpha$ -частицы такой же энергии в алюминии.

*Ответ.*  $R'_{\alpha Al} = 17$  мкм.

1.2.11 На алюминиевую фольгу толщиной  $l = 15$  мкм падают нормально  $\alpha$ -частицы с энергией  $T_{\alpha 0} = 7$  МэВ. Определить энергию прошедших сквозь фольгу частиц.

*Ответ.*  $T_{\alpha 1} = 4,9$  МэВ.

1.2.12 На алюминиевую фольгу толщиной  $l = 15$  мкм падают нормально  $\alpha$ -частицы. Определить энергию падающих частиц, если энергия прошедших сквозь фольгу частиц равна  $T_{\alpha 1} = 4$  МэВ.

*Ответ.*  $T_{\alpha 0} = 6,2$  МэВ.

1.2.13 Какова зависимость между пробегами в среде  $\alpha$ -частицы и протона, начальные скорости которых одинаковы.

*Ответ.*  $R_{\alpha} = R_p$ .

1.2.14 В некоторой среде пробег дейтрона с начальной кинетической энергией  $T_d = 3$  МэВ составляет  $R_d = 100$  мкм. Каков будет пробег  $\alpha$ -частицы, движущейся с такой же начальной скоростью, что и дейтрон, в этой среде?

*Ответ.*  $R_{\alpha} = 50$  мкм.

1.2.15 Каков средний пробег протонов с кинетической энергией  $T_p = 3$  МэВ в свинце?

*Ответ.*  $R_p = 42$  мкм.

1.2.16  $\alpha$ -частица с начальной кинетической энергией  $T_{\alpha} = 10$  МэВ создает на  $l = 1$  мкм начального участка пробега в воздухе в среднем  $N = 2,2$  пары ионов. Найти плотность потока  $\alpha$ -частиц и плотность потока энергии в воздухе на расстоянии  $r = 6$  см от точечного изотропного источника активностью  $A = 9,05 \cdot 10^6$  Бк. Принять, что на образование пары ионов затрачивается энергия, равная  $W = 34$  эВ.

*Ответ.*  $J = 2 \cdot 10^4$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>,  $J_E = 1,1 \cdot 10^5$  МэВ/(см<sup>2</sup>·с). *Указание.* Считать вдоль всего расстояния  $r$  удельные ионизационные потери постоянными (рисунок 1.1).



## 2 Взаимодействие электронов с веществом

Удельные ионизационные потери энергии электрона (система СГС) [1]

а) Нерелятивистский случай  $T \ll m_e c^2$

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{4\pi e^4}{m_e v^2} nZ \ln \frac{m_e v^2}{2\bar{J}}, \text{ эрг/см}, \quad (2.1)$$

где  $e$  – элементарный заряд;

$m_e$  – масса электрона;

$v$  – скорость электрона;

$n$  – концентрация атомов среды;

$\bar{J}$  – средняя энергия ионизации атома вещества.

Для атома с порядковым номером  $Z$  энергия ионизации  $\bar{J} \approx 13,5Z$ , эВ.

б) Ультрарелятивистский случай  $T \gg m_e c^2$  [1]

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi e^4}{m_e c^2} nZ \left( \ln \frac{T^2}{2\bar{J}^2 \sqrt{1-\beta^2}} + \frac{1}{8} \right), \text{ эрг/см}, \quad (2.2)$$

где  $c$  – скорость света;

$\beta = v/c$ .

Удельные радиационные потери энергии электрона [3]

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{рад}} = \frac{nTZ^2 r_e^2}{137} \left( 4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right), \text{ МэВ/см}, \quad (2.3)$$

где  $T$  – кинетическая энергия электрона, МэВ;

$n$  – концентрация атомов вещества,  $\text{см}^{-3}$ ;

$Z$  – порядковый номер атомов вещества;

$r_e$  – классический радиус электрона, см.

Формула (2.3) справедлива при выполнении условия  $T/(m_e c^2) > 137/Z^{1/3}$ .

Отношение удельных радиационных потерь к удельным ионизационным потерям [3]

$$\frac{(dT/dx)_{рад}}{(dT/dx)_{ион}} \approx \frac{TZ}{800}, \quad (2.4)$$

где  $T$  – кинетическая энергия электрона, МэВ;

$Z$  – порядковый номер атомов вещества.

Закон уменьшения кинетической энергии электрона в веществе, если потери энергии в основном радиационные [2]

$$T = T_0 \exp(-x/l_{рад}), \quad (2.5)$$

где  $l_{рад}$  – радиационная длина.

Средний пробег электрона в алюминии, выраженный в массовых единицах длины ( $\text{г}/\text{см}^2$ ) [2]

$$R = \begin{cases} 0,407T^{1,38}, & 0,15\text{МэВ} < T < 0,8\text{МэВ}, \\ 0,542T - 0,133, & 0,8\text{МэВ} < T < 3\text{МэВ}, \end{cases} \quad (2.6)$$

где  $T$  – кинетическая энергия электрона, МэВ.

Эту формулу можно использовать и для расчета среднего пробега электрона в других веществах, если потери энергии электрона в основном ионизационные.

Закон поглощения  $\beta$ -частиц, испускаемых радионуклидами, в веществе [2]

$$N = N_0 e^{-\mu d}, \quad (2.7)$$

где  $d$  – толщина слоя вещества;

$\mu$  – линейный коэффициент поглощения.

Массовый коэффициент поглощения [2]

$$\mu/\rho = 22T_{\beta \max}^{-4/3}, \text{ см}^2/\text{г}, \quad 0,5\text{МэВ} < T_{\beta \max} < 7\text{МэВ}. \quad (2.8)$$

где  $T_{\beta \max}$  – максимальная кинетическая энергия  $\beta$ -частицы, МэВ.

Максимальный пробег  $\beta$ -частиц в алюминии [4]

$$R_{\beta \max} = 0,543T_{\beta \max} - 0,163, \text{ Г/см}^2, \quad 0,7\text{МэВ} < T_{\beta \max} < 3\text{МэВ}. \quad (2.9)$$

или

$$R_{\beta \max} = 0,412T_{\beta \max}^n, \text{ Г/см}^2, \quad T_{\beta \max} < 2,5 \text{ МэВ}, \quad (2.10)$$

где  $n = 1,265 - 0,0954 \ln T_{\beta \max} (T_{\beta \max}, \text{МэВ})$ .

## 2.1 Примеры решения задач

2.1.1 Оценить удельные ионизационные потери энергии электрона в меди, если начальная энергия электрона составляет а)  $T = 20$  кэВ, б)  $T = 5$  МэВ.

*Решение.*

а) В этом случае кинетическая энергия много меньше энергии покоя электрона, поэтому для расчета воспользуемся формулой (2.1). Концентрацию атомов меди найдем, разделив плотность меди на массу одного атома

$$n = \frac{\rho}{m_a} = \frac{\rho}{Am_0},$$

где  $A$  – массовое число;

$m_0$  – атомная единица массы.

Так как в нерелятивистском случае  $T = m_e v^2 / 2$ , то формулу (2.1) можно записать в виде

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi e^4}{T} \frac{\rho}{Am_0} Z \ln \frac{T}{J}.$$

Подставим данные, получим

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi(4,8 \cdot 10^{-10})^4}{20 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} \frac{8,9 \cdot 29}{63 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} \ln \frac{20 \cdot 10^3}{13,5 \cdot 29} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ эрг/см} = 6,3 \text{ кэВ/мкм.}$$

б) В этом случае электрон является ультррелятивистским, поэтому воспользуемся формулой (2.2), в которую подставим выражение для концентрации атомов

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi e^4}{m_e c^2} \frac{\rho}{Am_0} Z \left( \ln \frac{T^2}{2\bar{J}^2 \sqrt{1-\beta^2}} + \frac{1}{8} \right).$$

Найдем скорость электрона при данной кинетической энергии. В релятивистском случае кинетическая энергия равна

$$T = m_e c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - 1 \right).$$

Выразим отсюда  $\sqrt{1-v^2/c^2}$

$$\sqrt{1-v^2/c^2} = \left( 1 + \frac{T}{m_e c^2} \right)^{-1}.$$

Подставив данные, получим

$$\sqrt{1-v^2/c^2} = \left( 1 + \frac{5}{0,511} \right)^{-1} = 0,093.$$

Окончательно для удельных ионизационных потерь найдем

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{\text{ион}} = \frac{2\pi(4,8 \cdot 10^{-10})^4}{511 \cdot 10^3 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12}} \frac{8,9 \cdot 29}{63 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} \left( \ln \frac{(5 \cdot 10^6)^2}{2 \cdot (13,5 \cdot 29)^2 \cdot 0,093} + \frac{1}{8} \right) = 2 \cdot 10^{-5} \text{ эрг/см} = 1,25 \text{ кэВ/мкм.}$$

2.1.2 Найти отношение радиационных потерь электрона в свинце и алюминии.

*Решение.*

Подставим в формулу (2.3) концентрацию атомов вещества, получим

$$-\left(\frac{dT}{dx}\right)_{рад} = \frac{\rho T Z^2 r_e^2}{137 A m_0} \left(4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9}\right),$$

где  $A$  – массовое число;

$\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>;

$m_0$  – атомная единица массы, г.

Отношение радиационных потерь имеет вид

$$\frac{-(dT/dx)_{рад, Pb}}{-(dT/dx)_{рад, Al}} = \frac{\rho_{Pb} Z_{Pb}^2 A_{Al}}{\rho_{Al} Z_{Al}^2 A_{Pb}} \frac{\left(4 \ln \frac{183}{Z_{Pb}^{1/3}} + \frac{2}{9}\right)}{\left(4 \ln \frac{183}{Z_{Al}^{1/3}} + \frac{2}{9}\right)}.$$

Подстановка значений величин приводит к следующему результату

$$\frac{-(dT/dx)_{рад, Pb}}{-(dT/dx)_{рад, Al}} = \frac{11,3 \cdot 82^2 \cdot 27}{2,7 \cdot 13^2 \cdot 207} \frac{\left(4 \ln \frac{183}{82^{1/3}} + \frac{2}{9}\right)}{\left(4 \ln \frac{183}{13^{1/3}} + \frac{2}{9}\right)} \approx 19.$$

2.1.3 При какой кинетической энергии электронов удельные радиационные потери равны удельным ионизационным потерям а) в кислороде при нормальных условиях, б) в кремнии, в) в меди?

*Решение.*

Согласно условию задачи отношение удельных радиационных потерь к удельным ионизационным потерям равно единице, тогда из формулы (2.4) получаем

$$T Z = 800.$$

Из этого соотношения находим энергию электронов

а)  $T = 800/8 = 100$  МэВ,

б)  $T = 800/14 = 57 \text{ МэВ}$ ,

в)  $T = 800/29 = 28 \text{ МэВ}$ .

2.1.4 При какой энергии электронов удельные радиационные потери в свинце составляют 1/3 всех потерь?

*Решение.*

Воспользуемся формулой (2.4), которую в соответствии с условием задачи запишем в виде

$$\frac{\frac{1}{3}[(dT/dx)_{рад} + (dT/dx)_{ион}]}{(dT/dx)_{ион}} = \frac{TZ}{800}.$$

В левой части равенства выполним почленное деление числителя дроби на знаменатель и вновь воспользуемся формулой (2.4), получим

$$\frac{1}{3} \left( 1 + \frac{TZ}{800} \right) = \frac{TZ}{800}.$$

Из полученного соотношения выразим энергию электрона

$$T = \frac{400}{Z} = \frac{400}{82} = 4,9 \text{ МэВ}.$$

2.1.5 Каковы полные удельные потери энергии электрона с кинетической энергией 25 МэВ в меди?

*Решение.*

Полные потери складываются из радиационных и ионизационных потерь

$$dT/dx = (dT/dx)_{рад} + (dT/dx)_{ион}.$$

Преобразуем это выражение

$$dT/dx = (dT/dx)_{рад} \left( 1 + \frac{(dT/dx)_{ион}}{(dT/dx)_{рад}} \right) = (dT/dx)_{рад} \left( 1 + \frac{800}{TZ} \right).$$

Радиационные потери вычислим по формуле (2.3), в которую подставим выражение для концентрации атомов вещества (смотри задачу 2.1.2)

$$-\left( \frac{dT}{dx} \right)_{рад} = \frac{8,9 \cdot 25 \cdot 29^2 \cdot (2,82 \cdot 10^{-13})^2}{137 \cdot 64 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}} \left( 4 \ln \frac{183}{29^{1/3}} + \frac{2}{9} \right) = 17 \text{ МэВ/см.}$$

Теперь рассчитаем полную потерю энергии

$$dT/dx = 17 \cdot \left( 1 + \frac{800}{25 \cdot 29} \right) = 36 \text{ МэВ/см.}$$

2.1.6 Найти зависимость радиационной длины  $l_{рад}$  от порядкового номера вещества  $Z$ . Вычислить  $l_{рад}$  для азота (при нормальных условиях), алюминия и свинца.

*Решение.*

Продифференцировав формулу (2.5), получим

$$-(\partial T/\partial x)_{рад} = T/l_{рад}.$$

Сравнивая с формулой (2.3), найдем

$$l_{рад} = \frac{137}{n Z^2 r_e^2} \left( 4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right)^{-1}.$$

Вычислим концентрацию атомов в азоте при нормальных условиях ( $T = 273\text{К}$ ,  $p = 10^5\text{Па}$ ), для этого сначала определим концентрацию молекул  $n_1$  азота по формуле  $n_1 = p/kT = 2,64 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Поскольку молекула азота двухатомная, то  $n = 2n_1 = 5,28 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Подставив в формулу для  $l_{рад}$ , найдем  $l_{рад} = 360 \text{ м}$ .

Концентрацию атомов в алюминии и свинце определим из формулы  $n = \rho/m_a$ , где  $\rho$  и  $m_a$  – плотность и масса атома вещества. Подставляя табличные

значения плотности и, вычисляя массу атома по формуле  $m_a = m_0 A$ , где  $A$  – массовое число,  $m_0$  – атомная единица массы, для концентрации атомов находим следующие значения  $n_{Al} = 5,98 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ,  $n_{Pb} = 3,26 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . И окончательно, для радиационной длины получаем  $(l_{рад})_{Al} = 9,8 \text{ см}$ ,  $(l_{рад})_{Pb} = 0,52 \text{ см}$ .

2.1.7 Пройдя слой некоторого вещества толщиной  $x = 5 \text{ мм}$ , быстрые электроны потеряли половину своей кинетической энергии. Определить радиационную длину для этого вещества, считая потери энергии в основном радиационными.

*Решение.*

Подставим в формулу (2.5) энергию электрона после прохождения слоя вещества  $T = T_0/2$  и выразим радиационную длину

$$l_{рад} = \frac{x}{\ln 2} = \frac{5}{0,693} = 7,2 \text{ мм}.$$

2.1.8 Кинетическая энергия электронов, прошедших свинцовую пластинку толщиной  $x = 0,5 \text{ см}$ , составляет 40 МэВ. Какова первоначальная кинетическая энергия электронов?

*Решение.*

Так как после прохождения пластинки кинетическая энергия электронов остается высокой, можно считать потери энергии в основном радиационными. Из формулы (2.5) выразим начальную кинетическую энергию электронов

$$T_0 = T e^{x/l_{рад}}.$$

Радиационная длина для свинца была рассчитана в задаче 2.1.6 и составляет  $l_{рад} = 0,52 \text{ см}$ . Тогда для начальной кинетической энергии получим

$$T_0 = 40 e^{0,5/0,52} = 105 \text{ МэВ}.$$



2.1.9 При торможении электронов достаточно больших энергий в поле ядра сечение испускания  $\gamma$ - квантов в интервале частот  $(\omega, \omega+d\omega)$  вблизи максимальной частоты тормозного излучения определяется формулой  $d\sigma = (1/nl_{rad})d\omega/\omega$ , где  $n$  – число ядер в единице объема. Найти вероятность того, что электрон потеряет свыше 90% своей первоначальной энергии при прохождении через цинковую пластинку толщиной  $l = 1,0$  мм.

*Решение.*

Вероятность испускания  $\gamma$ -квантов в интервале частот  $(\omega, \omega+d\omega)$  равна  $dw = nl d\sigma$ . Подставим выражение для  $d\sigma$  и умножим числитель и знаменатель на постоянную Планка  $\hbar$ , получим

$$dw = \frac{l}{l_{rad}} \frac{d(\hbar\omega)}{\hbar\omega}.$$

Согласно условию задачи,  $\gamma$ -кванты должны унести энергию, лежащую в пределах от 0,9 до 1 энергии электрона  $T$ . Отсюда вероятность того, что электрон потеряет свыше 90 % своей первоначальной энергии, определится как интеграл

$$w = \frac{l}{l_{rad}} \int_{0,9T}^T \frac{d(\hbar\omega)}{\hbar\omega} = \frac{l}{l_{rad}} \ln(\hbar\omega) \Big|_{0,9T}^T = \frac{l}{l_{rad}} \ln 1,111.$$

Вычислим радиационную длину по формуле, полученной в задаче 2.1.6.

$$l_{rad} = \frac{137 Am_0}{\rho Z^2 r_e^2} \left( 4 \ln \frac{183}{Z^{1/3}} + \frac{2}{9} \right)^{-1}.$$

Подставим в нее плотность, зарядовое и массовое числа для цинка, получим

$$l_{rad} = \frac{137 \cdot 65 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}}{7,1 \cdot 30^2 \cdot (2,82 \cdot 10^{-13})^2} \left( 4 \ln \frac{183}{30^{1/3}} + \frac{2}{9} \right)^{-1} = 1,76 \text{ см.}$$

Подставив числовые данные в формулу для вероятности, окончательно получаем

$$w = \frac{0,1}{1,76} \ln 1,111 = 5,98 \cdot 10^{-3}.$$

2.1.10 Средний пробег электронов в алюминии составляет  $R = 0,1$  г/см<sup>2</sup>. Определить по эмпирическим формулам кинетическую энергию этих электронов.

*Решение.*

По первой формуле (2.6) находим

$$T = \left( \frac{R}{0,407} \right)^{1/1,38} = \left( \frac{0,1}{0,407} \right)^{1/1,38} = 0,36 \text{ МэВ}.$$

2.1.11 Найти средний пробег релятивистских электронов с  $B\rho = 5,0$  кГс · см в графите.

*Решение.*

Чтобы определить средний пробег электронов по эмпирическим формулам, нужно знать их кинетическую энергию. В условии задачи дается произведение индукции магнитного поля на радиус окружности, которую описывает электрон, движущийся в этом поле, перпендикулярно линиям магнитной индукции. Для того чтобы определить кинетическую энергию электрона

$$T = m_e c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right),$$

необходимо найти его скорость из второго закона Ньютона, который в данной задаче записывается в виде  $ma_{y.c.} = F_l$ . Подставляя выражения для центростремительного ускорения, силы Лоренца и учитывая релятивистский эффект увеличения массы с ростом скорости электрона, получим

$$\frac{m_e v^2}{\rho \sqrt{1 - v^2/c^2}} = evB.$$

Выразим отсюда скорость

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{1 + v_0^2/c^2}}, \text{ где } v_0 = \frac{B\rho e}{m_e}.$$

Подставив числовые значения, определим  $v = 2,84 \cdot 10^8$  м/с и  $T = 1,07$  МэВ. Поскольку радиационные потери преобладают при энергиях много больших  $m_e c^2 = 0,511$  МэВ, в нашем случае можно считать, что потери в основном ионизационные и использовать вторую формулу (2.6).

$$R = 0,542 \cdot 1,07 - 0,133 = 0,45 \text{ г/см}^2.$$

Разделив полученное значение на плотность графита  $\rho = 1,6$  г/см<sup>3</sup>, выразим пробег в обычных единицах длины  $R = 2,8$  мм.

2.1.12 На алюминиевую фольгу толщиной  $d = 0,1$  г/см<sup>2</sup> нормально падает пучок электронов с кинетической энергией  $T_0 = 500$  кэВ. Каков средний пробег в воздухе электронов, прошедших эту фольгу?

*Решение.*

Определим по первой формуле (2.6) средний пробег в алюминии электронов с данной кинетической энергией

$$R = 0,407 \cdot 0,5^{1,38} = 0,156 \text{ г/см}^2.$$

Так как пробеги, выраженные в массовых единицах, в алюминии и в воздухе приблизительно одинаковы, то пробег в воздухе составит

$$R_{\text{возд}} = R - d = 0,156 - 0,1 = 0,056 \text{ г/см}^2.$$

Выразим пробег в единицах длины, разделив полученное значение на плотность воздуха  $\rho = 1,29 \cdot 10^{-3}$  г/см<sup>3</sup>, получим  $R_{\text{возд}} = 43$  см.

2.1.13 При какой толщине препарата  $^{204}\text{Tl}$ , испускающего  $\beta$ -частицы с максимальной кинетической энергией  $T_{\beta \text{ max}} = 0,77$  МэВ, дальнейшее увеличение толщины

не приведет к повышению интенсивности потока  $\beta$ -частиц?

*Решение.*

Интенсивность не будет повышаться, если толщина препарата начнет превосходить максимальный пробег  $\beta$ -частиц в самом препарате. Будем считать максимальный пробег в препарате равным пробегу в алюминии и найдем его по эмпирической формуле (2.10)

$$n = 1,265 - 0,00954 \ln 0,77 = 1,29,$$

$$R_{\beta \max} = 0,412 \cdot 0,77^{1,29} = 0,29 \text{ г/см}^2.$$

Разделим полученное значение на плотность таллия  $\rho = 11,85 \text{ г/см}^3$ , найдем  $d = R_{\beta \max} / \rho = 0,024 \text{ см}$ .

2.1.14 Найти долю  $\beta$ -частиц, испускаемых радиоактивным препаратом  $^{32}\text{P}$ , которые поглощаются алюминиевым фильтром толщиной  $d = 0,02 \text{ г/см}^2$ . Максимальная кинетическая энергия  $\beta$ -частиц равна  $T_{\beta \max} = 1,71 \text{ МэВ}$ .

*Решение.*

Из формулы (2.7) выразим долю поглощенных электронов

$$\eta = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\mu d}.$$

Массовый коэффициент поглощения рассчитаем по формуле (2.8)

$$\mu/\rho = 22 \cdot 1,71^{-4/3} = 10,76 \text{ см}^2/\text{г}.$$

Окончательно для доли поглощенных электронов получим

$$\eta = 1 - e^{-10,76 \cdot 0,02} = 0,19.$$

2.1.15 Найти максимальную энергию  $\beta$ -частиц, испускаемых радиоактивным препаратом, если при увеличении толщины алюминиевого фильтра на  $\Delta d = 0,05 \text{ г/см}^2$  количество  $\beta$ -частиц, прошедших сквозь фильтр уменьшилось в 2 раза.

*Решение.*

При некоторой толщине фильтра количество прошедших частиц дается формулой (2.7)

$$N_1 = N_0 e^{-\mu d}.$$

При увеличении толщины фольги количество прошедших частиц будет равно

$$N_2 = N_0 e^{-\mu(d+\Delta d)}.$$

Так как по условию задачи  $N_1/N_2 = 2$ , то

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{e^{-\mu d}}{e^{-\mu(d+\Delta d)}} = e^{\mu \Delta d} = 2.$$

Выразим  $\Delta d$  в обычных единицах длины, разделив на плотность фильтра, и найдем массовый коэффициент поглощения

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\ln 2}{\Delta d} = \frac{0,693}{0,05} = 13,86 \text{ см}^2/\text{г}.$$

Теперь из формулы (2.8) выразим максимальную энергию  $\beta$ -частиц

$$T_{\beta \max} = \left( \frac{22}{\mu/\rho} \right)^{3/4} = \left( \frac{22}{13,86} \right)^{3/4} = 1,4 \text{ МэВ}.$$

## 2.2 Задачи для самостоятельного решения

2.2.1 Вычислить удельные радиационные потери энергии электрона с кинетической энергией 20 МэВ в алюминии.

*Ответ.*  $-(dT/dx)_{рад} = 2,0$  МэВ/см.

2.2.2 При какой кинетической энергии электронов удельные потери энергии на тормозное излучение равны удельным ионизационным потерям в а) азоте (при нормальных условиях), б) алюминии и в) свинце.

*Ответ.* а)  $T = 114$  МэВ, б)  $T = 62$  МэВ, в)  $T = 9,8$  МэВ.

2.2.3 Какую долю всех удельных потерь энергии электронов в алюминии составляют удельные радиационные потери, если начальная кинетическая энергия электронов равна  $T = 20$  МэВ?

*Ответ.*  $\eta = 0,25$ .

2.2.4 Какова начальная кинетическая энергия электрона, если полная потеря энергии на единице пути в алюминии составляет  $-dT/dx = 9$  МэВ/см?

*Ответ.*  $T = 26$  МэВ.

2.2.5 Радиационная длина для некоторого вещества составляет  $l_{рад} = 14$  мм. Какую часть кинетической энергии теряет электрон, проходя сквозь слой этого вещества толщиной  $l = 0,40$  см?

*Ответ.*  $\eta = 0,25$ .

2.2.6 Свинцовую пластинку какой толщины нужно поставить на пути электронов с кинетической энергией  $T_0 = 0,11$  ГэВ, чтобы после прохождения пластинки энергия электронов составляла  $T = 42$  МэВ?

*Ответ.*  $l = 5$  мм.

2.2.7 Электрон с кинетической энергией  $T_0 = 10$  ГэВ проходит через алюминиевую пластинку толщиной  $l = 1$  см. Считая потери энергии радиационными, определить на сколько уменьшается энергия электрона.

*Ответ.*  $\Delta T = 0,97$  ГэВ.

2.2.8 Найти по эмпирическим формулам средний пробег электронов с кинетической энергией  $T = 0,36$  МэВ в алюминии.

*Ответ.*  $R = 0,37$  мм.

2.2.9 Пучок электронов с кинетической энергией  $T = 0,50$  МэВ падает нормально на алюминиевую фольгу. Какова должна быть толщина фольги, чтобы средний

пробег электронов, прошедших эту фольгу, в воздухе составлял  $R = 106 \text{ мг/см}^2$  ?

*Ответ.*  $d = 50 \text{ мг/см}^2$ .

2.2.10 Минимальная массовая толщина  $\beta$ -активного препарата  $^{90}\text{Sr}$ , начиная с которой дальнейшее увеличение его толщины не повышает интенсивности потока  $\beta$ -частиц, испускаемых этим препаратом, составляет  $d = 0,170 \text{ г/см}^2$ . Определить максимальную энергию  $\beta$ -частиц.

*Ответ.*  $T_{\beta \text{ max}} = 0,535 \text{ МэВ}$ .

2.2.11 Радиоактивный источник испускает  $\beta$ -частицы с максимальной кинетической энергией  $T_{\beta \text{ max}} = 1,6 \text{ МэВ}$ . На сколько нужно увеличить толщину окошка счетчика Гейгера-Мюллера, чтобы скорость счета  $\beta$ -частиц уменьшилась в два раза?

*Ответ.*  $\Delta d = 60 \text{ мг/см}^2$ .

2.2.12 Найти толщину слоя половинного поглощения  $\beta$ -частиц, испускаемых радиоактивным препаратом  $^{32}\text{P}$ , для а) воздуха, б) алюминия и в) свинца. Максимальная энергия  $\beta$ -частиц равна  $T_{\beta \text{ max}} = 1,71 \text{ МэВ}$ .

*Ответ.* а)  $d_{1/2} = 50 \text{ см}$ , б)  $d_{1/2} = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ , в)  $d_{1/2} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ см}$ .

2.2.13 Параллельные потоки  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц проходят через алюминиевые экраны толщиной  $d = 1 \text{ мм}$ . Кинетическая энергия частиц каждого типа равна  $T_{\alpha} = T_{\beta \text{ max}} = 1,0 \text{ МэВ}$ , плотность их потоков  $J = 1000 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Оцените плотности потоков частиц за экраном.

*Ответ.*  $J_{\alpha} = 0$ ,  $J_{\beta} = 2,6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

2.2.14. Препарат  $^{32}\text{P}$  толщиной  $d_1 = 100 \text{ мг/см}^2$ , нанесенный на подложку из оргстекла, поднесли вплотную к окну торцового детектора. Толщина окна детектора  $d_2 = 10 \text{ мг/см}^2$ , его площадь больше площади препарата. Скорость счета препарата за вычетом фона составила  $n = 9200 \text{ имп/мин}$ . Определите активность  $^{32}\text{P}$ .

*Ответ.*  $A = 433 \text{ Бк}$ .

2.2.15 Максимальный пробег  $\beta$ -излучения равен  $R_{\beta \text{ max}} = 0,5 \text{ г/см}^2$ . При какой толщине поглотителя параллельный поток частиц будет ослаблен в 50 раз?

*Ответ.*  $d = 0,26 \text{ г/см}^2$ .

### 3 Взаимодействие рентгеновского и $\gamma$ -излучения с веществом

*Сечение фотоэффекта на K-оболочке [3]*

$$\sigma_{\phi} = 1,09 \cdot 10^{-16} Z^5 \left( \frac{13,61}{h\nu} \right)^{7/2}, \text{ см}^2, \quad h\nu \ll m_e c^2, \quad (3.1)$$

где  $h\nu$  – энергия гамма-кванта, эВ;

$Z$  – порядковый номер атома.

$$\sigma_{\phi} = 1,34 \cdot 10^{-33} \frac{Z^5}{h\nu}, \text{ см}^2, \quad h\nu \gg m_e c^2, \quad (3.2)$$

где  $h\nu$  – в МэВ.

*Сечение томсоновского рассеяния на электроне [3]*

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_e^2, \quad (3.3)$$

где  $r_e = e^2 / (m_e c^2)$  – классический радиус электрона.

*Сечение комптоновского рассеяния на электроне [3]*

$$\sigma_K = \frac{3}{4} \sigma_T \left\{ \frac{1+\alpha}{\alpha^2} \left[ \frac{2(1+\alpha)}{1+2\alpha} - \frac{1}{\alpha} \ln(1+2\alpha) \right] + \frac{1}{2\alpha} \ln(1+2\alpha) - \frac{1+3\alpha}{(1+2\alpha)^2} \right\}, \quad (3.4)$$

где  $\alpha = \frac{h\nu}{m_e c^2}$ .

*Сечение образования электронно-позитронных пар [3]*

$$\sigma_{\text{пар}} = \frac{Z^2 r_e^2}{137} \left[ \frac{28}{9} \ln(2\alpha) - \frac{218}{27} \right], \text{ см}^2, \quad 5 < \alpha < 50. \quad (3.5)$$

В ядерной физике для измерения сечения используется внесистемная единица – барн (б),  $1\text{б} = 10^{-24} \text{ см}^2$ .

*Закон уменьшения интенсивности моноэнергетичного узкого пучка  $\gamma$ -квантов в веществе [1]*



$$I = I_0 e^{-\mu d}, \quad \mu = \tau + \sigma, \quad (3.6)$$

где  $\mu$ ,  $\tau$  и  $\sigma$  – линейные коэффициенты ослабления, поглощения и рассеяния,  $\text{см}^{-1}$ ;  
 $d$  – толщина слоя вещества, см.

*Линейный коэффициент комptonовского (томсоновского) рассеяния [1]*

$$\sigma = nZ\sigma_{K(T)}, \quad (3.7)$$

где  $n$  – число атомов в  $1 \text{ см}^3$ ;

$Z$  – число электронов в атоме.

*Линейный коэффициент поглощения [1]*

$$\tau = n(\sigma_{\phi} + \sigma_{\text{нар}}). \quad (3.8)$$

Значения массовых коэффициентов ослабления и поглощения  $\gamma$ -излучения приведены в таблице А.5 Приложения А.

*Связь между линейными и атомными коэффициентами рассеяния и поглощения*

$$\sigma = n\sigma_a \quad \text{и} \quad \tau = n\tau_a, \quad (3.9)$$

где  $\sigma_a = Z\sigma_{K(T)}$  – атомный коэффициент рассеяния,  $\text{см}^2$ ;

$\tau_a = \sigma_{\phi} + \sigma_{\text{нар}}$  – атомный коэффициент поглощения,  $\text{см}^2$ .

Заметим, что атомные коэффициенты имеют размерность площади. Они еще называются *сечениями* рассеяния и поглощения  $\gamma$ -квантов, поскольку обозначают ту площадь, которую нужно приписать атому, чтобы объяснить его рассеивающую и поглощающую способность.

### 3.1 Примеры решения задач

3.1.1 Увеличение толщины свинцовой пластинки на  $\Delta d = 1 \text{ см}$  приводит к уменьшению интенсивности проходящего сквозь нее узкого моноэнергетического пучка  $\gamma$ -квантов в 4 раза. Определить энергию  $\gamma$ -квантов.

*Решение.*

При некоторой толщине пластинки закон уменьшения интенсивности пучка  $\gamma$ -квантов дается формулой (3.6)

$$I_1 = I_0 e^{-\mu d}.$$

После увеличения толщины закон запишется в виде

$$I_2 = I_0 e^{-\mu(d+\Delta d)}.$$

Разделим  $I_1$  на  $I_2$  и выразим из полученного отношения линейный коэффициент ослабления пучка

$$\mu = \frac{\ln(I_1/I_2)}{\Delta d} = \frac{\ln 4}{1} = 1,4 \text{ см}^{-1}.$$

Вычислим массовый коэффициент ослабления, разделив полученное значение на плотность свинца

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1,4}{11,3} = 0,12 \text{ см}^2/\text{г}.$$

По таблице А.5 найдем соответствующую этому значению энергию  $\gamma$ -кванта  $E_\gamma = 0,6 \text{ МэВ}$ .

3.1.2 Определить толщину алюминиевой пластинки, которая так же ослабляет узкий пучок рентгеновского излучения с энергией  $E = 0,4 \text{ МэВ}$ , как свинцовая пластинка толщиной  $d_{\text{Pb}} = 2 \text{ мм}$ .

*Решение.*

Согласно условию задачи приравняем кратности ослабления пучка  $I_0/I$ , выраженные из формулы (3.6) при прохождении свинцовой и алюминиевой пластинок

$$\exp(\mu_{\text{Pb}} d_{\text{Pb}}) = \exp(\mu_{\text{Al}} d_{\text{Al}}).$$

Из этого равенства находим

$$d_{\text{Al}} = \frac{\mu_{\text{Pb}} d_{\text{Pb}}}{\mu_{\text{Al}}}.$$

Из таблицы А.5 определим массовые коэффициенты ослабления  $(\mu/\rho)_{\text{Pb}} = 0,22 \text{ см}^2/\text{г}$  и  $(\mu/\rho)_{\text{Al}} = 0,0927 \text{ см}^2/\text{г}$ . Переведем их в линейные, умножив на соответствующие плотности, и вычислим искомую толщину

$$d_{\text{Al}} = \frac{0,22 \cdot 11,3 \cdot 0,2}{0,0927 \cdot 2,7} = 2 \text{ см}.$$

3.1.3 Дифференциальное сечение рассеяния кванта длинноволнового рентгеновского излучения на свободном электроном описывается формулой

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2} r_e^2 (1 + \cos^2 \theta),$$

где  $\theta$  – угол рассеяния квантов;

$r_e$  – классический радиус электрона.

Определить а) полное сечение рассеяния, б) относительное число фотонов, рассеянных под углами  $\theta < 60^\circ$ .

*Решение.*

а) Полное сечение рассеяния находится в результате интегрирования по телесному углу  $4\pi$  дифференциального сечения

$$\sigma = \int_{4\pi} \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega = \frac{1}{2} r_e^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi (1 + \cos^2 \theta) \sin \theta d\theta = -\pi r_e^2 \left( \cos \theta + \frac{\cos^3 \theta}{3} \right) \Big|_0^\pi = \frac{8}{3} \pi r_e^2,$$

что совпадает с формулой (3.3).

б) Относительное число фотонов, рассеянных в некоторый телесный угол, пропорционально отношению сечения рассеяния в этот угол к полному сечению рассеяния. Найдем сечение рассеяния в указанный интервал углов

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} r_e^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/3} (1 + \cos^2 \theta) \sin \theta d\theta = \frac{19}{24} \pi r_e^2.$$

Разделив на полное сечение, найдем относительное число фотонов

$$N_1/N = \sigma_1/\sigma \approx 0,3.$$

3.1.4 Вычислить массовый и линейный коэффициенты рассеяния низкоэнергетического рентгеновского излучения для неона и кислорода при нормальных условиях.

*Решение.*

Проходя через вещество, низкоэнергетические рентгеновские кванты испытывают упругое томсоновское рассеяние. Атомный коэффициент рассеяния равен произведению сечения томсоновского рассеяния (3.3) на количество электронов  $Z$  в атоме

$$\sigma_a = Z\sigma_T.$$

Согласно (3.9), линейный коэффициент рассеяния связан с атомным формулой

$$\sigma = n\sigma_a,$$

где  $n$  – концентрация атомов вещества.

Подставив в (3.3) значения констант, найдем  $\sigma_T = 6,65 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$ .

Концентрацию атомов неона вычислим по формуле

$$n = p/kT,$$

где  $p$  – давление газа;

$k$  – постоянная Больцмана;

$T$  – абсолютная температура.

Концентрация атомов кислорода будет в два раза больше, поскольку кислород – двухатомный газ. Подставляя числовые данные, получим

$$n(\text{Ne}) = 2,65 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3} \quad \text{и} \quad n(\text{O}_2) = 5,31 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

И для линейных коэффициентов рассеяния находим

$$\sigma(\text{Ne}) = 2,65 \cdot 10^{19} \cdot 10 \cdot 6,65 \cdot 10^{-25} = 1,76 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1},$$

$$\sigma(\text{O}_2) = 5,31 \cdot 10^{19} \cdot 8 \cdot 6,65 \cdot 10^{-25} = 2,82 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-1}.$$

Массовый коэффициент получается в результате деления линейного на плотность газа при нормальных условиях ( $\rho(\text{Ne}) = 8,8 \cdot 10^{-4} \text{ г/см}^3$  и  $\rho(\text{O}_2) = 1,41 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3$ ). Он для обоих газов одинаков и равен  $0,2 \text{ см}^2/\text{г}$ .

3.1.5 Вычислить атомный коэффициент поглощения рентгеновского излучения для железа, если массовый коэффициент поглощения равен  $\tau/\rho = 1,26 \text{ см}^2/\text{г}$ .

*Решение.*

Согласно формуле (3.9), линейный коэффициент поглощения связан с атомным соотношением

$$\tau = n \tau_a.$$

Чтобы получить массовый коэффициент поглощения нужно линейный коэффициент разделить на плотность среды. Выражая плотность среды через концентрацию атомов  $\rho = n A m_0$ , где  $A$  – массовое число атома среды,  $m_0$  – атомная единица массы, для массового коэффициента поглощения получим

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{n \tau_a}{\rho} = \frac{\tau_a}{A m_0}.$$

Выразим отсюда атомный коэффициент поглощения и, подставив данные, найдем

$$\tau_a = A m_0 \frac{\tau}{\rho} = 56 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot 1,26 = 1,17 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2.$$

3.1.6 Атомный коэффициент поглощения рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda$  определяется следующей формулой

$$\tau_a = C Z^4 \lambda^3,$$

где  $C$  – постоянная, одинаковая для всех веществ;

$Z$  – порядковый номер атома вещества.

Найти массовый коэффициент поглощения ванадия для рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda_1 = 100$  пм, если у алюминия  $(\tau/\rho)_{Al} = 40$  см<sup>2</sup>/г для  $\lambda_2 = 144$  пм.

*Решение.*

Согласно решению предыдущей задачи, для алюминия можем записать

$$\left(\frac{\tau}{\rho}\right)_{Al} = \frac{\tau_a(Al)}{m_a(Al)} = \frac{C Z_{Al}^4 \lambda_2^3}{m_a(Al)}.$$

Выразим отсюда постоянную  $C$  и подставим в массовый коэффициент поглощения для ванадия, получим

$$\left(\frac{\tau}{\rho}\right)_V = \frac{m_a(Al) Z_V^4 \lambda_1^3}{m_a(V) Z_{Al}^4 \lambda_2^3} \left(\frac{\tau}{\rho}\right)_{Al}.$$

Подставив числовые значения величин, найдем

$$\left(\frac{\tau}{\rho}\right)_V = \frac{27 \cdot 23^4 \cdot 100^3 \cdot 40}{51 \cdot 13^4 \cdot 144^3} = 69 \text{ см}^2/\text{г}.$$

3.1.7 В условиях предыдущей задачи найти отношение массовых коэффициентов поглощения рентгеновского излучения в костях и тканях человеческого тела, если известно, что веществом кости является  $Ca_3(PO_4)_2$ , а биологическая ткань состоит в основном из воды.

*Решение.*

Чтобы определить массовый коэффициент поглощения вещества, состоящего из молекул, нужно сложить атомные коэффициенты поглощения и разделить на массу молекулы. Так, для воды имеем

$$\left(\frac{\tau}{\rho}\right)_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{2\tau_a(\text{H}) + \tau_a(\text{O})}{m(\text{H}_2\text{O})},$$

для кости аналогично

$$\left(\frac{\tau}{\rho}\right)_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2} = \frac{3\tau_a(\text{Ca}) + 2\tau_a(\text{P}) + 8\tau_a(\text{O})}{m(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)}.$$

При вычислении отношения этих массовых коэффициентов постоянная  $C$ , входящая в атомный коэффициент поглощения, и длина волны сократятся, в итоге получится

$$\frac{(\tau/\rho)_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2}}{(\tau/\rho)_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{m(\text{H}_2\text{O})}{m(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)} \frac{3Z_{\text{Ca}}^4 + 2Z_{\text{P}}^4 + 8Z_{\text{O}}^4}{2Z_{\text{H}}^4 + Z_{\text{O}}^4}.$$

Подставим соответствующие значения, получим

$$\frac{(\tau/\rho)_{\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2}}{(\tau/\rho)_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{2 \cdot 1 + 16}{3 \cdot 40 + 2 \cdot 31 + 8 \cdot 16} \frac{3 \cdot 20^4 + 2 \cdot 15^4 + 8 \cdot 8^4}{2 \cdot 1^4 + 8^4} = 8,7.$$

3.1.8 Определить массовый коэффициент поглощения, если известно, что узкий моноэнергетический пучок  $\gamma$ -излучения при прохождении алюминиевой пластины толщиной  $d = 3$  см ослабляется в 1,65 раза.

*Решение.*

Из формулы (3.6) определим линейный коэффициент ослабления

$$\mu = \frac{\ln(I_0/I)}{d} = \frac{\ln 1,65}{3} = 0,167 \text{ см}^{-1}.$$

Разделим на плотность алюминия, получим массовый коэффициент ослабления  $(\mu/\rho) = 0,0619 \text{ см}^2/\text{г}$ . Из таблицы А.5 следует, что такой коэффициент ослабления соответствует энергии  $\gamma$ -квантов 1 МэВ.

3.1.9 Узкий пучок  $\gamma$ -излучения, содержащий кванты всех энергий в интервале 0,60 – 0,80 МэВ, падает нормально на алюминиевую пластинку толщиной  $l = 2,0$  см. Найти степень ослабления интенсивности пучка после прохождения пластинки, если в этом интервале коэффициент ослабления линейно зависит от энергии квантов и спектральная интенсивность падающего излучения не зависит от частоты.

*Решение.*

Поскольку спектральная интенсивность не зависит от частоты, число частиц в пучке, приходящееся на интервал энергии  $dE$ , имеет вид

$$dN = \frac{N}{E_2 - E_1} dE,$$

где  $N$  – общее число  $\gamma$ -квантов в пучке;

$E_2 - E_1$  – ширина энергетического интервала.

В указанном диапазоне энергий можно считать коэффициент ослабления линейно зависящим от энергии  $\mu = \text{const} \cdot E$ , поэтому формулу можно переписать

$$dN = \frac{N}{\mu_2 - \mu_1} d\mu.$$

Согласно (3.6) можно записать  $N = N_0 e^{-\mu l}$ , и закон ослабления будет выглядеть следующим образом

$$N = \frac{N_0}{\mu_2 - \mu_1} \int_{\mu_1}^{\mu_2} \exp(-\mu l) d\mu,$$

где  $l$  – толщина пластинки.

Выполняя интегрирование и подставляя значения линейных коэффициентов ослабления  $\mu_1 = 0,210 \text{ см}^{-1}$  и  $\mu_2 = 0,184 \text{ см}^{-1}$ , найденные в результате умножения значений из таблицы А.5 на плотность алюминия, получим

$$\frac{N}{N_0} = \frac{\exp(-\mu_2 l) - \exp(-\mu_1 l)}{(\mu_1 - \mu_2) l} = 0,67.$$



3.1.10 Узкий моноэнергетической пучок  $\gamma$ -квантов, проходя серебряную пластинку толщиной  $d = 2,5$  мм, ослабляется в 6 раз. Найти атомный коэффициент ослабления в серебре.

*Решение.*

Выразим из формулы (3.6) линейный коэффициент ослабления узкого пучка  $\gamma$ -квантов

$$\mu = \frac{\ln(I_0/I_1)}{d}.$$

Так как коэффициент ослабления складывается из коэффициентов рассеяния и поглощения, то учитывая формулы (3.9), можно записать  $\mu = n\mu_a$ , где  $\mu_a$  – атомный коэффициент ослабления. Концентрацию атомов серебра выразим через плотность серебра  $n = \rho/m_a$  и окончательно получим

$$\mu_a = \frac{m_a \ln(I_0/I_1)}{d\rho}.$$

Подстановка значений величин приводит к результату

$$\mu_a = \frac{108 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24} \cdot \ln 6}{0,25 \cdot 10,5} = 1,2 \cdot 10^{-22} \text{ см}^2 = 120 \text{ б.}$$

3.1.11 В некоторой среде слой половинного ослабления  $\gamma$ -квантов равен  $d_{1/2} = 5$  см. Найти среднюю длину свободного пробега этих квантов.

*Решение.*

Так как слой половинного ослабления снижает интенсивность  $\gamma$ -излучения в два раза, из формулы (3.6) можно найти линейный коэффициент ослабления

$$\mu = \frac{\ln 2}{d_{1/2}} = \frac{0,693}{5} = 0,14 \text{ см}^{-1}.$$

Средняя длина свободного пробега есть величина обратная линейному коэффициенту ослабления

$$\bar{l} = \frac{1}{\mu} = \frac{1}{0,14} = 7,1 \text{ см.}$$

3.1.12 Найти с помощью графиков на рисунке 3.1 средние пробеги  $\gamma$ -квантов с энергией 2 МэВ в свинце для фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электронно-позитронных пар. Как связаны эти пробеги со средней длиной свободного пробега?

*Решение.*

Из рисунка 3.1 видно, что сечения взаимодействия  $\gamma$ -квантов с атомами свинца равны  $\sigma_{\phi} = 2$  б для фотоэффекта,  $\sigma_{\text{комп}} = 12,5$  б для комптоновского рассеяния и  $\sigma_{\text{пар}} = 1,75$  б. Пользуясь формулами (3.7) и (3.8), найдем соответствующие линейные коэффициенты

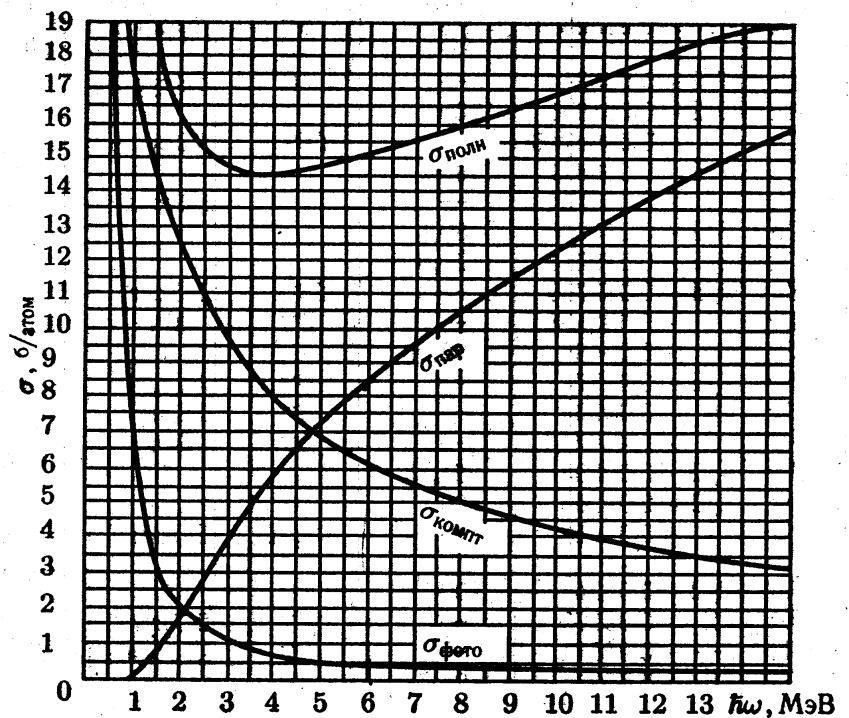


Рисунок 3.1 – Сечения взаимодействия  $\gamma$ -квантов в свинце [2]

$$\tau_{\phi} = n\sigma_{\phi},$$

$$\sigma = n\sigma_{\text{комп}},$$

$$\tau_{\text{пар}} = n\sigma_{\text{пар}}.$$

Концентрация атомов находится по формуле

$$n = \frac{\rho}{m_0 A},$$

где  $\rho$  – плотность свинца;

$m_0$  – атомная единица массы;

$A$  – массовое число.

Вычисление дает  $n = 3,3 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ .

Средние пробеги – это величины, обратные линейным коэффициентам рассеяния и поглощения

$$\bar{l}_\phi = 1/(n\sigma_\phi),$$

$$\bar{l}_{\text{комн}} = 1/(n\sigma_{\text{комн}}),$$

$$\bar{l}_{\text{нар}} = 1/(n\sigma_{\text{нар}}).$$

Выполним вычисления, получим

$$\bar{l}_\phi = 1/(3,3 \cdot 10^{22} \cdot 2 \cdot 10^{-24}) = 15 \text{ см},$$

$$\bar{l}_{\text{комн}} = 1/(3,3 \cdot 10^{22} \cdot 12,5 \cdot 10^{-24}) = 2,4 \text{ см},$$

$$\bar{l}_{\text{нар}} = 1/(3,3 \cdot 10^{22} \cdot 1,75 \cdot 10^{-24}) = 17,3 \text{ см}.$$

Так как полный линейный коэффициент ослабления складывается из линейных коэффициентов поглощения и рассеяния, то для средней длины пробега имеем

$$\bar{l}^{-1} = \bar{l}_\phi^{-1} + \bar{l}_{\text{комн}}^{-1} + \bar{l}_{\text{нар}}^{-1}.$$

Подставим найденные пробеги, получим  $\bar{l} = 1,85 \text{ см}$ .

3.1.13 Найти с помощью графиков на рисунке 3.1 вероятность фотопоглощения  $\gamma$ - кванта с энергией 2,0 МэВ в свинцовой пластинке толщиной 2,0 мм.

*Решение.*

Закон ослабления интенсивности узкого пучка  $\gamma$ -квантов (3.6) определяет долю прошедших через пластинку частиц

$$N/N_0 = \exp(-\mu d),$$

где  $N$  – число прошедших частиц;

$N_0$  – число частиц на входе в пластинку;

$\mu = n\sigma_{\text{полн}}$  – линейный коэффициент ослабления;

$n$  – концентрация атомов свинца.

Полное сечение взаимодействия  $\gamma$ -кванта с энергией 2 МэВ с атомом свинца  $\sigma_{\text{полн}} = 16,25$  б находится по графику (3.1). Концентрация атомов свинца найдена в предыдущей задаче  $n = 3,30 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . И для линейного коэффициента ослабления получаем  $\mu = n \cdot \sigma_{\text{полн}} = 0,53 \text{ см}^{-1}$ . Заметим, что этот коэффициент можно найти, воспользовавшись данными таблицы А.5.

Доля провзаимодействовавших в пластинке  $\gamma$ -квантов определяется формулой

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - \exp(-\mu d).$$

Чтобы найти вероятность фотопоглощения, необходимо умножить это выражение на отношение сечения фотопоглощения к полному сечению  $\sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{полн}}$

$$w_{\text{ф}} = (1 - \exp(-\mu d)) \sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{полн}}.$$

Найдя из графика 3.1  $\sigma_{\text{ф}} = 2$  б, и подставив численные значения остальных величин, получим вероятность фотопоглощения  $w_{\text{ф}} = 0,012$ .

3.1.14 Сечение комптоновского рассеяния  $\gamma$ -кванта на свободном электроном описывается формулой (3.4). Упростить эту формулу в предельных случаях  $\alpha \ll 1$  и  $\alpha \gg 1$ .

*Решение.*

Рассмотрим случай  $\alpha \ll 1$ . Разложим натуральный логарифм в ряд

$$\ln(1 + 2\alpha) \approx 2\alpha - 2\alpha^2 + \frac{8}{3}\alpha^3 - 4\alpha^4 + \frac{32}{5}\alpha^5.$$

Тогда слагаемое в фигурных скобках, содержащее логарифм преобразуется к виду

$$\frac{\alpha^2 - 2\alpha - 2}{2\alpha^3} \ln(1 + 2\alpha) \approx -\frac{2}{\alpha^2} + \frac{1}{3} + \frac{\alpha}{3} - \frac{16\alpha^2}{15}.$$

Теперь разложим в ряд  $(1+2\alpha)^{-2}$

$$(1 + 2\alpha)^{-2} \approx 1 - 4\alpha + 12\alpha^2 - 32\alpha^3.$$

Тогда слагаемое, не содержащее логарифм, преобразуется к виду

$$\frac{\alpha^3 + 9\alpha^2 + 8\alpha + 2}{\alpha^2(1 + 2\alpha)^2} \approx \frac{2}{\alpha^2} + 1 - 3\alpha + 8\alpha^2.$$

И выражение для сечения комптоновского рассеяния упрощается

$$\sigma_K \approx \frac{3}{4} \sigma_T \left\{ \frac{4}{3} - \frac{8}{3} \alpha + \frac{104}{15} \alpha^2 \right\} = \sigma_T \left\{ 1 - 2\alpha + \frac{26}{5} \alpha^2 \right\}.$$

Если  $\alpha \gg 1$ , то в сумме  $(1+2\alpha)$  пренебрежем 1 по сравнению с  $2\alpha$  и выражение (3.4) перепишем в следующем виде

$$\sigma_K = \frac{3}{4\alpha} \sigma_T \left\{ \left( \frac{1}{2} - \frac{1}{\alpha} - \frac{1}{\alpha^2} \right) \ln(2\alpha) + \left( \frac{1}{4} + \frac{9}{4\alpha} + \frac{2}{\alpha^2} + \frac{1}{\alpha^3} \right) \right\}.$$

Теперь пренебрежем в круглых скобках слагаемыми, содержащими  $\alpha$  в знаменателе, получим

$$\sigma_K = \frac{3}{8\alpha} \sigma_T \left\{ \ln(2\alpha) + \frac{1}{2} \right\}.$$

3.1.15 Показать, что образование пары электрон+позитрон в пустом пространстве невозможно.

*Решение.*

Предположим, что образование пары электрон-позитрон наблюдается в пустоте, тогда в соответствии с законами сохранения энергии и импульса должны выполняться два равенства

$$E_\gamma = \frac{m_{e^-}c^2}{\sqrt{1-\beta_{e^-}^2}} + \frac{m_{e^+}c^2}{\sqrt{1-\beta_{e^+}^2}};$$

$$\mathbf{p}_\gamma = \mathbf{p}_{e^-} + \mathbf{p}_{e^+}.$$

Используя закон сохранения энергии и связь между импульсом и энергией  $\gamma$ -кванта, можно получить

$$|\mathbf{p}_\gamma| = \frac{E_\gamma}{c} = \frac{m_{e^-}c}{\sqrt{1-\beta_{e^-}^2}} + \frac{m_{e^+}c}{\sqrt{1-\beta_{e^+}^2}} > \frac{m_{e^-}\beta_{e^-}c}{\sqrt{1-\beta_{e^-}^2}} + \frac{m_{e^+}\beta_{e^+}c}{\sqrt{1-\beta_{e^+}^2}} = |\mathbf{p}_{e^-}| + |\mathbf{p}_{e^+}|.$$

Но это невозможно, так как векторы  $\mathbf{p}_\gamma$ ,  $\mathbf{p}_{e^-}$  и  $\mathbf{p}_{e^+}$  в соответствии с законом сохранения импульса образуют треугольник.

3.1.16 Получить выражение пороговой энергии гамма-кванта для образования пары в поле ядра массой  $M$ .

*Решение.*

Воспользуемся инвариантностью величины

$$E^2 - p^2c^2 = inv,$$

где  $E$  и  $p$  – полная энергия и суммарный импульс взаимодействующих частиц. Запишем эту величину в лабораторной системе координат до взаимодействия и в системе центра инерции после взаимодействия и полученные результаты приравняем

$$\left(E_{\gamma_{nop}} + Mc^2\right)^2 - \left(\frac{E_{\gamma_{nop}}}{c}\right)^2 c^2 = (M + 2m_e)^2 c^4.$$

Построение левой части равенства очевидно. Что касается правой, то в ней нет импульса системы, потому что в системе центра инерции он равен нулю, и нет кинетической энергии частиц, так как рассматривается процесс образования пар на пороге, когда образующиеся частицы покоятся. Решив записанное уравнение относительно  $E_{\gamma_{пор}}$ , получим

$$E_{\gamma_{пор}} = 2m_e c^2 (1 + m_e / M).$$

3.1.17 Определить толщину свинцовой пластинки, для которой вероятность образования электронно-позитронной пары  $\gamma$ -квантом с энергией  $E_\gamma = 7$  МэВ составляет  $w_{пар} = 0,1$ .

*Решение.*

Вероятность образования электронно-позитронной пары равна произведению доли провазимодействовавших в пластинке  $\gamma$ -квантов  $1 - \exp(-\mu d)$  на отношение сечения образования электронно-позитронной пары к полному сечению  $\sigma_\phi / \sigma_{полн}$

$$w_{пар} = (1 - \exp(-\mu d)) \sigma_{пар} / \sigma_{полн}.$$

Выразим отсюда толщину пластинки

$$d = \frac{1}{\mu} \ln \left( 1 - w_{пар} \frac{\sigma_{полн}}{\sigma_{пар}} \right)^{-1}.$$

Из графиков на рисунке 3.1 следует, что  $\sigma_{пар} = 9,5$  б и  $\sigma_{полн} = 15,5$  б. Линейный коэффициент ослабления можно найти, умножив полное сечение на концентрацию атомов свинца  $n = 3,30 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ . В результате получим  $\mu = 0,51 \text{ см}^{-1}$ .

Вычислим толщину пластинки

$$d = \frac{1}{0,51} \ln \left( 1 - \frac{0,1 \cdot 15,5}{9,5} \right)^{-1} = 0,35 \text{ см}.$$

3.1.18 При облучении тонкой свинцовой пластинки в камере Вильсона  $\gamma$ -квантами с энергией  $E_\gamma = 3$  МэВ было обнаружено, что электронных треков в  $\eta = 3,7$  раза больше, чем позитронных. Чему равно отношение вероятности образования электронно-позитронной пары к суммарной вероятности других процессов взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом?

*Решение.*

Электроны возникают в результате всех трех процессов взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом: фотоэффекта, комптоновского рассеяния и образования электронно-позитронных пар. Позитроны возникают только в процессе рождения электронно-позитронной пары. Таким образом, количество электронных треков равно

$$N_{эл} = N_\phi + N_K + N_{нар},$$

А количество позитронных треков

$$N_{поз} = N_{нар}.$$

Из отношения

$$\eta = \frac{N_\phi + N_K + N_{нар}}{N_{нар}}$$

определим количество треков, возникающих в процессах комптоновского рассеяния и фотоэффекта

$$N_\phi + N_K = N_{нар}(\eta - 1).$$



Тогда отношение вероятности образования электронно-позитронной пары к суммарной вероятности других процессов взаимодействия  $\gamma$ -квантов с веществом будет равно

$$\frac{w_{нар}}{w_{\phi} + w_K} = \frac{N_{нар}}{N_{\phi} + N_K} = \frac{N_{нар}}{N_{нар}(\eta - 1)} = \frac{1}{(\eta - 1)} = 0,37.$$

3.1.19 В свинцовой пластинке, толщина которой равна слою половинного ослабления  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_{\gamma} = 8$  МэВ, определить вероятность образования электронно-позитронной пары.

*Решение.*

Следуя решению задачи 3.1.13, запишем вероятность образования электронно-позитронной пары

$$w_{нар} = \left(1 - e^{-\mu d_{1/2}}\right) \frac{\sigma_{нар}}{\sigma_{полн}}.$$

В слое половинного ослабления число провзаимодействовавших с атомами среды  $\gamma$ -квантов равно половине от начального числа квантов. Поэтому доля квантов, выбывших из пучка, будет равна  $\left(1 - e^{-\mu d_{1/2}}\right) = 1/2$ . Из графиков на рисунке 3.1 найдем  $\sigma_{нар} = 10,5$  б и  $\sigma_{полн} = 16$  б. И для вероятности образования электронно-позитронной пары получим

$$w_{нар} = \frac{10,5}{2 \cdot 16} = 0,33.$$

3.1.20 Вычислить энергию  $\gamma$ -кванта, образовавшего в поле покоящегося тяжелого ядра пару электрон – позитрон, если известно, что для каждой частицы пары  $B\rho = 3,0$  кГс·см.

*Решение.*

Используя второй закон Ньютона (задача 2.1.11), запишем

$$\frac{mv^2}{\rho\sqrt{1 - v^2/c^2}} = evB,$$

откуда определим импульсы образовавшихся частиц

$$p = eB\rho = 4,74 \cdot 10^{-22} \text{ кг}\cdot\text{м/с}.$$

Тогда энергия  $\gamma$ - кванта найдется по формуле

$$E_\gamma = 2\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} = 3,28 \cdot 10^{-13} \text{ Дж} = 2,1 \text{ МэВ}.$$

### 3.2 Задачи для самостоятельного решения

3.2.1 Вычислить сечения фотоэффекта, комптоновского рассеяния и рождения электронно-позитронных пар при прохождении  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma = 5 \text{ МэВ}$  через алюминий.

*Ответ.*  $\sigma_\phi = 0,1 \text{ мб}$ ;  $\sigma_K = 88,6 \text{ мб}$ ;  $\sigma_{\text{нар}} = 0,116 \text{ б}$ .

3.2.2 Во сколько раз отличаются степени ослабления узких пучков рентгеновских квантов с энергиями  $E_1 = 0,2 \text{ МэВ}$  и  $E_2 = 0,4 \text{ МэВ}$  при прохождении свинцовой пластинки толщиной  $d = 0,17 \text{ см}$ .

*Ответ.* В 4 раза.

3.2.3 Найти толщину слоя половинного ослабления узкого пучка рентгеновского излучения с длиной волны  $\lambda = 6,2 \text{ пм}$  для свинца, воды и воздуха.

*Ответ.*  $(d_{1/2})_{\text{Pb}} = 6,5 \cdot 10^{-2} \text{ см}$ ;  $(d_{1/2})_{\text{H}_2\text{O}} = 5,1 \text{ см}$ ;  $(d_{1/2})_{\text{возд}} = 4,4 \cdot 10^3 \text{ см}$ .

3.2.4 Во сколько раз ослабляется узкий пучок рентгеновского излучения в пластинке, толщина которой равна десяти слоям половинного ослабления  $d = 10d_{1/2}$ ?

*Ответ.* В 1000 раз.

3.2.5 Какая доля  $\gamma$ -излучения не пройдет через свинцовую пластинку толщиной  $d = 1 \text{ см}$ , если линейный коэффициент ослабления равен  $\mu = 0,5 \text{ см}^{-1}$ ?

*Ответ.*  $(I_0 - I)/I_0 = 0,4$ .

3.2.6 В результате комптоновского рассеяния  $\gamma$ -кванта с энергией  $E_\gamma = 10 \text{ МэВ}$  его длина волны увеличилась в 2 раза. Найти кинетическую энергию электрона отдачи.

*Ответ.*  $T_e = 5 \text{ МэВ}$ .

3.2.7 После прохождения свинцовой пластинки интенсивности пучков  $\gamma$ -квантов с энергиями  $E_{\gamma,1} = 0,4$  МэВ и  $E_{\gamma,2} = 0,6$  МэВ отличаются в 4,7 раза. Определить толщину пластинки.

*Ответ.*  $d = 1$  см.

3.2.8 Найти сечение взаимодействия  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_{\gamma} = 1$  МэВ с атомами алюминия.

*Ответ.*  $\sigma_{\text{полн}} = 2,75$  б.

3.2.9 Определить среднюю длину свободного пробега  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_{\gamma} = 4$  МэВ в свинце.

*Ответ.*  $\bar{l} = 2,1$  см.

3.2.10 При каких энергиях  $\gamma$ -квантов отношение сечений фотоэффекта и комптоновского рассеяния в воде много меньше единицы ( $\sigma_{\text{ф}}/\sigma_{\text{К}} \leq 10^{-4}$ )? *Указание.* Пренебречь вкладом водорода в сечение фотоэффекта для воды.

*Ответ.*  $E_{\gamma} \geq 5$  МэВ.

3.2.11 Свинцовая пластинка толщиной  $d = 3,4$  см ослабляет узкий пучок моноэнергетических  $\gamma$ -квантов в 6 раз. Каков массовый коэффициент комптоновского рассеяния такого  $\gamma$ -излучения в свинце?

*Ответ.*  $(\mu/\rho)_{\text{Рб}} = 0,022$  см<sup>2</sup>/г или  $0,015$  см<sup>2</sup>/г.

3.2.12 Определить линейный коэффициент комптоновского рассеяния  $\gamma$ -квантов, у которых  $\alpha = h\nu/(m_e c^2) = 3$ , для бериллия.

*Ответ.*  $\sigma = 0,084$  см<sup>-1</sup>.

3.2.13 Определить пороговую энергию  $\gamma$ -кванта для образования электронно-позитронной пары в поле электрона.

*Ответ.*  $E_{\gamma, \text{пор}} = 4 m_e c^2$ .

3.2.14 Определить кинетические энергии электрона и позитрона, которые образуются в поле тяжелого ядра  $\gamma$ -квантом с энергией  $E_{\gamma} = 10$  МэВ.

*Ответ.*  $T_{\text{эл}} = T_{\text{поз}} = 4,5$  МэВ.

3.2.15 Сколько слоев половинного ослабления содержится в пластинке, для которой вероятность образования электронно-позитронной пары  $\gamma$ -квантом с энергией  $E_\gamma = 6$  МэВ составляет  $w_{нар} = 0,28$ ?

*Ответ.* Один слой половинного ослабления.

3.2.16 Энергия  $\gamma$ -излучения и максимальная кинетическая энергия  $\beta$ -частиц одинаковы и равны  $E_\gamma = T_{\beta \max} = 300$  кэВ. Какая доля  $\gamma$ - и  $\beta$ -излучения задержится алюминиевым экраном, толщина которого равна 3 слоям половинного ослабления  $\beta$ -излучения?

*Ответ.*  $\eta_\beta = 0,875$ ,  $\eta_\gamma = 0,002$ .

3.2.17 Массовые коэффициенты ослабления  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучения одинаковы и равны  $\mu/\rho = 4$  см<sup>2</sup>/г. Доля  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов, прошедших через слой поглотителя, равна  $\eta_{\beta(\gamma)} = 0,25$ . Определить толщину поглотителя.

*Ответ.*  $d = 347$  мг/см<sup>2</sup>.

3.2.18 Какая доля потока  $\beta$ -частиц и  $\gamma$ -квантов, испускаемых  $^{40}\text{K}$ , поглощается алюминиевыми пластинками толщиной  $d_1 = 270$  мг/см<sup>2</sup> и  $d_2 = 810$  мг/см<sup>2</sup>? Схема распада  $^{40}\text{K}$  изображена на рисунке 3.2. Максимальная кинетическая энергия  $\beta$ -частиц равна  $T_{\beta \max} = 1,314$  МэВ.

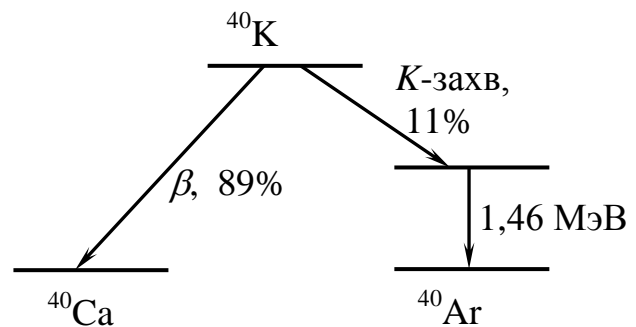


Рисунок 3.2 – Схема распада  $^{40}\text{K}$

*Ответ.*  $\eta_{\beta 1} = 0,93$  и  $\eta_{\beta 2} = 1$ ;  $\eta_{\gamma 1} = 0,013$  и  $\eta_{\gamma 2} = 0,039$ .

3.2.19 Какая доля узкого потока  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_\gamma = 0,145$  МэВ, испускаемых источником  $^{141}\text{Ce}$ , не пройдет через свинцовый экран толщиной  $d = 1,05$  г/см<sup>2</sup>?

*Ответ.*  $\eta = 0,898$ .

3.2.20 Толщина слоя половинного ослабления  $\gamma$ -излучения с энергией  $E_\gamma = 0,661$  МэВ, испускаемого источником  $^{137}\text{Cs}$ , в монокристалле NaI равна  $d_{1/2} = 2,5$  см. Какая доля потока  $\gamma$ -квантов будет задерживаться монокристаллом NaI размером  $40 \times 40 \times 40$  мм?

*Ответ.*  $\eta = 0,67$ .

## 4 Основы дозиметрии

*Активность радионуклида* – число распадов в единицу времени [1]

$$A = \frac{dN}{dt} . \quad (4.1)$$

Единицей активности в СИ является беккерель (1Бк=1распад/1с). Наиболее распространенной внесистемной международной единицей является кюри (1Ки =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Бк).

*Плотность потока частиц* – число частиц излучения, проходящих через единицу площади поверхности в единицу времени [5]

$$J = \frac{dN}{Sdt} . \quad (4.2)$$

*Интенсивность излучения* (плотность потока энергии) – энергия, переносимая излучением через единицу площади поверхности в единицу времени [5]

$$I = E_0 J , \quad (4.3)$$

где  $E_0$  – энергия моноэнергетического излучения.

В СИ интенсивность измеряется в Дж/(м<sup>2</sup>·с).

*Экспозиционная доза  $D_{эксн}$*  – суммарный заряд всех ионов одного знака, образующихся в единице массы воздуха при облучении рентгеновским или  $\gamma$ -излучением [5]

$$D_{эксн} = dQ/dm . \quad (4.4)$$

В СИ единицей измерения экспозиционной дозы служит кулон на килограмм (Кл/кг). Внесистемной единицей экспозиционной дозы является рентген (Р). 1 Р равен 1 единице СГСЭ заряда, образующегося в 1 см<sup>3</sup> воздуха при нормальных условиях (1Р =  $2,58 \cdot 10^{-4}$  Кл/кг).

*Поглощенная доза*  $D_{\text{погл}}$  – энергия, поглощенная единицей массы облученного вещества [5]

$$D_{\text{погл}} = dE/dm. \quad (4.5)$$

В СИ поглощенная доза измеряется в греях ( $1\text{Гр} = 1\text{Дж}/1\text{кг}$ ). Внесистемной единицей является рад ( $1\text{рад} = 0,01\text{Гр}$ ).

*Связь между экспозиционной и поглощенной дозами:* 1Кл/кг эквивалентен поглощенной энергии 34 Дж на 1 кг воздуха [2]

$$D_{\text{погл}} = \alpha D_{\text{эксн}}, \quad (4.6)$$

где  $\alpha \approx 34 \text{ Дж}/\text{Кл}$ .

*Эквивалентная доза излучения*  $D_{\text{экв}}$  – произведение поглощенной дозы на коэффициент качества  $K$ , характеризующий относительную биологическую эффективность излучения [5]

$$D_{\text{экв}} = KD_{\text{погл}}. \quad (4.7)$$

Значения коэффициентов качества приведены в таблице А.4 Приложения А.

В системе СИ эквивалентная доза излучения измеряется в зивертах ( $1\text{Зв}=1\text{Дж}/1\text{кг}$ ). Внесистемной единицей эквивалентной дозы является бэр (биологический эквивалент рентгена  $1\text{бэр}=0,01 \text{Зв}$ ). Доза в 1 бэр соответствует такому облучению живого организма данным видом излучения, при котором наблюдается тот же биологический эффект, что и при экспозиционной дозе рентгеновского или гамма-излучения в 1 рентген.

*Эффективная доза* – равна сумме произведений взвешивающих коэффициентов  $W_T$  для органов или тканей на эквивалентные дозы  $D_{\text{экв}T}$ , полученные этими органами или тканями [5]

$$D_{\text{эфф}} = \sum_T W_T D_{\text{экв}T}. \quad (4.8)$$

Взвешивающий коэффициент  $W_T$  примерно равен отношению эквивалентной дозы равномерного облучения всего тела к эквивалентной дозе облучения органа, при которых ожидается один и тот же ущерб.

*Мощность дозы  $P$*  – изменение дозы за единицу времени [3]

$$P = \frac{dD}{dt}. \quad (4.9)$$

#### 4.1 Примеры решения задач

4.1.1 На тонкую пластинку падает нормально плоскопараллельный пучок частиц с плотностью потока  $J_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Считая, что все частицы рассеиваются на угол  $30^\circ$ , определить плотность потока частиц за пластинкой.

*Решение.*

Согласно определению, плотность потока падающих частиц равна

$$J_0 = \frac{N}{S_0 t}.$$

Из рисунка 4.1 видно, что поперечное сечение рассеянного пучка можно выразить через поперечное сечение падающего  $S = S_0 \cos \varphi$ . Тогда плотность потока рассеянных частиц равна

$$J = \frac{N}{S t} = \frac{N}{S_0 \cos \varphi t} = \frac{J_0}{\cos \varphi}.$$

Подставим данные, получим

$$J = \frac{5 \cdot 10^4}{\cos 30^\circ} = 5,77 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}.$$

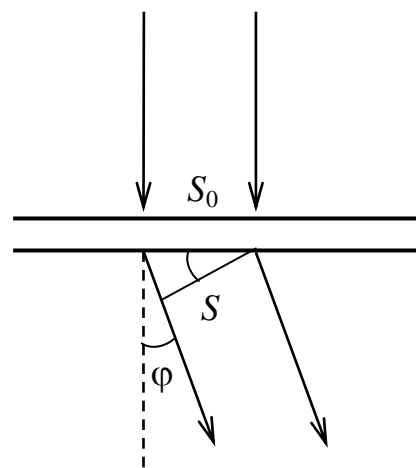


Рисунок 4.1 – Геометрия задачи



4.1.2 Вычислить интенсивность излучения на расстоянии  $r = 1\text{ м}$  от точечного изотропного источника  $\gamma$ -квантов в вакууме. Источник излучает  $N = 10^7$  квантов за время  $t = 1\text{ с}$ . Энергия квантов равномерно распределена в диапазоне от  $E_{\min} = 0,1$  до  $E_{\max} = 1\text{ МэВ}$ .

*Решение.*

Сначала определим из условия нормировки

$$\int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n(E) dE = 1$$

постоянную  $C$  равномерного энергетического распределения  $n(E) = C$

$$C = \left( \int_{0,1}^1 dE \right)^{-1} = 1,11\text{ МэВ}^{-1}.$$

Число фотонов с энергией в пределах от  $E$  до  $E + dE$  определяется формулой

$$dN = N n(E) dE.$$

Поскольку  $\gamma$ -кванты испускаются равновероятно по всем направлениям, число квантов, пришедших в данную точку на расстоянии  $r$  от источника, обратно пропорционально площади сферы с центром в источнике и радиусом  $r$ . Поэтому интенсивность излучения запишется в виде

$$I = \frac{N}{4\pi r^2 t} \int_{E_{\min}}^{E_{\max}} n(E) E dE = \frac{N C}{8\pi r^2 t} (E_{\max}^2 - E_{\min}^2).$$

Подставим значения величин из условия задачи, получим

$$I = \frac{10^7 \cdot 1,11 \cdot (1^2 - 0,1^2)}{8\pi \cdot 1^2 \cdot 1} = 4,4 \cdot 10^5 \text{ МэВ}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

4.1.3 Поверхность сферы радиусом  $R$  равномерно покрыта изотропным поверхностным источником, испускающим с единицы площади в единицу времени  $J_0$  частиц. Найти плотность потока частиц в центре сферы, считая среду внутри сферы непоглощающей.

*Решение.*

С элемента  $dS$  поверхности сферы в единицу времени испускается по всем направлениям  $J_0 dS$  частиц. Плотность потока частиц, приходящих в центр сферы будет равна

$$dJ = \frac{J_0 dS}{4\pi R^2}.$$

Тогда плотность потока частиц, испущенных со всей поверхности и попадающих в центр, определяется интегралом

$$J = \frac{J_0}{4\pi R^2} \int_{S_{\text{сферы}}} dS = J_0.$$

4.1.4 Ионизационная камера объемом  $V = 3$  л, наполненная воздухом под давлением  $p = 2 \cdot 10^5$  Па при температуре  $T = 293$  К, помещена в однородное поле  $\gamma$ -излучения. Найти мощность экспозиционной дозы, если ток насыщения в камере составляет  $I = 0,2$  мкА.

*Решение.*

Согласно определению, мощность экспозиционной дозы может быть записана в виде

$$P_{\text{эксн}} = \frac{dQ}{m dt},$$

где  $m$  – масса воздуха в камере.

Из уравнения Менделеева-Клайперона выразим массу воздуха

$$m = \frac{M p V}{RT},$$

где  $M = 0,029$  кг/моль – молярная масса воздуха;

$R = 8,31$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Т.к. ток насыщения равен  $I = dQ/dt$ , для мощности экспозиционной дозы получим формулу

$$P_{\text{эксн}} = \frac{I R T}{M p V}.$$

Подставим данные из условия задачи, переведя их в систему СИ, получим

$$P_{\text{эксн}} = \frac{0,20 \cdot 10^{-6} \cdot 8,31 \cdot 293}{0,029 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}/(\text{кг} \cdot \text{с}) \text{ или } 108 \text{ мР}/\text{с}.$$

4.1.5 Плотность потока  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0 = 1$  МэВ в некоторой точке равна  $J = 1,5 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Найти мощности поглощенной и экспозиционной доз, если указанная точка находится а) в воздухе, б) в воде.

*Решение.*

Согласно определению, мощность поглощенной дозы можно записать в виде

$$P_{\text{погл}} = \frac{E_{\text{погл}}}{m t}.$$

Энергия  $E_{\text{погл}}$ , поглощенная веществом массы  $m$ , может быть представлена в виде произведения энергии  $\gamma$ -квантов  $E_0$  на количество поглощенных в веществе квантов  $N_{\text{погл}} = N(1 - e^{-\tau l})$

$$E_{\text{погл}} = N E_0 (1 - e^{-\tau l}),$$

где  $N$  – количество падающих на вещество квантов;

$\tau$  – линейный коэффициент поглощения;

$l$  – толщина слоя вещества.

Массу вещества  $m$  найдем по формуле  $m = \rho S l$ , где  $\rho$  – плотность вещества,  $S l$  – объем вещества. Подставим поглощенную энергию и массу вещества в формулу мощности дозы, получим

$$P_{\text{погл}} = E_0 \frac{N (1 - e^{-\tau l})}{S t \quad l \rho}.$$

Учитывая, что  $J = N/(S t)$  – плотность потока  $\gamma$ -квантов, и справедливо приближенное равенство  $(1 - e^{-\tau l}) \approx \tau l$ , выражение для мощности поглощенной дозы можно записать в виде

$$P_{\text{погл}} = E_0 J \frac{\tau}{\rho},$$

где  $(\tau/\rho)$  – массовый коэффициент поглощения  $\gamma$ -излучения.

По таблице А.5 определим массовые коэффициенты поглощения  $(\tau/\rho)_{\text{возд}} = 0,0276 \text{ см}^2/\text{г}$  и  $(\tau/\rho)_{\text{воды}} = 0,0310 \text{ см}^2/\text{г}$ , подставим в системе СИ числовые значения величин из условия задачи, получим

а) для воздуха  $P_{\text{погл}} = 1 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,5 \cdot 10^8 \cdot 0,00276 = 66 \text{ нГр}/(\text{кг} \cdot \text{с}),$

б) для воды  $P_{\text{погл}} = 74 \text{ нГр}/(\text{кг} \cdot \text{с}).$

Мощность экспозиционной дозы найдем из формулы (4.6). Для воздуха получим

$$P_{\text{эксн}} = P_{\text{погл}} / \alpha = 66 \cdot 10^{-9} / 34 = 1,94 \text{ нКл}/(\text{кг} \cdot \text{с}) \text{ или } 7,5 \text{ мкР}/\text{с}.$$

Аналогично для воды

$$P_{\text{эксн}} = 2,18 \text{ нКл}/(\text{кг} \cdot \text{с}) \text{ или } 8,4 \text{ мкР}/\text{с}.$$

4.1.6 В начальный момент времени мощность экспозиционной дозы на некотором расстоянии от радиоактивного  $\gamma$ -источника составляет  $P_0 = 65 \text{ нКл}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ . Определить экспозиционную дозу за время  $t = 5 \text{ ч}$ , если период полураспада радиоактивного препарата источника  $T_{1/2} = 25 \text{ ч}$ .

*Решение.*

Энергию, излучаемую источником в единицу времени, можно найти как произведение активности  $A$  на энергию кванта  $E_0$

$$\Phi = A \cdot E_0.$$

Согласно основному закону радиоактивного распада активность уменьшается со временем по закону

$$A = A_0 e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda = \ln 2/T_{1/2}$  – постоянная распада.

Тогда, согласно определению мощности поглощенной дозы и связи между поглощенной и экспозиционной дозами имеем

$$P_{\text{эксн}} = \frac{A_0}{\alpha} \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right) E_0 \frac{\tau}{\rho}.$$

Все, что в полученной формуле не зависит от времени, обозначим через  $P_0$ , тогда

$$P_{\text{эксн}} = P_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right).$$

Используя определение мощности дозы (4.9), экспозиционную дозу за время  $t$  найдем следующим образом

$$D_{\text{эксн}} = \int_0^t P_0 \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t'\right) dt' = \frac{T_{1/2}}{\ln 2} P_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t\right)\right).$$

Подставляя данные из условия задачи, находим

$$D_{\text{эксн}} = \frac{25 \cdot 3600 \cdot 65 \cdot 10^{-9}}{\ln 2} \left(1 - \exp\left(-\frac{5 \cdot \ln 2}{25}\right)\right) = 1,1 \text{ мКл/кг.}$$

4.1.7 В условиях предыдущей задачи определить время, за которое поглощенная доза в воздухе равна  $D = 100\text{мГр}$ .

*Решение.*

Из формулы, полученной в предыдущей задаче, выразим время

$$t = -\frac{T_{1/2}}{\ln 2} \ln \left( 1 - \frac{D_{\text{ногл}} \ln 2}{\alpha P_0 T_{1/2}} \right),$$

здесь учтено, что  $D_{\text{эксн}} = D_{\text{ногл}}/\alpha$  (4.6).

Подстановка данных приводит к следующему результату

$$t = -\frac{25}{\ln 2} \ln \left( 1 - \frac{0.1 \cdot \ln 2}{34 \cdot 65 \cdot 10^{-9} \cdot 25 \cdot 3600} \right) = 15,5 \text{ ч.}$$

4.1.8 Какова мощность экспозиционной дозы на расстоянии  $r = 1,5$  м от точечного источника  $\gamma$ -излучения активностью  $A = 1 \cdot 10^9$  Бк. Энергия  $\gamma$ -кванта  $E_0 = 2$  МэВ.

*Решение.*

Энергия, излучаемая источником за единицу времени, равна произведению активности  $A$  на энергию кванта  $E_0$

$$\Phi = A \cdot E_0.$$

Поскольку источник точечный, то излучение  $\gamma$ -квантов происходит по всем направлениям равновероятно. Поэтому, плотность потока энергии (интенсивность излучения) в точке наблюдения, отстоящей от источника на расстояние  $r$ , равна

$$I = \frac{\Phi}{4\pi r^2}.$$

С учетом сказанного мощность экспозиционной дозы запишется в виде

$$P_{\text{эксн}} = \frac{A E_0}{4\pi r^2 \alpha} \left( \frac{\tau}{\rho} \right),$$

где  $\tau/\rho = 0,0236 \text{ см}^2/\text{г}$  – массовый коэффициент поглощения в воздухе;

$\alpha = 34 \text{ Дж/Кл}$  – коэффициент, связывающий поглощенную и экспозиционную дозы (4.6).

Подстановка данных в системе СИ приводит к следующему результату

$$P_{\text{эксн}} = \frac{1 \cdot 10^9 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,00236}{4 \cdot \pi \cdot 34 \cdot 1,5^2} = 0,78 \text{ нКл}/(\text{кг} \cdot \text{с}) \text{ или } 3 \text{ мкР}/\text{с}.$$

4.1.9 Определить мощность экспозиционной дозы на расстоянии  $r_1 = 1 \text{ м}$  от точечного источника  $\gamma$ -излучения, если известно, что на расстоянии  $r_2 = 3 \text{ м}$  мощность экспозиционной дозы равна  $P_{2,\text{эксн}} = 10 \text{ нКл}/(\text{кг} \cdot \text{с})$ .

*Решение.*

Как показано в предыдущей задаче, мощность экспозиционной дозы  $\gamma$ -излучения от точечного источника обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника до точки наблюдения. Поэтому произведение мощности экспозиционной дозы в некоторой точке на квадрат расстояния от этой точки до источника есть величина постоянная.

$$P_{1,\text{эксн}} r_1^2 = P_{2,\text{эксн}} r_2^2.$$

Отсюда определяем

$$P_{1,\text{эксн}} = P_{2,\text{эксн}} \frac{r_2^2}{r_1^2}.$$

Подставив данные из условия задачи, находим

$$P_{1,\text{эксн}} = \frac{10 \cdot 9}{1} = 90 \text{ нКл}/(\text{кг} \cdot \text{с}).$$

4.1.10 Источник  $\gamma$ -излучения равномерно распределен вдоль отрезка прямой длиной  $l = 10 \text{ см}$ . Энергия излучаемых фотонов равна  $E_0 = 1,5 \text{ МэВ}$ . За одну секунду

источник испускает  $N = 2 \cdot 10^6$  квантов. Найти мощность экспозиционной дозы в точке, расположенной на расстоянии  $R = 5$  см над серединой отрезка.

*Решение.*

Рассмотрим малую часть  $dx$  отрезка, расположенную на расстоянии  $x$  от его середины, как показано на рисунке 4.2. Будем считать участок  $dx$  точечным источником  $\gamma$ -квантов. Тогда за одну секунду этот источник испустит  $dN = N dx/l$  квантов, и мощность экспозиционной дозы в точке наблюдения составит

$$dP_{\text{эксн}} = \frac{E_0 dN(\tau/\rho)}{4\pi\alpha r^2} = \frac{E_0 N(\tau/\rho)}{4\pi\alpha r^2 l} dx = \frac{E_0 N(\tau/\rho)}{4\pi\alpha R l} d\varphi,$$

т.к. из рисунка 4.2 видно, что  $r = R/\cos\varphi$  и  $x = R \operatorname{tg}\varphi$ , тогда  $dx = R d\varphi/\cos^2\varphi$ .

Чтобы найти мощность экспозиционной дозы от всего отрезка, необходимо проинтегрировать  $dP_{\text{эксн}}$  по углу  $\varphi$  в пределах от  $-\operatorname{arctg}[l/(2R)]$  до  $\operatorname{arctg}[l/(2R)]$ . Выполнив интегрирование, получим

$$P_{\text{эксн}} = \frac{2E_0 N(\tau/\rho)}{4\pi\alpha R l} \operatorname{arctg}\left[\frac{l}{2R}\right].$$

Подставив массовый коэффициент поглощения в воздухе  $\gamma$ -квантов с энергией 1,5 МэВ  $(\tau/\rho) = 0,0254 \text{ см}^2/\text{г}$  и данные из условия задачи, определим

$$P_{\text{эксн}} = \frac{2 \cdot 1,5 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 0,00254}{4\pi \cdot 34 \cdot 0,1 \cdot 0,05} \frac{\pi}{4} = 0,9 \text{ нКл}/(\text{кг}\cdot\text{с}).$$

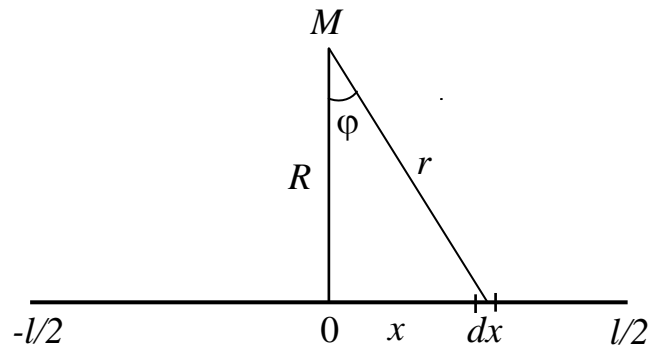


Рисунок 4.2 – Геометрия задачи



4.1.11 По поверхности круглого диска радиусом  $R = 2$  см равномерно распределен источник  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0 = 1$  МэВ. Поверхностная активность диска  $a = 1,5 \cdot 10^9$  Бк/см<sup>2</sup>. Найти мощность экспозиционной дозы над центром диска на высоте  $h = 5$  см.

*Решение.*

Рассмотрим элемент поверхности  $dS = r dr d\varphi$  диска, расположенный на расстоянии  $r$  от его центра, как показано на рисунке 4.3, и будем считать этот элемент точечным источником  $\gamma$ -квантов. Активность данного точечного источника равна

$$dA = a dS = a r dr d\varphi.$$

Мощность экспозиционной дозы излучения данного элемента поверхности в точке наблюдения М составляет

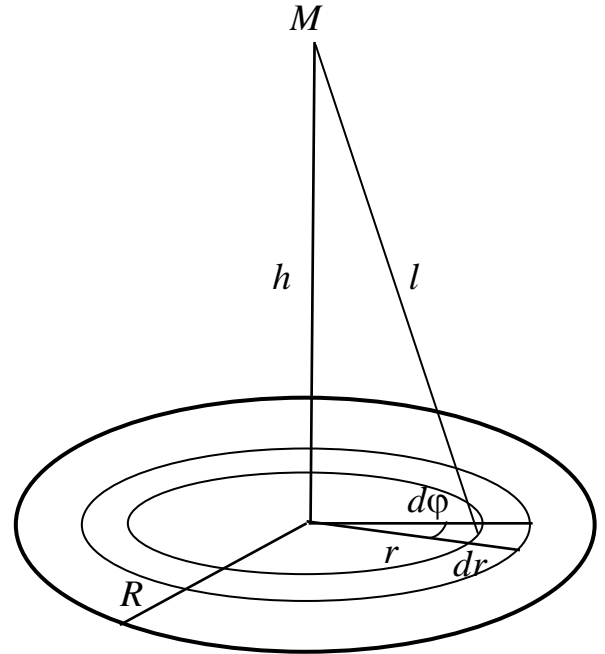


Рисунок 4.3 – Геометрия задачи

$$dP_{\text{эксн}} = \frac{a E_0 dS}{4\pi l^2 \alpha} \left( \frac{\tau}{\rho} \right) = \frac{a E_0 r dr d\varphi}{4\pi (r^2 + h^2) \alpha} \left( \frac{\tau}{\rho} \right).$$

Полная мощность экспозиционной дозы определяется интегралом

$$P_{\text{эксн}} = \int_0^{2\pi} \int_0^R dP_{\text{эксн}} = \frac{a E_0}{4\alpha} \left( \frac{\tau}{\rho} \right) \ln \left( 1 + \frac{R^2}{h^2} \right).$$

Подставим массовый коэффициент поглощения в воздухе  $\gamma$ -квантов с энергией 1 МэВ  $(\tau/\rho) = 0,0276$  см<sup>2</sup>/г и данные из условия задачи, получим

$$P_{\text{эксн}} = \frac{1,5 \cdot 10^{13} \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,00276}{4 \cdot 34} \ln \left( 1 + \frac{2^2}{5^2} \right) = 7,2 \text{ мкКл}/(\text{кг} \cdot \text{с}).$$

4.1.12 Точечный источник  $\gamma$ -излучения активностью  $A = 2,5 \cdot 10^8$  Бк состоит из радионуклида: а)  $^{60}\text{Co}$ , б)  $^{137}\text{Cs}$ , в)  $^{38}\text{Cl}$ . Схемы распада указанных радионуклидов приведены на рисунке 4.4. Найти мощность экспозиционной дозы на расстоянии

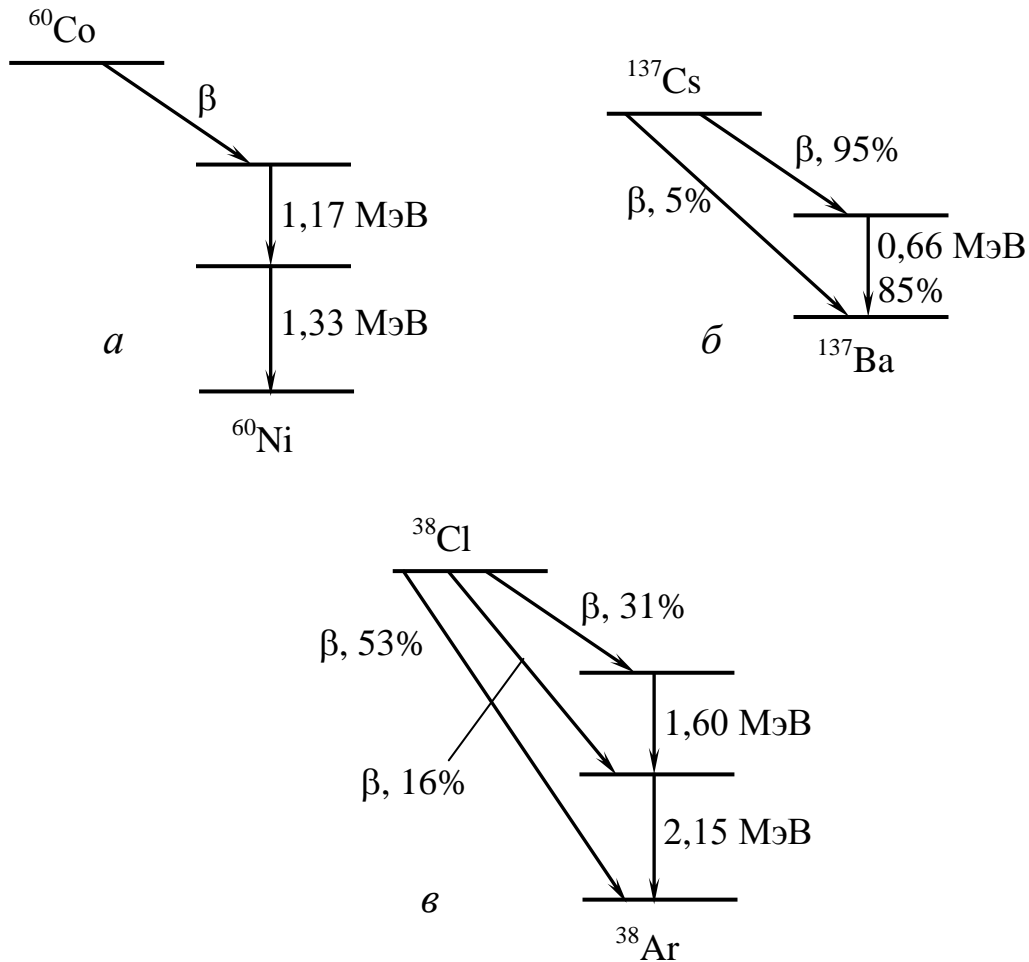


Рисунок 4.4 – Схемы распадов а)  $^{60}\text{Co}$ , б)  $^{137}\text{Cs}$ , в)  $^{38}\text{Cl}$

$r = 2$  м от источника.

*Решение.*

а) Так как в результате  $\beta$ -распада радионуклида  $^{60}\text{Co}$  образуется  $^{60}\text{Ni}$  в возбужденном состоянии, данный препарат будет источником двух  $\gamma$ -квантов с энергиями  $E_{01} = 1,17$  МэВ и  $E_{02} = 1,33$  МэВ. Поэтому мощность экспозиционной дозы складывается из мощностей доз излучения  $\gamma$ -квантов обоих видов, т.е.

$$P_{\text{эксн}} = \frac{A}{4\pi\alpha r^2} \left( E_{01} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_1 + E_{02} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_2 \right).$$

Для определения коэффициентов поглощения  $\gamma$ -излучения в воздухе воспользуемся данными таблицы А.5 и применим линейную интерполяцию по энергии. Как видно из рисунка 4.5, значение функции  $f(E)$  в произвольной точке  $E_x$  определяется значениями функции в соседних точках по формуле

$$f_x = f_1 + (E_x - E_1) \cdot \text{tg}\alpha,$$

$$\text{tg}\alpha = \frac{f_2 - f_1}{E_2 - E_1}.$$

Используем значения массовых коэффициентов поглощения при энергиях близких к данным  $E_{01}$  и  $E_{02}$ . И для первого и для второго квантов такими энергиями являются  $E_1 = 1,0$  МэВ и  $E_2 = 1,5$  МэВ. Тогда для первого кванта имеем

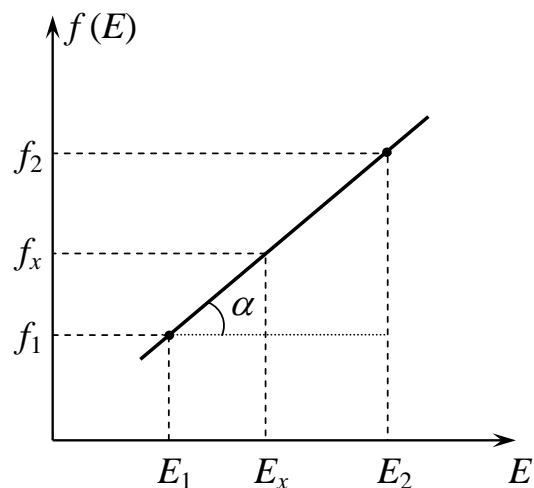


Рисунок 4.5 – Иллюстрация линейной интерполяции

$$\left( \frac{\tau}{\rho} \right)_1 = 0,0276 + \frac{0,0254 - 0,0276}{1,5 - 1} (1,17 - 1) = 0,0268 \text{ см}^2/\text{г}.$$

Аналогично для второго кванта

$$\left( \frac{\tau}{\rho} \right)_2 = 0,0276 + \frac{0,0254 - 0,0276}{1,5 - 1} (1,33 - 1) = 0,0261 \text{ см}^2/\text{г}.$$

Подставляем данные в системе СИ в формулу мощности экспозиционной дозы, получаем

$$P_{\text{эксн}} = \frac{2,5 \cdot 10^8}{4\pi \cdot 34 \cdot 2^2} (1,17 \cdot 0,00268 + 1,33 \cdot 0,00261) \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 155 \text{ пКл}/(\text{кг}\cdot\text{с}).$$

б) Как видно из рисунка 4.4б, выход  $\gamma$ -кванта на один распад составляет  $\eta = 0,85$ . В этом случае мощность экспозиционной дозы находится по формуле

$$P_{\text{эксн}} = \frac{AE_0\eta}{4\pi\alpha r^2} \left( \frac{\tau}{\rho} \right).$$

С помощью линейной интерполяции определим коэффициент поглощения  $(\tau/\rho) \approx 0,0292 \text{ см}^2/\text{г}$  и вычислим мощность экспозиционной дозы

$$P_{\text{эксн}} = \frac{2,5 \cdot 10^8 \cdot 0,66 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,85 \cdot 0,00292}{4\pi \cdot 34 \cdot 2^2} = 38 \text{ пКл}/(\text{кг}\cdot\text{с}).$$

в) Из рисунка 4.4в видно, что  $\gamma$ -квант с энергией  $E_{01} = 1,6 \text{ МэВ}$  испускается в  $\eta_1 = 31\%$  случаев, а  $\gamma$ -квант с энергией  $E_{02} = 2,15 \text{ МэВ}$  испускается в  $\eta_2 = (31+16)\%$  случаев. Т.е. второй квант может испускаться каскадно за первым квантом, а может сразу, если после  $\beta$ -распада  $^{38}\text{Cl}$  ядро  $^{38}\text{Ar}$  окажется в первом возбужденном состоянии. В этом случае формула мощности экспозиционной дозы имеет вид

$$P_{\text{эксн}} = \frac{A}{4\pi\alpha r^2} \left( \eta_1 E_{01} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_1 + \eta_2 E_{02} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_2 \right).$$

Коэффициенты поглощения, найденные с помощью линейной интерполяции, приблизительно равны  $(\tau/\rho)_1 \approx 0,0250 \text{ см}^2/\text{г}$  и  $(\tau/\rho)_2 \approx 0,0233 \text{ см}^2/\text{г}$ . Подставив данные, вычислим значение мощности экспозиционной дозы

$$P_{\text{эксн}} = \frac{2,5 \cdot 10^8}{4\pi \cdot 34 \cdot 2^2} (0,31 \cdot 1,6 \cdot 0,00250 + 0,47 \cdot 2,15 \cdot 0,00233) \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} =$$

$$= 84 \text{ пКл}/(\text{кг}\cdot\text{с}).$$

4.1.13 Мощность экспозиционной дозы в некоторой точке  $M$ , через которую проходит узкий пучок  $\gamma$ -квантов, составляет  $P_{0,\text{эксн}} = 1,5 \text{ нКл}/(\text{кг}\cdot\text{с})$ . Энергия  $\gamma$ -квантов равна  $E_0 = 2 \text{ МэВ}$ . Какой толщины свинцовый экран нужно поставить на пу-

ти пучка, чтобы мощность экспозиционной дозы в указанной точке снизилась до 0,5 нКл/(кг·с)?

*Решение.*

Как известно, интенсивность узкого пучка  $\gamma$ -квантов по мере проникновения в некоторую среду уменьшается по экспоненциальному закону

$$I = I_0 e^{-\mu d},$$

где  $\mu$  – линейный коэффициент ослабления  $\gamma$ -лучей, который учитывает выбывание  $\gamma$ -квантов из пучка и за счет рассеяния, и за счет поглощения.

В задаче 4.1.6 было показано, что мощность экспозиционной дозы пропорциональна интенсивности излучения. Поэтому аналогичный закон ослабления имеет место и для мощности экспозиционной дозы. Тогда для толщины экрана можно записать

$$d = \frac{1}{\mu} \ln \frac{P_{0, \text{эксн}}}{P_{\text{эксн}}}.$$

В таблице А.5 даны значения массового коэффициента ослабления  $\gamma$ -излучения. Чтобы получить значение линейного коэффициента, необходимо значение массового коэффициента для энергии 2 МэВ умножить на плотность вещества экрана (свинца)

$$\mu = (\mu/\rho) \cdot \rho = 0,0463 \cdot 11,3 = 0,523 \text{ см}^{-1}.$$

Подставив данные из условия задачи, найдем толщину экрана

$$d = \frac{1}{0,523} \ln \frac{1,5}{0,5} = 2,1 \text{ см}.$$

4.1.14 В центре сферического свинцового контейнера с внешним радиусом  $r = 10$  см находится точечный источник  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0 = 1,5$  МэВ активностью  $A = 4 \cdot 10^6$  Бк. Число  $\gamma$ -квантов, приходящихся на один распад, равно  $\eta = 0,5$ .

При какой толщине стенок мощность экспозиционной дозы вне контейнера составит  $P_{\text{эксн}} = 0,2$  нКл/(кг·с)?

*Решение.*

В отсутствие свинцовой оболочки мощность экспозиционной дозы на расстоянии  $r$  от точечного  $\gamma$ -источника находится по формуле

$$P_{0,\text{эксн}} = \frac{A E_0 \eta}{4 \pi \alpha r^2} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_{\text{возд}} .$$

Ослабление мощности экспозиционной дозы в свинцовой оболочке происходит по следующему закону

$$P_{\text{эксн}} = P_{0,\text{эксн}} e^{-\tau d} ,$$

где  $\tau$  – линейный коэффициент поглощения  $\gamma$ -лучей в свинце.

Следует отметить, что число рассеянных из любого элементарного телесного угла фотонов компенсируется фотонами, рассеянными из других телесных углов, в силу сферической симметрии задачи. Поэтому ослабление потока  $\gamma$ -квантов будет происходить только за счет поглощения.

Для толщины свинцовой оболочки получаем следующее выражение

$$d = \frac{1}{\tau} \ln \frac{A \eta E_0 (\tau/\rho)_{\text{возд}}}{4 \pi \alpha r^2 P_{\text{эксн}}} .$$

Аналогично предыдущей задаче линейный коэффициент поглощения найдем, умножив массовый коэффициент на плотность свинца

$$\tau = (\tau/\rho)_{\text{Pb}} \cdot \rho = 0,0280 \cdot 11,3 = 0,316 \text{ см}^{-1} .$$

Подставим в формулу для толщины данные задачи, получим

$$d = \frac{1}{0,316} \ln \frac{4 \cdot 10^6 \cdot 0,5 \cdot 1,5 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,00254}{4 \pi \cdot 34 \cdot 0,1^2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-9}} = 1,1 \text{ см} .$$

4.1.15 На свинцовый экран толщиной  $d = 4$  см падает нормально узкий пучок  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0 = 1$  МэВ. Мощность экспозиционной дозы в месте входа пучка в экран составляет  $P_{0,эксн} = 0,5$  мкКл/(кг·с). Определить мощность поглощенной дозы в свинце вблизи точки выхода пучка из экрана.

*Решение.*

Согласно решению задачи 4.1.8, мощность поглощенной дозы в некоторой точке в воздухе может быть записана в виде

$$P_{\text{погл}} = \frac{E_0 A}{S} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_{\text{возд}} = \alpha P_{\text{эксн}},$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения пучка  $\gamma$ -квантов;

$\alpha$  – коэффициент пропорциональности между поглощенной и экспозиционной дозами, который в воздухе равен 34 Дж/Кл.

Аналогичным образом можно записать мощность поглощенной дозы в свинце

$$P'_{\text{погл}} = \frac{E_0 A}{S} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_{\text{Рв}} = \alpha' P_{\text{эксн}},$$

где  $\alpha'$  – коэффициент пропорциональности между поглощенной и экспозиционной дозами в свинце.

Сравнивая обе формулы, можно выразить  $\alpha'$

$$\alpha' = \alpha \frac{(\tau/\rho)_{\text{Рв}}}{(\tau/\rho)_{\text{возд}}}.$$

Теперь, учитывая, что в среде мощность экспозиционной дозы уменьшается с глубиной проникновения пучка  $\gamma$ -квантов по закону

$$P_{\text{эксн}} = P_{0,эксн} e^{-\mu_{\text{Рв}} d},$$

можно записать формулу для мощности поглощенной дозы в точке выхода пучка из экрана

$$P_{\text{погл}} = \alpha P_{0,\text{эксн}} \frac{(\tau/\rho)_{\text{Pb}}}{(\tau/\rho)_{\text{возд}}} e^{-\mu_{\text{Pb}} d}.$$

Согласно таблице А.5 коэффициенты поглощения и ослабления  $\gamma$ -излучения с энергией 1 МэВ равны  $(\tau/\rho)_{\text{Pb}} = 0,0384 \text{ см}^2/\text{Г}$ ,  $(\tau/\rho)_{\text{возд}} = 0,0276 \text{ см}^2/\text{Г}$ ,  $\mu_{\text{Pb}} = 0,0703 \cdot 11,3 = 0,794 \text{ см}^{-1}$ . Подстановка данных в системе СИ в полученную формулу приводит к следующему значению мощности поглощенной дозы

$$P_{\text{погл}} = \frac{34 \cdot 0,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,00384 \cdot e^{-0,794 \cdot 4}}{0,00276} = 1 \text{ мкГр/с}.$$

4.1.16 Точечный изотропный источник быстрых нейтронов испускает  $N = 2 \cdot 10^7$  частиц в секунду. Определить расстояние от источника, на котором плотность потока нейтронов составляет  $J = 20 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

*Решение.*

Так как источник изотропный, то испускание нейтронов происходит равномерно по всем направлениям. Поэтому плотность потока нейтронов связана с количеством частиц, испускаемых в единицу времени соотношением

$$J = \frac{N}{4\pi r^2}.$$

Из этой формулы выражаем расстояние

$$r = \sqrt{\frac{N}{4\pi J}}.$$

Подстановка данных приводит к результату

$$r = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^7}{4\pi \cdot 20 \cdot 10^4}} = 2,8 \text{ м}.$$

4.1.17 Пучок нейтронов с кинетической энергией  $T_0 = 0,5 \text{ МэВ}$  проходит сквозь тонкую графитовую пластинку. Плотность потока нейтронов составляет



$J = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Найти поглощенную дозу за время облучения  $t = 1 \text{ ч}$ , если сечение упругого рассеяния нейтрона на ядре углерода  $\sigma = 4,8 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$ .

*Решение.*

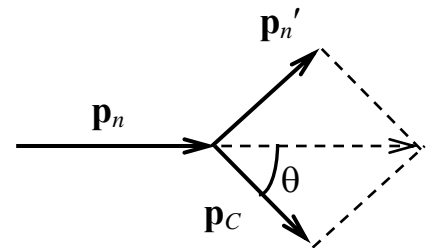
Сначала определим энергию, передаваемую атому углерода при упругом рассеянии нейтрона. Запишем законы сохранения энергии и импульса для упругого удара

$$\frac{p_n^2}{2m_n} = \frac{p_n'^2}{2m_n} + \frac{p_C^2}{2m_C}, \quad \mathbf{p}_n = \mathbf{p}_n' + \mathbf{p}_C,$$

где  $m_n$  и  $m_C$  – массы нейтрона и атома углерода;

$\mathbf{p}_n$ ,  $\mathbf{p}_n'$  и  $\mathbf{p}_C$  – импульсы нейтрона до и после столкновения и импульс отдачи атома углерода.

Согласно диаграмме, изображенной на рисунке 4.6, импульс нейтрона после столкновения с атомом углерода равен



$$p_n'^2 = p_n^2 + p_C^2 - 2p_n p_C \cos \theta.$$

Рисунок 4.6 – Диаграмма импульсов при упругом рассеянии нейтрона

Подставим квадрат импульса нейтрона после соударения в закон сохранения энергии и после преобразований получим выражение для импульса отдачи

$$p_C = \frac{2m_C p_n}{m_C + m_n} \cos \theta.$$

Окончательно для кинетической энергии атома углерода имеем

$$T_C = \frac{p_C^2}{2m_C} = \frac{4m_n m_C}{(m_C + m_n)^2} T_0 \cos^2 \theta.$$

Поскольку угол отлета атома углерода неизвестен, заменим квадрат косинуса средним значением  $\langle \cos^2 \theta \rangle = 1/2$ , получим

$$\bar{T}_C = \frac{2m_n m_C}{(m_C + m_n)^2} T_0.$$

Подставив данные, определим среднюю энергию, передаваемую нейтроном атому углерода при упругом рассеянии

$$\bar{T}_C = \frac{2 \cdot 1 \cdot 12 \cdot 0,5}{(12 + 1)^2} = 0,071 \text{ МэВ.}$$

Как известно, сечение упругого рассеяния – это площадь поперечного сечения такой области пространства около ядра-мишени, при пересечении которой нейтрон со 100 % вероятностью испытывает упругое рассеяние. Поэтому чтобы найти число нейтронов  $N$ , испытавших упругое рассеяние, нужно плотность потока нейтронов  $J$  умножить на время облучения  $t$  и на площадь, занятую мишенями, которая в свою очередь, есть произведение сечения рассеяния  $\sigma$  на количество атомов углерода  $N_C$  в тонкой графитовой пластинке

$$N = J \sigma N_C t.$$

Эти рассеянные нейтроны передадут атомам углерода энергию

$$E = N \bar{T}_C = J \sigma N_C t \bar{T}_C.$$

Согласно определению поглощенной дозы имеем

$$D_{\text{погл}} = \frac{E}{M},$$

где  $M$  – масса графитовой пластинки, которую можно представить как произведение массы атома углерода  $m_C$  на количество атомов  $N_C$ .

В результате подстановки соответствующих выражений для поглощенной энергии и массы пластинки получим следующую формулу для поглощенной дозы

$$D_{\text{погл}} = \frac{J \sigma t \bar{T}_C}{m_C}.$$

Подставив числовые значения величин в системе СИ, получим

$$D_{\text{пол}} = \frac{2 \cdot 10^9 \cdot 4,8 \cdot 10^{-28} \cdot 3600 \cdot 0,071 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}}{12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}} = 2 \text{ мГр.}$$

4.1.18 Найти количество  $\alpha$ -частиц с кинетической энергией  $T_\alpha = 5$  МэВ, поглощенных биологической тканью массой  $m = 2$  г, если эквивалентная доза составляет  $D_{\text{экв}} = 1$  Зв.

*Решение.*

Энергия, поглощенная тканью равна

$$E = T_\alpha N_\alpha,$$

где  $N_\alpha$  – количество поглощенных  $\alpha$ -частиц.

Согласно определению эквивалентной дозы получаем

$$D_{\text{экв}} = K D_{\text{пол}} = \frac{K T_\alpha N_\alpha}{m},$$

где  $K$  – коэффициент качества, значение которого приведено в таблице А.4.

Отсюда выразим количество  $\alpha$ -частиц

$$N_\alpha = \frac{m D_{\text{экв}}}{K E_\alpha}.$$

Подставив данные, получим

$$N_\alpha = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{20 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 1,25 \cdot 10^8.$$

4.1.19 Найти поглощенную и эквивалентную дозы в слое, равном глубине проникновения  $\alpha$ -частиц с энергией  $T_\alpha = 5,4$  МэВ в биологическую ткань. Учесть, что пробег  $\alpha$ -частицы в ткани примерно в 815 раз меньше пробега в воздухе. Коли-

чество  $\alpha$ -частиц, падающих на поверхность биологической ткани площадью  $S = 3 \text{ см}^2$ , равно  $N_\alpha = 6 \cdot 10^4$ .

*Решение.*

Сначала определим пробег  $\alpha$ -частицы в воздухе по эмпирической формуле

$$R_\alpha = 0,31T_\alpha^{3/2} = 0,31 \cdot 5,4^{3/2} = 3,9 \text{ см.}$$

Теперь определим глубину проникновения  $\alpha$ -частицы в биологическую ткань

$$l = \frac{R_\alpha}{815} = \frac{3,9}{815} = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

Тогда, учитывая, что масса ткани равна  $m = \rho S l$ , найдем поглощенную дозу

$$D_{\text{погл}} = \frac{T_\alpha N_\alpha}{\rho S l}.$$

Считая, что плотность биологической ткани примерно равна плотности воды  $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ , получим

$$D_{\text{погл}} = \frac{5,4 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6 \cdot 10^4}{1000 \cdot 3 \cdot 10^{-4} \cdot 4,9 \cdot 10^{-5}} = 3,5 \text{ мГр.}$$

Умножим полученное значение на коэффициент качества  $K = 20$ , найдем эквивалентную дозу  $D_{\text{экв}} = 70 \text{ мЗв}$ .

4.1.20 Какова поглощенная доза в воде вблизи поверхности за время  $t = 1 \text{ ч}$ , если поток  $\beta$ -частиц плотностью  $J = 4 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  от источника  $^{90}\text{Sr}$  падает нормально на поверхность воды? Среднюю кинетическую энергию  $\beta$ -частиц принять равной  $\bar{T} = 1/3 E_{\beta \text{ макс}}$ .

*Решение.*

Количество  $\beta$ -частиц по мере проникновения в воду уменьшается по экспоненциальному закону

$$N = N_0 e^{-\mu d},$$

где  $\mu$  – линейный коэффициент поглощения;

$d$  – глубина проникновения.

Отсюда количество поглощенных в среде частиц

$$N' = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\mu d}) \approx N_0 \mu d.$$

Определим поглощенную дозу в приповерхностном слое воды массой  $m = \rho S d$ , где  $S$  – облучаемая площадь поверхности.

$$D_{\text{погл}} = \frac{\bar{T} N'}{m} = \frac{T_{\beta \text{max}} N_0 \mu d}{3 \rho S d}.$$

Замечая, что по определению плотности потока  $N_0/S = J t$  и  $\mu/\rho$  есть массовый коэффициент поглощения, окончательно для поглощенной дозы получим выражение

$$D_{\text{погл}} = \frac{1}{3} T_{\beta \text{max}} J t (\mu/\rho).$$

Вычислим массовый коэффициент поглощения  $\beta$ -частиц с максимальной энергией  $T_{\beta \text{max}} = 0,535$  МэВ по эмпирической формуле (2.8)

$$\frac{\mu}{\rho} = 22 T_{\beta \text{max}}^{-4/3} = 22 \cdot 0,535^{-4/3} = 50,7 \text{ см}^2/\text{Г}.$$

Подставив данные, для поглощенной дозы получим значение

$$D_{\text{погл}} = \frac{1}{3} \cdot 0,535 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^9 \cdot 3600 \cdot 5,07 = 2,1 \text{ Гр}.$$

## 4.2 Задачи для самостоятельного решения

4.2.1 Определить активность  $^{60}\text{Co}$  через 3 года, если первоначальная активность составляла  $A_0 = 1,4 \cdot 10^9$  Бк. Период полураспада данного радионуклида

$T_{1/2} = 5,27$  года.

Ответ.  $A = 0,94 \cdot 10^9$  Бк.

4.2.2 Половина поверхности сферы радиусом  $R$  равномерно покрыта изотропным поверхностным источником, испускающим с единицы площади в единицу времени  $J_0$  частиц. Найти плотность потока частиц в центре сферы, считая среду внутри сферы непоглощающей.

Ответ.  $J = J_0/2$ .

4.2.3 На каком расстоянии от точечного изотропного источника  $\gamma$ -излучения активностью  $A = 3,1 \cdot 10^9$  Бк мощность экспозиционной дозы составляет  $P_{\text{эксн}} = 0,4$  нКл/(кг·с)? Энергия  $\gamma$ -квантов  $E_0 = 1$  МэВ, их выход на один распад  $\eta = 0,5$ , поглощением  $\gamma$ -квантов при распространении до точки наблюдения пренебречь.

Ответ.  $r = 2$  м.

4.2.4 Найти мощность экспозиционной дозы на расстоянии  $r = 2,5$  м от точечного источника активностью  $A = 0,67 \cdot 10^9$  Бк, который на каждый акт распада испускает два  $\gamma$ -кванта с энергией  $E_{01} = 0,8$  МэВ и  $E_{02} = 1$  МэВ. Поглощением  $\gamma$ -квантов при распространении до точки наблюдения пренебречь.

Ответ.  $P_{\text{эксн}} = 0,2$  нКл/(кг·с).

4.2.5 На рисунке 4.7 изображены схемы распадов радионуклидов а)  $^{24}\text{Na}$  и б)  $^{42}\text{K}$ . Найти мощность экспозиционной дозы на расстоянии  $r = 1$  м от точечного изотропного источника активностью  $A = 3,7 \cdot 10^7$  Бк, содержащего один из указанных радионуклидов.

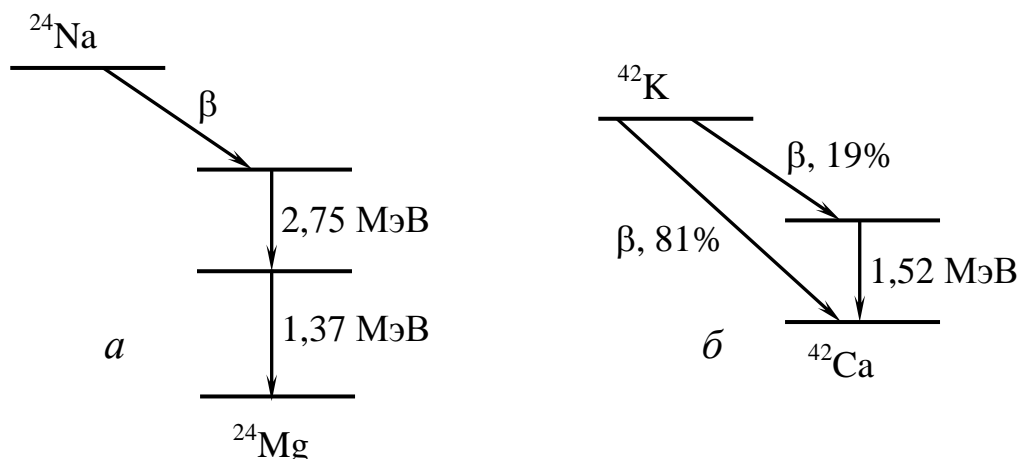


Рисунок 4.7 – Схемы распадов а)  $^{24}\text{Na}$ , б)  $^{42}\text{K}$

*Ответ.* а)  $P_{\text{эксн}} = 1,3 \text{ пКл}/(\text{кг}\cdot\text{с})$ , б)  $P_{\text{эксн}} = 9,6 \text{ пКл}/(\text{кг}\cdot\text{с})$ .

4.2.6 На каком расстоянии от точечного  $\gamma$ -источника мощность экспозиционной дозы составит  $P_{\text{эксн}} = 4 \text{ мкР}/\text{с}$ , если на расстоянии  $r_0 = 1 \text{ м}$  мощность экспозиционной дозы равна  $P_{\text{эксн},0} = 100 \text{ мкР}/\text{с}$ ?

*Ответ.*  $r = 5 \text{ м}$ .

4.2.7 Определить ток насыщения в ионизационной камере, помещенной в однородное поле  $\gamma$ -излучения, если мощность экспозиционной дозы равна  $P_{\text{эксн}} = 22 \text{ мкКл}/(\text{кг}\cdot\text{с})$ . Камера объемом  $V = 5 \text{ л}$  наполнена воздухом под давлением  $p = 250 \text{ кПа}$  при температуре  $T = 300 \text{ К}$ .

*Ответ.*  $I_{\text{нас}} = 0,32 \text{ мкА}$ .

4.2.8 Найти мощность поглощенной дозы в объеме  $V = 10 \text{ см}^3$  бесстеночной ионизационной камеры (газ – воздух при нормальных условиях) при токе насыщения  $I_{\text{нас}} = 1 \text{ мкА}$ .

*Ответ.*  $P_{\text{погл}} = 2,66 \text{ Гр}/\text{с}$ .

4.2.9 Биологическая ткань находится в однородном поле  $\gamma$ -излучения. В некоторой точке ткани мощность поглощенной дозы составляет  $P_{\text{погл}} = 108 \text{ нГр}/\text{с}$ . Определить плотность потока  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0 = 2 \text{ МэВ}$  в этой точке. Массовый коэффициент поглощения  $\gamma$ -излучения в биологической ткани принять равным данному коэффициенту в воде.

*Ответ.*  $J = 1,3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

4.2.10 На некотором расстоянии от  $\gamma$ -источника с периодом полураспада  $T_{1/2} = 26 \text{ ч}$  мощность экспозиционной дозы в начальный момент времени равна  $P_{\text{эксн},0} = 72 \text{ нКл}/(\text{кг}\cdot\text{с})$ . За какой промежуток времени экспозиционная доза составит  $D_{\text{эксн}} = 1,43 \text{ мКл}/\text{кг}$ ?

*Ответ.*  $t = 6 \text{ ч}$ .

4.2.11 На некотором расстоянии от  $\gamma$ -источника с периодом полураспада  $T_{1/2} = 26 \text{ ч}$  мощность экспозиционной дозы в начальный момент времени равна  $P_{\text{эксн},0} = 72 \text{ нКл}/(\text{кг}\cdot\text{с})$ . Найти поглощенную дозу в воздухе за время  $t = 22 \text{ ч}$ .

*Ответ.*  $D_{\text{погл}} = 156 \text{ мГр}$ .

4.2.12 Мощность экспозиционной дозы в некоторой точке, через которую проходит узкий пучок  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0 = 1$  МэВ, составляет  $P_{эксн,0} = 0,98$  нКл/(кг·с). Какова будет мощность экспозиционной дозы в этой точке, если на пути пучка поместить свинцовый экран толщиной  $d = 2$  см?

*Ответ.*  $P_{эксн} = 0,2$  нКл/(кг·с).

4.2.13 На свинцовый экран нормально падает узкий пучок  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0 = 3$  МэВ. Определить толщину экрана, если мощность экспозиционной дозы в месте входа пучка в экран равна  $P_{эксн} = 0,23$  мКл/(кг·с), а мощность поглощенной дозы в свинце вблизи точки выхода пучка равна  $P_{погл} = 0,98$  мГр/с.

*Ответ.*  $d = 2$  см.

4.2.14 Определить эквивалентную дозу в биологической ткани массой  $m = 1$  г, если в ней поглотилось  $N = 3,9 \cdot 10^7$   $\alpha$ -частиц с кинетической энергией  $T_\alpha = 4,9$  МэВ.

*Ответ.*  $D_{экр} = 0,6$  Зв.

4.2.15 Нейтроны с кинетической энергией  $T_n = 2$  МэВ упруго рассеиваются на ядрах а) Н; б) О; в) Рb. Определить среднюю энергию ядер отдачи.

*Ответ.* а)  $T_H = 1$  МэВ; б)  $T_O = 0,22$  МэВ; в)  $T_{Pb} = 19,1$  кэВ.

4.2.16 Нейтроны с кинетической энергией  $T_n = 2$  МэВ упруго рассеиваются на ядрах а) Н; б) О; в) Рb. Определить среднюю энергию нейтрона после рассеяния.

*Ответ.* а)  $T_n' = 1$  МэВ; б)  $T_n' = 1,78$  МэВ; в)  $T_n' = 1,98$  МэВ.

4.2.17 Какую часть энергии в среднем теряет нейтрон при упругом рассеянии на ядрах а) Н; б) О; в) Рb?

*Ответ.* а)  $\eta_H = 0,5$ ; б)  $\eta_O = 0,11$ ; в)  $\eta_{Pb} = 0,0096$ .

4.2.18 Нейтроны с энергией  $T_n = 1$  МэВ испытывают упругое рассеяние в биологической ткани, состав которой  $(C_5H_{40}O_{18}N)_x$ . Сечения упругого рассеяния на элементах биологической ткани равны  $\sigma_C = 2,4$  б,  $\sigma_H = 4,1$  б,  $\sigma_O = 8,15$  б,  $\sigma_N = 2,31$  б. Рассеяние на каком элементе ткани дает наибольший вклад в поглощенную дозу?

*Ответ.* На водороде.

4.2.19 На поверхность воды падает нормально пучок  $\beta$ -частиц от радиоактивного источника  $^{90}\text{Sr}$ . Плотность потока частиц составляет  $J = 5 \cdot 10^4$  см $^{-2}$ ·с $^{-1}$ . Средняя



кинетическая энергия  $\beta$ -частиц равна  $\bar{T} = 1/3 T_{\beta \max}$ . За какой промежуток времени поглощенная доза в воде составит  $D_{\text{погл}} = 0,26$  Гр?

*Ответ.*  $t = 1$  ч.

4.2.20 Доза, поглощенная в биологической ткани при облучении ее протонами с энергией  $T_p = 5$  МэВ, составила 0,1 Гр. Какой дозе  $\gamma$ -излучения это соответствует по биологическому действию?

*Ответ.*  $D_{\text{экв}} = 1$  Зв.

## 5 Защита от ионизирующего излучения

*Пробег  $\alpha$ -частиц в среде [5]*

$$R_{\alpha} = 1,78 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt[3]{A} \sqrt{T_{\alpha}^3}}{\rho}, \text{ см}, \quad (5.1)$$

где  $A$  – массовое число ядра атома среды;

$\rho$  – плотность среды, г/см<sup>3</sup>;

$T_{\alpha}$  – кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы, МэВ.

*Максимальный массовый пробег  $\beta$ -частиц в веществе X [5]*

$$R_X = \frac{R_{Al} (Z/A)_{Al}}{(Z/A)_X}, \text{ г/см}^2, \quad (5.2)$$

где  $R_{Al}$  – максимальный массовый пробег  $\beta$ -частиц в алюминии, определяемый формулой (2.9).

*Линейный пробег  $\beta$ -частиц в воздухе [6]*

$$R_{возд} \approx 400 T_{\beta \max}, \text{ см}, \quad (5.3)$$

где  $T_{\beta \max}$  – максимальная энергия  $\beta$ -спектра, МэВ.

*Отношение пробегов  $\beta$ -частиц в среде и в воздухе [6]*

$$R_{среды} / R_{возд} = \rho_{возд} / \rho_{среды}, \quad (5.4)$$

где  $\rho_{возд(среды)}$  – плотность воздуха (среды).

*Массовая толщина слоя половинного ослабления  $\beta$ -частиц в алюминии [6]*

$$d_{1/2} = 0,032 T_{\beta \max}^{1,33}, \text{ г/см}^2. \quad (5.5)$$

*Мощность поглощенной дозы от точечного источника со сложным составом  $\beta$ -излучения [7]*

$$P_{\text{погл } \beta} = \frac{A}{4\pi r^2} \sum_i \frac{\eta_i (0,4 T_{\beta \max i}) e^{-\mu_i r}}{R_i}, \text{ Гр/с}, \quad (5.6)$$

где  $A$  – активность источника, Бк;

$r$  – расстояние от источника, м;

$T_{\beta \max}$  – максимальная кинетическая энергия электронов  $i$ -ой группы, Дж;

$\eta_i$  – доля частиц, относящихся к группе с  $i$ -ой максимальной кинетической энергией;

$R_i$  – максимальный массовый пробег в данном веществе (или в биологической ткани)  $\beta$ -частиц  $i$ -ой группы, кг/м<sup>2</sup>;

$\mu_i$  – линейный коэффициент ослабления в воздухе  $\beta$ -излучения  $i$ -ой группы, м<sup>-1</sup>.

*Кратность ослабления  $\gamma$ -излучения [5]*

$$K = \frac{P}{P_D}, \quad (5.7)$$

где  $P$  – исходная мощность дозы;

$P_D$  – предельно допустимая мощность дозы.

*Толщина защиты от сложного  $\gamma$ -спектра [5]*

$$d = \begin{cases} d_{\Gamma} + d_{1/2}, & \text{если } d_{\Gamma} - d_{\kappa} = 0, \\ d_{\kappa} + d_{1/2}, & \text{если } d_{\Gamma} - d_{\kappa} < d_{1/2}, \\ d_{\Gamma}, & \text{если } d_{\Gamma} - d_{\kappa} > d_{1/2}, \end{cases} \quad (5.8)$$

где  $d_{\Gamma}$  – толщина защиты для главной линии  $\gamma$ -спектра, т.е. наибольшая толщина защиты;

$d_{\kappa}$  – следующая по величине после главной линии толщина, соответствующая конкурирующей линии;

$d_{1/2}$  – наибольшее значение из слоев половинного ослабления для главной и конкурирующей линий.

*Мощность поглощенной дозы от точечного источника  $\gamma$ -излучения [5]*

$$P_{\text{погл}} = \frac{A \Gamma_{\delta}}{r^2}, \text{ Гр/с}, \quad (5.9)$$

где  $A$  – активность источника, Бк;

$r$  – расстояние от источника до точки наблюдения, м;

$\Gamma_{\delta}$  – керма-постоянная, численно равная мощности поглощенной дозы в воздухе от точечного изотропного источника  $\gamma$ -излучения активностью 1 Бк на расстоянии 1 м, Гр·м<sup>2</sup>/(Бк·с).

*Керма-постоянная радионуклида, излучающего фотоны нескольких энергетических групп [7]*

$$\Gamma_{\delta} = \frac{1,6 \cdot 10^5}{4\pi} \sum_i \eta_i E_{\gamma i} \left( \frac{\tau_i}{\rho} \right)_{\text{возд}}, \frac{\text{аГр} \cdot \text{м}^2}{\text{Бк} \cdot \text{с}}, \quad (5.10)$$

где  $1,6 \cdot 10^5$  – коэффициент перехода от МэВ к Дж;

$(\tau_i/\rho)_{\text{возд}}$  – массовый коэффициент поглощения  $\gamma$ -излучения  $i$  – группы в воздухе,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;

$E_{\gamma i}$  – энергия  $\gamma$ -кванта  $i$  – группы, МэВ ;

$\eta_i$  – выход  $\gamma$ -квантов  $i$  – группы на один распад;

$\text{аГр} = 10^{-18}$  Гр.

*Мощность эквивалентной дозы от экранированного источника излучения, состоящего из нескольких групп моноэнергетических  $\gamma$ -квантов [5]*

$$P_{\text{экв}} = \frac{k A}{r^2} \sum_i \Gamma_{\delta i} e^{-\mu_i d} B_{Di}, \quad (5.11)$$

где  $\mu_i$  – линейный коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения с  $i$ -ой энергией в материале экрана;

$B_{Di}$  – дозовый фактор накопления рассеянного  $\gamma$ -излучения;

$k \approx 1,09$  – отношение массовых коэффициентов поглощения  $\gamma$ -излучения в биологической ткани и в воздухе.

Значения дозовых факторов приведены в таблице А.10.

*Ослабление плотности потока моноэнергетических нейтронов [6]*

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{(\sigma_p + \sigma_n) \rho d}{m_a}\right), \quad (5.12)$$

где  $\sigma_p$  – микроскопическое сечение рассеяния нейтрона атомом среды;

$\sigma_n$  – микроскопическое сечение поглощения нейтрона атомом среды;

$\rho$  – плотность среды;

$m_a$  – масса атома среды;

$d$  – толщина защиты.

## 5.1 Примеры решения задач

5.1.1 Вычислить пробег  $\alpha$ -частиц с кинетической энергией  $T_\alpha = 5,15$  МэВ, испускаемых  $^{239}\text{Pu}$ , в биологической ткани. Плотность биологической ткани считать равной плотности воды, атомную массу принять  $A = 15,7$  а.е.м.

*Решение.*

Пробег  $\alpha$ -частиц вычисляется по формуле (5.1)

$$R_\alpha = 1,78 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt[3]{15,7} \sqrt{5,15^3}}{1} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 52 \text{ мкм.}$$

5.1.2 На каком минимальном расстоянии от поверхности источника плотность потока  $\alpha$ -частиц с энергией  $T_\alpha = 5$  МэВ в воздухе при нормальных условиях равна нулю независимо от активности источника?

*Решение.*

Это минимальное расстояние равно пробегу  $\alpha$ -частиц в воздухе, который вычисляется по формуле (1.2)

$$l = R_\alpha = 0,31 T_\alpha^{3/2} = 0,31 \cdot 5^{3/2} = 3,47 \text{ см.}$$

5.1.3 Определить энергию опасных для человека  $\alpha$ -частиц, если источник расположен на поверхности тела. Плотность биологической ткани считать равной плотности воды, атомную массу принять  $A = 16$  а.е.м. Толщина нечувствительного слоя кожи равна  $l = 70$  мкм.

*Решение.*

Опасными будут  $\alpha$ -частицы, пробег которых превышает толщину нечувствительного слоя кожи. Используя формулу (5.1), получим

$$T_\alpha = \left( \frac{\rho R_\alpha}{1,78 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{A}} \right)^{2/3} = \left( \frac{1 \cdot 70 \cdot 10^{-4}}{1,78 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt[3]{16}} \right)^{2/3} = 6,2 \text{ МэВ.}$$

5.1.4 Какой толщины алюминиевая фольга полностью поглощает  $\alpha$ -частицы радионуклида  $^{238}\text{Pu}$ ? Кинетическая энергия  $\alpha$ -частиц, испускаемых данным радионуклидом, равна  $T_\alpha = 5,5$  МэВ.

*Решение.*

Полностью поглощаются фольгой  $\alpha$ -частицы, длина пробега которых совпадает с толщиной фольги. По формуле (5.1) эта толщина равна

$$R_\alpha = 1,78 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt[3]{27} \sqrt{5,5^3}}{2,7} = 2,55 \cdot 10^{-3} \text{ см} = 25,5 \text{ мкм.}$$

5.1.5 Обычно в качестве радиоактивных источников  $\gamma$ -квантов используются  $\beta$ -активные изотопы. Если источник  $\beta$ -частиц пометить в стальную капсулу, задерживающую все  $\beta$ -частицы, то такая капсула будет источником  $\gamma$ -излучения. Какова должна быть толщина стенок капсулы для  $^{60}\text{Co}$ , если максимальная энергия  $\beta$ -спектра равна  $T_{\beta \text{ max}} = 1,5$  МэВ?

*Решение.*

Толщина стенок должна быть не меньше пробега  $\beta$ -частиц в стали. Чтобы рассчитать пробег по формуле (5.2), сначала нужно найти массовый пробег в алюминии по формуле (2.9)

$$R_\beta = 0,543 T_{\beta \text{ max}} - 0,163 = 0,543 \cdot 1,5 - 0,163 = 0,65 \text{ г/см}^2.$$

Теперь по формуле (5.2) найдем массовый пробег в стали

$$R_{\text{Fe}} = \frac{0,65 \cdot (13/27)}{(26/56)} = 0,67 \text{ г/см}^2.$$

Разделив полученное значение на плотность стали  $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ , получим линейный пробег, равный толщине стенок капсулы  $d \approx 0,09 \text{ см}$ .

5.1.6 Максимальная энергия  $\beta$ -частиц, испускаемых радионуклидом  $^{90}\text{Y}$ , равна  $T_{\beta \max} = 2,18$  МэВ. Определить пробег  $\beta$ -частиц в воздухе и биологической ткани.

*Решение.*

Найдем пробег  $\beta$ -частиц в воздухе по формуле (5.3)

$$R_{\text{возд}} = 400 \cdot 2,18 = 872 \text{ см.}$$

Пробег в биологической ткани определим из соотношения (5.4)

$$R_{\text{тк}} = \frac{\rho_{\text{возд}} R_{\text{возд}}}{\rho_{\text{тк}}} = \frac{0,00129 \cdot 872}{1} = 1,13 \text{ см.}$$

5.1.7 Толщина слюдяного окошка газоразрядного счетчика составляет  $d = 3$  мг/см<sup>2</sup>. При какой толщине алюминиевого фильтра счетчик перестает регистрировать  $\alpha$ -частицы с энергией менее  $T_{\alpha} = 7$  МэВ? Какая доля  $\beta$ -частиц, испускаемых радионуклидом  $^{65}\text{Zn}$ , поглощается в таком фильтре? Максимальная энергия  $\beta$ -частиц равна  $T_{\beta \max} = 0,325$  МэВ. Массовый коэффициент поглощения  $\beta$ -частиц алюминием  $\mu/\rho = 107$  см<sup>2</sup>/г.

*Решение.*

Сначала определим пробег в алюминии  $\alpha$ -частицы с энергией 7 МэВ по формуле (5.1)

$$R_{\alpha} = 1,78 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt[3]{27} \sqrt{7^3}}{2,7} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

Соответствующий полученному значению массовый пробег составляет  $R'_{\alpha} = 9,88$  мг/см<sup>2</sup>. Если считать, что ионизационные потери энергии  $\alpha$ -частиц в слюде приблизительно равны потерям в алюминии, то массовая толщина фильтра составит

$$l = R'_{\alpha} - d = 9,88 - 3 = 6,88 \text{ мг/см}^2.$$

Или, разделив на плотность алюминия, получим 25 мкм.

Теперь, используя формулу (2.7) определим долю  $\beta$ -частиц, поглощаемых таким фильтром

$$\frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - e^{-\mu d} = 1 - \exp(-107 \cdot 6,88 \cdot 10^{-3}) = 0,52.$$

5.1.8 Мощность экспозиционной дозы без защиты на рабочем месте составляет  $P_{\text{эксн}} = 200$  мР/ч. Найти толщину железного экрана, если источником  $\gamma$ -излучения служит  $^{137}\text{Cs}$ , энергия  $\gamma$ -квантов  $E_\gamma = 0,661$  МэВ, а время работы равно  $t = 25$  ч в неделю.

*Решение.*

Согласно таблице А.11 допустимая годовая доза составляет 20 мЗв. Если принять количество рабочих недель в году равным 50, то допустимая недельная доза будет равна 0,4 мЗв или 40 мбэр. Тогда для допустимой мощности дозы можно записать

$$P_D = 40/t, \text{ мбэр/ч,}$$

где  $t$  – количество часов рабочего времени в неделю.

Поскольку биологические эффекты при дозах в 1 бэр и 1 Р одинаковы, для предельно допустимой мощности экспозиционной дозы имеем

$$P_D = \frac{40}{25} = 1,6 \text{ мР/ч.}$$

Теперь найдем кратность ослабления  $\gamma$ -излучения

$$K = \frac{P_{\text{эксн}}}{P_D} = \frac{200}{1,6} = 125.$$

По таблице А.8, используя линейную интерполяцию, определим толщину защиты. Кратность ослабления  $K = 100$  обеспечивает толщина защиты 11,7 см при энергии кванта 0,6 МэВ и толщина защиты 12,5 см при энергии кванта 0,7 МэВ, тогда при энергии 0,661 МэВ необходима толщина



$$d_{100} = 11,7 + \frac{12,5 - 11,7}{0,7 - 0,6} (0,661 - 0,6) = 12,2 \text{ см.}$$

Кратность ослабления  $K = 200$  обеспечивает толщина защиты 13,1 см при энергии кванта 0,6 МэВ и толщина защиты 14,0 см при энергии кванта 0,7 МэВ, тогда при энергии 0,661 МэВ необходима толщина

$$d_{200} = 13,1 + \frac{14,0 - 13,1}{0,7 - 0,6} (0,661 - 0,6) = 13,65 \text{ см.}$$

Теперь, применяя линейную интерполяцию по кратностям ослабления, определим окончательную толщину защиты

$$d = 12,2 + \frac{13,65 - 12,2}{200 - 100} (125 - 100) = 12,6 \text{ см.}$$

5.1.9 Определить толщину свинцовой защиты от точечного источника  $^{60}\text{Co}$  активностью  $A = 3,7 \cdot 10^9$  Бк. Расстояние от источника до рабочего места  $r = 2$  м, время работы  $t = 36$  часов в неделю.

*Решение.*

Воспользовавшись решением задачи 4.1.12а, определим мощность экспозиционной дозы

$$P_{\text{эксн}} = \frac{3,7 \cdot 10^9}{4\pi \cdot 34 \cdot 2^2} (1,17 \cdot 0,00278 + 1,33 \cdot 0,00261) \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} = 2,3 \text{ нКл/(кг}\cdot\text{с)}$$

или  $P_{\text{эксн}} = 32$  мР/ч.

По формуле, полученной в предыдущей задаче, определим предельно допустимую мощность дозы  $P_D = 40/36 = 1,1$  мР/ч. Тогда кратность ослабления будет равна

$$K = \frac{P_{\text{эксн}}}{P_D} = \frac{32}{1,1} = 30.$$

Так как вклад в мощность дозы обоих квантов одинаков, то толщину защиты можно определять только для кванта с большей энергией  $E_{02} = 1,33$  МэВ. По данным таблицы А.7, воспользовавшись линейной интерполяцией, определим толщину защиты  $d \approx 6,5$  см.

5.1.10 Какой толщины необходим свинцовый экран для снижения мощности дозы  $\gamma$ -излучения  $^{131}\text{I}$  в  $10^3$  раз? Упрощенная схема распада  $^{131}\text{I}$  изображена на рисунке 5.1.

*Решение.*

Как видно из рисунка 5.1, радионуклид  $^{131}\text{I}$  является источником  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_{01} = 637$  кэВ и выходом  $\eta_1 = 0,0717$  и с энергией  $E_{02} = 364$  кэВ и выходом  $\eta_2 = 0,817$ . Найдем вклад каждого из квантов в мощность поглощенной дозы

$$p_i = \frac{P_{\text{полг } i}}{P_{\text{полг}}} = \frac{\eta_i E_{0i} \left(\frac{\tau}{\rho}\right)_i}{\eta_1 E_{01} \left(\frac{\tau}{\rho}\right)_1 + \eta_2 E_{02} \left(\frac{\tau}{\rho}\right)_2}.$$

Массовые коэффициенты поглощения в воздухе находим по таблице А.5  $(\tau/\rho)_1 = 0,0295$  см<sup>2</sup>/г и  $(\tau/\rho)_2 = 0,0295$  см<sup>2</sup>/г. Тогда дозовые вклады составят  $p_1 = 0,13$  и  $p_2 = 0,87$ .

Вычислим кратности ослабления для этих квантов

$$K_1 = K \cdot p_1 = 10^3 \cdot 0,13 = 130,$$

$$K_2 = K \cdot p_2 = 10^3 \cdot 0,87 = 870.$$

Для определения толщин защиты при заданной кратности ослабления можно воспользоваться линейной интерполяцией. Выберем кратности ослабления близкие к найденным, т.е.

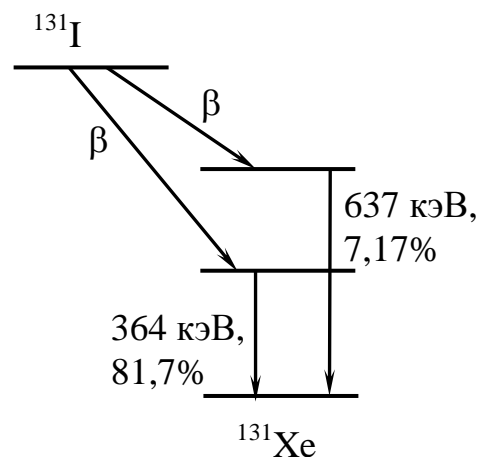


Рисунок 5.1 – Упрощенная схема распада  $^{131}\text{I}$

$K = 100$  и  $200$  для первого кванта и  $K = 500$  и  $1000$  для второго. Согласно таблице А.7 толщина защиты для 100-кратного ослабления  $\gamma$ -излучения с энергией  $0,6$  МэВ составляет  $3,85$  см, а с энергией  $0,7$  МэВ -  $4,7$  см. Тогда толщина защиты от  $\gamma$ -излучения с энергией  $0,637$  МэВ найдется по формуле

$$d_{100} = 3,85 + \frac{4,7 - 3,85}{0,7 - 0,6} (0,637 - 0,6) = 4,2 \text{ см.}$$

Аналогичным образом находим толщину защиты для 200-кратного ослабления

$$d_{200} = 4,4 + \frac{5,3 - 4,4}{0,7 - 0,6} (0,637 - 0,6) = 4,7 \text{ см.}$$

Для второго кванта с энергией  $0,364$  МэВ находим

$$d_{500} = 2,2 + \frac{3,1 - 2,2}{0,4 - 0,3} (0,364 - 0,3) = 2,8 \text{ см,}$$

$$d_{1000} = 2,4 + \frac{3,3 - 2,4}{0,4 - 0,3} (0,364 - 0,3) = 3,0 \text{ см.}$$

Тогда толщина слоя половинного ослабления для первого кванта составляет  $(d_{1/2})_1 = 4,7 - 4,2 = 0,5$  см. Для второго кванта толщина слоя половинного ослабления равна  $(d_{1/2})_2 = 3,0 - 2,8 = 0,2$  см.

Теперь, применяя линейную интерполяцию по кратностям ослабления, определим для первого кванта толщину защиты

$$d_1 = 4,2 + \frac{4,7 - 4,2}{200 - 100} (130 - 100) = 4,35 \text{ см.}$$

Аналогично для второго кванта

$$d_2 = 2,8 + \frac{3,0 - 2,8}{1000 - 500} (870 - 500) = 2,95 \text{ см.}$$

Таким образом, первый квант образует главную линию  $d_r = d_1 = 4,35$  см, а второй – конкурирующую  $d_k = d_2 = 2,95$  см. Вычислим разность толщин защитных экранов

$$d_{\Gamma} - d_{\kappa} = 4,35 - 2,95 = 1,4 \text{ см},$$

что больше толщины половинного ослабления для главной линии. Значит, согласно формуле (5.8)

$$d = d_{\Gamma} = 4,35 \text{ см}.$$

5.1.11 Определить толщину бетонной защиты, снижающей мощность экспозиционной дозы от  $\gamma$ -источника в  $K = 7500$  раз. Источник испускает следующие  $\gamma$ -кванты:  $E_{01} = 2,25$  МэВ (энергия),  $p_1 = 0,015$  (дозовый вклад);  $E_{02} = 1,56$  МэВ,  $p_2 = 0,2$ ;  $E_{03} = 0,76$  МэВ,  $p_3 = 0,647$ ;  $E_{04} = 0,5$  МэВ,  $p_4 = 0,079$ ;  $E_{05} = 0,17$  МэВ,  $p_5 = 0,059$ .

*Решение.*

При расчете толщины защиты кванты  $\gamma_4$  и  $\gamma_5$  с малыми энергиями и выходами можно не учитывать. Вычислим кратности ослаблений для квантов  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$

$$K_1 = K \cdot p_1 = 7500 \cdot 0,015 = 112,5,$$

$$K_2 = K \cdot p_2 = 7500 \cdot 0,2 = 1500,$$

$$K_3 = K \cdot p_3 = 7500 \cdot 0,647 = 4852.$$

По таблице А.9 найдем толщины, соответствующие найденным кратностям ослабления:  $d_1 = 70$  см,  $d_2 = 87$  см,  $d_3 = 75$  см. Наибольшую толщину защиты требуют кванты  $\gamma_2$ . Они образуют главную линию спектра, таким образом  $d_{\Gamma} = d_2$ . Следующая по величине толщина защиты требуется для конкурирующей линии, т.е.  $d_{\kappa} = d_3$ . Определим для главной линии толщину слоя половинного ослабления, как разность толщин защиты между двумя кратностями ослабления, отличающимися в два раза в области требуемой кратности ослабления  $(d_{1/2})_{\Gamma} = 6,85$  см. Для конкурирующей линии имеем  $(d_{1/2})_{\kappa} = 4,4$  см. Вычислим разность

$$d_{\Gamma} - d_{\kappa} = 87 - 75 = 12 \text{ см},$$

которая оказывается выше наибольшего значения из слоев половинного ослабления.

Тогда согласно формулам (5.8)  $d = d_{\Gamma} = 87$  см.

5.1.12 На каком наименьшем расстоянии от источника  $^{65}\text{Zn}$  активностью  $A = 3,7 \cdot 10^8$  Бк можно находиться без защитного экрана в течение  $t = 60$  мин, если предельно допустимая доза составляет  $D_{\text{экв}} = 12$  мкЗв? Упрощенная схема распада  $^{65}\text{Zn}$  приведена на рисунке 5.2.

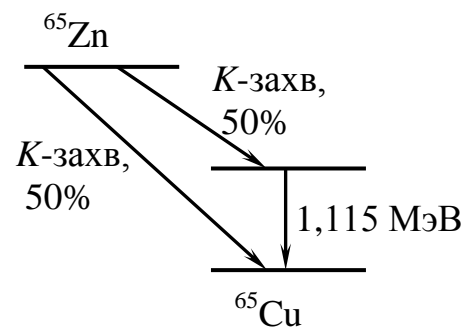


Рисунок 5.2 – Схема распада  $^{65}\text{Zn}$

*Решение.*

Как видно из рисунка, радионуклид  $^{65}\text{Zn}$  является источником  $\gamma$ -излучения с энергией  $E_0 = 1,115$  МэВ, причем количество  $\gamma$ -квантов, приходящихся на один акт захвата составляет  $\eta = 0,5$ .

Согласно решению задачи 4.1.12б мощность экспозиционной дозы находится по формуле

$$P_{\text{эксн}} = \frac{AE_0\eta}{4\pi\alpha r^2} \left( \frac{\tau}{\rho} \right).$$

Учтя связь между поглощенной и экспозиционной дозами (4.6), а также равенство поглощенной и эквивалентной доз для  $\gamma$ -излучения (коэффициент качества равен единице), определим расстояние до источника

$$r = \sqrt{\frac{AE_0\eta t}{4\pi D_{\text{ногл}}} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)}.$$

По таблице А.5 определим массовый коэффициент поглощения  $(\tau/\rho)_{\text{возд}} = 0,00276$  м<sup>2</sup>/кг. Подставив данные в формулу для расстояния, получим

$$r = \sqrt{\frac{3,7 \cdot 10^8 \cdot 1,115 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,5 \cdot 3600 \cdot 0,00276}{4\pi \cdot 12 \cdot 10^{-6}}} \approx 1,5 \text{ м.}$$

5.1.13 Рассчитать эквивалентную дозу, которую получит лаборант, перемещая открытый источник  $^{137}\text{Cs}$ , активностью  $A = 3,7 \cdot 10^8$  Бк по 1 минуте в день. Переме-

шение осуществляется с помощью манипулятора длиной  $r = 0,5$  м в течение 6 дней. Схема распада представлена на рисунке 4.4. Считать, что радионуклид  $^{137}\text{Cs}$  помещен в капсулу, поглощающую  $\beta$ -частицы.

*Решение.*

Препарат  $^{137}\text{Cs}$  является источником  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0 = 0,66$  МэВ. Так как коэффициент качества  $\gamma$ -излучения равен единице, то эквивалентная доза совпадает с поглощенной и может быть найдена по формуле

$$D_{\text{экв}} = \frac{AE_0\eta t}{4\pi r^2} \left( \frac{\tau}{\rho} \right),$$

в которую нужно подставить массовый коэффициент поглощения для воды, поскольку свойства биологической ткани близки к свойствам воды  $(\tau/\rho) = 0,00325$  м<sup>2</sup>/кг. Вычисления дают

$$D_{\text{экв}} = \frac{3,7 \cdot 10^8 \cdot 0,66 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,85 \cdot 60 \cdot 6 \cdot 0,00325}{4\pi \cdot 0,5^2} = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Зв.}$$

5.1.14 Найти отношение мощностей поглощенных доз в воздухе, создаваемых  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучением точечного изотропного источника  $^{60}\text{Co}$  на расстоянии  $r = 10$  см от него. Схема распада приведена на рисунке 4.4а. Максимальная кинетическая энергия  $\beta$ -частиц, испускаемых источником, равна  $T_{\beta \text{ max}} = 0,31$  МэВ, максимальный массовый пробег электрона в воздухе принять равным  $0,076$  г/см<sup>2</sup>.

*Решение.*

Мощность экспозиционной дозы, создаваемой  $\gamma$ -излучением определяется формулой, полученной в решении задачи 4.1.12

$$P_{\text{эксн}} = \frac{A}{4\pi\alpha r^2} \left( E_{01} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_1 + E_{02} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_2 \right),$$

где  $E_{01} = 1,17$  МэВ и  $E_{02} = 1,33$  МэВ – энергии  $\gamma$ -квантов;

$(\tau/\rho)_1 \approx 0,0268 \text{ см}^2/\text{Г}$  и  $(\tau/\rho)_2 \approx 0,0261 \text{ см}^2/\text{Г}$  – массовые коэффициенты поглощения  $\gamma$ -излучения в воздухе.

Тогда мощность поглощенной дозы составит

$$P_{\text{погл } \gamma} = \frac{A}{4\pi r^2} \left( E_{01} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_1 + E_{02} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_2 \right).$$

Для определения мощности поглощенной дозы от  $\beta$ -излучения воспользуемся формулой (5.6).

$$P_{\text{погл } \beta} = \frac{A(0,4T_{\beta \text{ max}})e^{-\mu r}}{4\pi r^2 R},$$

где  $R$  – максимальный массовый пробег электрона с  $T_{\beta \text{ max}}$  в воздухе.

Отношение поглощенных доз выражается формулой

$$\frac{P_{\text{погл } \beta}}{P_{\text{погл } \gamma}} = \frac{0,4T_{\beta \text{ max}}e^{-\mu r}}{\left( E_{01} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_1 + E_{02} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_2 \right) R}.$$

По формуле (2.8) вычислим массовый коэффициент поглощения  $\beta$ -частиц с максимальной энергией  $T_{\beta \text{ max}} = 0,31 \text{ МэВ}$

$$\frac{\mu}{\rho} = 22T_{\beta \text{ max}}^{-4/3} = 22 \cdot 0,31^{-4/3} = 104,9 \text{ см}^2/\text{Г}.$$

Умножив на плотность воздуха  $\rho = 1,293 \cdot 10^{-3} \text{ г}/\text{см}^3$ , получим линейный коэффициент поглощения  $\mu = 104,9 \cdot 1,293 \cdot 10^{-3} = 0,136 \text{ см}^{-1}$ .

Подставим все данные в формулу отношения мощностей поглощенных доз (заметим, что энергии можно подставлять в МэВ, поскольку вычисляется отношение), получим

$$\frac{P_{\text{погл } \beta}}{P_{\text{погл } \gamma}} = \frac{0,4 \cdot 0,31 \cdot e^{-0,136 \cdot 10}}{(1,17 \cdot 0,00268 + 1,33 \cdot 0,00261) \cdot 0,76} \approx 6,3.$$

5.1.15 С помощью манипулятора длиной  $r = 0,5$  м необходимо перенести источник  $^{60}\text{Co}$  активностью  $A = 2 \cdot 10^{10}$  Бк из одного контейнера в другой. Определить безопасное для лаборанта время выполнения этой процедуры. Считать, что другие работы с источником в этот день не проводятся.

*Решение.*

Сначала определим предельно допустимую дневную дозу. Согласно таблице А.11 годовая доза не должна превышать 20 мЗв. Если в году 1700 рабочих часов, то полученная доза за час не должна превосходить 12 мкЗв. Тогда при шестичасовом рабочем дне допустимая дневная доза равна 72 мкЗв. Поскольку по условию задачи других манипуляций в этот день не предусмотрено, то эту дневную дозу допустимо получить за время работы с источником, т.е.  $D_{\text{экв}} = 7,2 \cdot 10^{-5}$  Зв.

Для  $\gamma$ -излучения эквивалентная доза совпадает с поглощенной дозой, полученной лаборантом за время переноса источника из одного контейнера в другой, и определяется формулой

$$D_{\text{экв}} = \frac{At}{4\pi r^2} \left( E_{01} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_1 + E_{02} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_2 \right),$$

где  $E_{01} = 1,17$  МэВ и  $E_{02} = 1,33$  МэВ – энергии  $\gamma$ -квантов;

$(\tau/\rho)_1 \approx 0,0301$  см<sup>2</sup>/г и  $(\tau/\rho)_2 \approx 0,0292$  см<sup>2</sup>/г – массовые коэффициенты поглощения  $\gamma$ -излучения биологической тканью. См. решение задачи 4.1.12.

Выразим из этой формулы время работы

$$t = \frac{4\pi r^2 D_{\text{экв}}}{A \left( E_{01} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_1 + E_{02} \left( \frac{\tau}{\rho} \right)_2 \right)}.$$

Подставим значения величин, получим

$$t = \frac{4\pi \cdot 0,5^2 \cdot 7,2 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 10^{10} (1,17 \cdot 0,00301 + 1,33 \cdot 0,00292) \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 9,5 \text{ с.}$$



5.1.16 Источник  $\gamma$ -излучения представляет собой шаровой слой толщины  $d$ , как показано на рисунке 5.3. Объемная активность источника равна  $a_V$ , линейный коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения в материале источника равен  $\mu$ . Вывести формулу для расчета мощности поглощенной дозы в точке  $O$ .

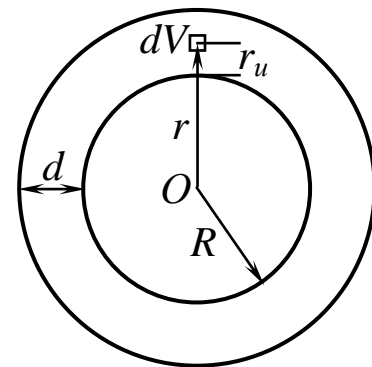


Рисунок 5.3 – Геометрия задачи

*Решение.*

Выделим в источнике элемент объема  $dV$ , отстоящий от центра  $O$  на расстояние  $r$  и будем считать его точечным источником. Мощность поглощенной дозы от точечного источника определяется формулой (5.9), в которой нужно учесть ослабление в самом источнике

$$dP_{\text{погл}} = \frac{a_V dV \Gamma_\delta}{r^2} e^{-\mu r_u},$$

где  $r_u$  – расстояние от внутреннего радиуса шарового слоя до выделенного элемента объема, как показано на рисунке 5.3.

Чтобы определить мощность от всего источника, подставим в  $dP_{\text{погл}}$  элемент объема в сферических координатах  $dV = r^2 dr \sin \theta d\theta d\varphi$  и проинтегрируем по объему шарового слоя

$$P_{\text{погл}} = \int_V \frac{a_V dV \Gamma_\delta}{r^2} e^{-\mu r_u} = 4\pi a_V \Gamma_\delta \int_R^{R+d} e^{-\mu r_u} dr.$$

Сделав в интеграле замену  $r_u = r - R$ , получим окончательное выражение для мощности поглощенной дозы

$$P_{\text{погл}} = \frac{4\pi a_V \Gamma_\delta}{\mu} (1 - e^{-\mu d}).$$

5.1.17 Воспользовавшись результатом предыдущей задачи, оценить мощность эквивалентной дозы, получаемую человеком, проживающим в помещении, постро-

енном из бетона, содержащего изотоп  $^{40}\text{K}$  с удельной активностью  $a = 529$  Бк/кг. Толщину пола, стен и потолка считать одинаковой и равной  $d = 0,25$  м. Плотность бетона принять равной  $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup> и использовать массовые коэффициенты ослабления для алюминия. Схема распада  $^{40}\text{K}$  приведена на рисунке 3.2.

*Решение.*

Воспользуемся приближением сферического источника, т.е. заменим реальную геометрию комнаты сферическим слоем. Как видно из рисунка 3.2, выход  $\gamma$ -квантов на один распад составляет  $\eta = 0,11$ . Выразим объемную активность через удельную  $a_V = ar$  и учтем, что для  $\gamma$ -излучения мощности поглощенной и эквивалентной доз одинаковы. Тогда, воспользовавшись формулой, полученной в предыдущей задаче, можем записать

$$P_{\text{экв}} = \frac{4\pi ar\Gamma_{\delta}}{\mu} (1 - e^{-\mu d}).$$

Определим по таблице А.5 массовый коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения с энергией  $E = 1,46$  МэВ алюминием  $(\mu/\rho)_{\text{Al}} \approx 0,051$  см<sup>2</sup>/г. Умножив на плотность бетона, получим линейный коэффициент ослабления  $\mu = 0,092$  см<sup>-1</sup>. По формуле (5.10) рассчитаем керма-постоянную

$$\Gamma_{\delta} = \frac{1,6 \cdot 10^5 \cdot 0,11 \cdot 1,46 \cdot 0,00254}{4\pi} = 5 \frac{a\Gamma p \cdot \text{м}^2}{\text{Бк} \cdot \text{с}}.$$

Подставив значения величин в формулу мощности эквивалентной дозы, получим

$$P_{\text{экв}} = \frac{4\pi \cdot 529 \cdot 1800 \cdot 5 \cdot 10^{-18}}{9,2} (1 - e^{-9,2 \cdot 0,25}) = 5,8 \text{ пЗв/с}.$$

5.1.18 На расстоянии  $r = 1,44$  м от точечного изотропного источника  $^{137}\text{Cs}$  активностью  $A = 1,7 \cdot 10^{11}$  Бк находится свинцовая пластина толщиной  $d = 6$  см. Какова мощность эквивалентной дозы от  $\gamma$ -излучения источника на внешней по отношению к источнику поверхности пластины?

*Решение.*

Препарат  $^{137}\text{Cs}$  является источником  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_0 = 0,66$  МэВ (схема распада приведена на рисунке 4.4). Вычислим керма-постоянную по формуле (5.10), числовые значения величин возьмем из решения задачи 4.1.12

$$\Gamma_{\delta} = \frac{1,6 \cdot 10^5 \cdot 0,66 \cdot 0,85 \cdot 0,00292}{4\pi} = 21 \frac{a\Gamma p \cdot m^2}{\text{Бк} \cdot \text{с}}.$$

По таблице А.5 определим массовый коэффициент ослабления  $\gamma$ -излучения в свинце  $\mu/\rho = 0,109$  см<sup>2</sup>/г. Умножив на плотность свинца, найдем линейный коэффициент ослабления  $\mu = 1,23$  см<sup>-1</sup>. Дозовый фактор накопления определим по таблице А.10  $V_D = 2,16$ .

Тогда, подставив в формулу (5.11) найденные значения величин, вычислим мощность эквивалентной дозы

$$P_{\text{экв}} = \frac{1,09 \cdot 1,7 \cdot 10^{11} \cdot 21 \cdot 10^{-18} \cdot e^{-1,23 \cdot 6} \cdot 2,16}{1,44^2} = 2,5 \text{ нЗв/с}.$$

5.1.19 Параллельный пучок нейтронов падает нормально на лист кадмия толщиной  $d = 1$  мм. Во сколько раз уменьшается плотность потока нейтронов после прохождения листа.

*Решение.*

Пренебрегая рассеянием нейтронов ядрами кадмия по сравнению с поглощением, выразим из формулы (5.12) кратность ослабления плотности потока нейтронов

$$K = \frac{J_0}{J} = \exp\left(\frac{\sigma_n \rho d}{m_{\text{ат}}}\right).$$

Сечение поглощения нейтронов ядрами кадмия приводится в таблице А.6 и составляет  $\sigma_n = 2450$  б, плотность кадмия равна  $\rho = 8,64$  г/см<sup>3</sup>. Подставив в формулу значения величин, получим

$$K = \exp\left(\frac{2450 \cdot 10^{-24} \cdot 8,64 \cdot 0,1}{112 \cdot 1,66 \cdot 10^{-24}}\right) = 8,8 \cdot 10^4.$$

5.1.20 Предельно допустимая плотность потока нейтронов составляет  $J_D = 22 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Какой толщины требуется защита из парафина для снижения плотности потока нейтронов  $J_0 = 10^5 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$  до предельно допустимого значения. Принять слой половинного ослабления равным  $d_{1/2} = 7 \text{ см}$ .

*Решение.*

Вычислим кратность ослабления плотности потока нейтронов

$$K = J_0/J = 10^5/22 = 4,5 \cdot 10^3.$$

Найдем количество слоев половинного ослабления  $n$ , обеспечивающего эту кратность. Выразим искомую толщину парафина через толщину слоя половинного ослабления  $d = d_{1/2}n$ , тогда формула кратности примет вид

$$K = \frac{J_0}{J} = \exp\left(\frac{(\sigma_p + \sigma_n) \rho d_{1/2} n}{m_a}\right).$$

Заметим, что

$$\exp\left(\frac{(\sigma_p + \sigma_n) \rho d_{1/2}}{m_a}\right) = 2,$$

тогда

$$K = 2^n \text{ и } n = \ln K / \ln 2 = \ln(4,5 \cdot 10^3) / 0,693 = 12.$$

Необходимая толщина защиты будет равна  $d = 7 \cdot 12 = 84 \text{ см}$ .

## 5.2 Задачи для самостоятельного решения

5.2.1 Точечный изотропный источник  $\alpha$ -частиц находится в биологической ткани. Определить мощность поглощенной дозы в ткани, если активность источника  $A = 10^4$  Бк, кинетическая энергия  $\alpha$ -частиц  $T_\alpha = 6$  МэВ, плотность ткани  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>, массовый пробег  $\alpha$ -частиц  $R_\alpha = 0,0056$  г/см<sup>2</sup>.

*Ответ.*  $P_{\text{погл}} = 13$  Гр/с.

5.2.2 Пробег  $\alpha$ -частиц с кинетической энергией  $T_\alpha = 5,3$  МэВ в воде составляет  $R_\alpha = 46$  мкм. Какова мощность поглощенной дозы, создаваемой в воде плоскопараллельным потоком  $\alpha$ -частиц с плотностью  $J = 4 \cdot 10^5$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

*Ответ.*  $P_{\text{погл}} = 74$  мГр/с.

5.2.3 Радионуклид, испускающий  $\alpha$ -частицы, равномерно распределен в биологической ткани массой  $m = 2$  г. Определить мощность эквивалентной дозы в ткани, если активность источника  $A = 10^3$  Бк, кинетическая энергия  $\alpha$ -частиц  $T_\alpha = 7$  МэВ, плотность ткани  $\rho = 1$  г/см<sup>3</sup>, пробег  $\alpha$ -частиц  $R_\alpha = 70$  мкм.

*Ответ.*  $P_{\text{экв}} = 1,12 \cdot 10^{-5}$  Зв/с.

5.2.4 Пробег  $\alpha$ -частиц с кинетической энергией  $T_\alpha = 10$  МэВ в биологической ткани составляет  $R_\alpha = 0,013$  г/см<sup>2</sup>. Какова предельно допустимая плотность потока  $\alpha$ -частиц на ладони? Предельно допустимая эквивалентная доза при облучении кистей рук равна 500 мЗв в год.

*Ответ.*  $J_D = 0,033$  см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>.

5.2.5 Максимальный массовый пробег  $\beta$ -частиц с максимальной кинетической энергией  $T_{\beta \text{ max}} = 1,71$  МэВ в биологической ткани равен  $R_\beta = 780$  мг/см<sup>2</sup>. Какова предельно допустимая плотность потока  $\beta$ -частиц? Предельно допустимая мощ-

ность эквивалентной дозы равна 12 мкЗв/ч. Средняя кинетическая энергия  $\beta$ -частиц составляет  $0,4 T_{\beta \max}$ .

*Ответ.*  $J = 24 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

5.2.6 На коже руки экспериментатора препарат, содержащий радионуклид, являющийся источником  $\beta$ -частиц с максимальной кинетической энергией  $T_{\beta \max} = 1,71 \text{ МэВ}$ , образовал пятно площадью  $S = 2 \text{ см}^2$  и активностью  $A = 10^4 \text{ Бк}$ . Определить плотность потока и плотность потока энергии  $\beta$ -частиц, считая что средняя кинетическая энергия  $\beta$ -частиц составляет  $0,4 T_{\beta \max}$ .

*Ответ.*  $J = 5 \cdot 10^3 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $J_E = 3,4 \cdot 10^3 \text{ МэВ}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}^1)$ .

5.2.7 В лаборатории в течение  $t = 3 \text{ ч}$  ежедневно ведется работа с  $\beta$ -источником. Мощность поглощенной дозы составляет  $P_{\text{ногл}} = 0,5 \text{ мкГр/ч}$ . Какова эквивалентная доза за неделю?

*Ответ.*  $D_{\text{экв}} = 9 \text{ мкЗв}$ .

5.2.8 Три исследователя получили в течение часа одинаковую дозу  $P_{\text{ногл}} = 100 \text{ мкГр}$ . Первый из них работал только с источником позитронов, второй – с источником рентгеновского излучения, третий – с источником быстрых нейтронов. Какой из исследователей и почему подвергся большему воздействию ионизирующего излучения?

*Ответ.* Третий исследователь.

5.2.9 На каком расстоянии от точечного источника  $\beta$ -частиц с максимальной кинетической энергией  $T_{\beta \max} = 1,71 \text{ МэВ}$  можно находиться сотрудникам, если активность источника  $A = 0,5 \text{ МБк}$ ? Работа ведется в течение  $t = 6 \text{ ч}$  ежедневно. Какова плотность потока  $\beta$ -частиц на этом расстоянии от источника?

*Ответ.*  $r = 0,4 \text{ м}$ ,  $J = 8,6 \cdot 10^4 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

5.2.10 Оценить эквивалентную дозу внутреннего облучения, получаемую человеком за год от  $\beta$ -излучения радионуклида  $^{40}\text{K}$ , схема распада которого приведена на рисунке 3.2. Максимальная кинетическая энергия  $\beta$ -частиц равна  $T_{\beta \text{ max}} = 1,3 \text{ МэВ}$ , период полураспада  $^{40}\text{K}$  равен  $T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$  лет. Считать распределение радионуклида в организме равномерным. Масса человека  $m = 70 \text{ кг}$ , масса калия  $m_{\text{K}} = 140 \text{ г}$ . Содержание  $^{40}\text{K}$  в природной смеси изотопов составляет 0,0118%. Средняя кинетическая энергия  $\beta$ -частиц составляет  $0,4 T_{\beta \text{ max}}$ .

*Ответ.*  $D_{\text{экв}} = 0,16 \text{ мЗв}$ .

5.2.11 Какова толщина свинцового экрана, который ослабляет плотность потока энергии  $\gamma$ -излучения точечного изотропного источника  $^{65}\text{Zn}$  в 5000 раз? Схема распада  $^{65}\text{Zn}$  приведена на рисунке 5.2.

*Ответ.*  $d = 13,6 \text{ см}$ .

5.2.12 Радионуклид  $^{134}\text{Cs}$  является источником трех основных групп  $\gamma$ -квантов с энергиями  $E_{\gamma 1} = 0,567 \text{ МэВ}$  (выход  $\eta_1 = 0,23$ ),  $E_{\gamma 2} = 0,604 \text{ МэВ}$  (выход  $\eta_2 = 0,97$ ),  $E_{\gamma 3} = 0,797 \text{ МэВ}$  (выход  $\eta_3 = 0,93$ ). Используя метод конкурирующих линий, определить минимальную толщину экрана из свинца, обеспечивающего безопасные условия работы на расстоянии  $r = 50 \text{ см}$  от источника активностью  $A = 4 \cdot 10^9 \text{ Бк}$ .

*Ответ.*  $d = 6,7 \text{ см}$ .

5.2.13 Найти отношение поглощенных доз, создаваемых в воздухе  $\beta$ - и  $\gamma$ -излучениями радионуклида  $^{203}\text{Hg}$  на расстоянии  $r = 10 \text{ см}$  от точечного источника активностью  $A = 10^7 \text{ Бк}$  в течение  $t = 2 \text{ ч}$ . Радионуклид  $^{203}\text{Hg}$  является источником электронов с максимальной кинетической энергией  $T_{\beta \text{ max}} = 0,212 \text{ МэВ}$  и выходом  $\eta_{\beta} = 1$  и  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_{\gamma} = 0,279 \text{ МэВ}$  и выходом  $\eta_{\gamma} = 0,92$ . Массовый пробег электрона в воздухе принять равным  $0,042 \text{ г/см}^2$ .

*Ответ.*  $D_{\beta}/D_{\gamma} = 31$ .

5.2.14 По сколько минут в неделю можно работать без защиты на расстоянии  $r = 40$  см от точечного источника  $\gamma$ -излучения активностью  $A = 200$  МБк, если работа проводится в течение года регулярно (1700 рабочих часов)? Керма-постоянная источника равна  $\Gamma_{\delta} = 70$  аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк).

*Ответ.* По 74 мин.

5.2.15 Строительный материал стен потолка и пола жилого помещения содержит радионуклиды <sup>40</sup>К с удельной активностью  $a = 529$  Бк/кг и <sup>226</sup>Ra с удельной активностью  $a = 333$  Бк/кг. Оценить годовую эквивалентную дозу, получаемую человеком в таком помещении. Годовое время пребывания в помещении  $t = 6000$  ч, средняя толщина стен, пола и потолка  $d = 25$  см, плотность строительного материала  $\rho = 1800$  кг/м<sup>3</sup>. Схема распада <sup>40</sup>К изображена на рисунке 3.2. Указание: принять, что основной вклад в дозу облучения, полученную от радия и продуктов его распада, вносят  $\gamma$ -кванты с энергией  $E_0 = 0,609$  МэВ с выходом  $\eta = 0,48$ ; использовать массовые коэффициенты ослабления для алюминия.

*Ответ.*  $D_{\text{экв}} = 0,24$  мЗв.

5.2.16 Некоторый радионуклид испускает позитроны с выходом на распад  $\eta = 1$ . Вычислить керма-постоянную этого радионуклида, предполагая, что все позитроны аннигилируют в материале источника.

*Ответ.*  $\Gamma_{\delta} = 38,7$  аГр·м<sup>2</sup>/(с·Бк).

5.2.17 Источник  $\gamma$ -квантов с энергией  $E_{\gamma} = 320$  кэВ создает в биологической ткани мощность эквивалентной дозы  $P_{\text{экв}} = 0,01$  Зв/ч. Определить плотность потока  $\gamma$ -квантов.

*Ответ.*  $J = 1,9 \cdot 10^6$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>.

5.2.18 В лаборатории имеется кадмиевая фольга толщиной  $d = 0,5$  мм. Ослабит ли один слой такой фольги поток тепловых нейтронов в 100 раз?

*Ответ.* Да, т.к. кратность ослабления  $K = 290$ .



5.2.19 Определить максимальную мощность  $Q$  источника нейтронов с кинетической энергией  $T_n = 5$  Мэв, с которым можно безопасно работать на расстоянии  $d = 0,66$  м. Предельно допустимая плотность потока нейтронов составляет  $J_D = 18 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ .

*Ответ.*  $Q = 10^6 \text{ с}^{-1}$ .

5.2.20 Требуется ли установка защитного экрана, если на рабочем месте мощность эквивалентной дозы от источников ионизирующих излучений составляет  $P_{\text{экв}} = 2,3$  нЗв/с? Доза облучения распределяется по году равномерно. Работа проводится в течение  $t = 1700$  ч в году. Ответ подтвердите расчетами.

*Ответ.* Не требуется.  $D_{\text{экв}} = 14$  мЗв.

## Список использованных источников

1. **Сивухин, Д.В.** Общий курс физики. Т5 / Д.В. Сивухин - М.: ФИЗМАТЛИТ; Изд-во МФТИ, 2002. - 784 с. - ISBN 5-9221-0230-3.
2. **Иродов, И.Е.** Атомная и ядерная физика: сборник задач / И.Е.Иродов. – СПб.:Лань, 2002.-288с. - ISBN 5-9511000-1-1.
3. **Черняев, А.П.** Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом / А.П. Черняев. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. - 152 с. - ISBN 5-9221-0432-2.
4. **Жуковский, Ю.Г.** Практикум по ядерной физике / Ю.Г. Жуковский, В.О. Сергеев, Н.М. Антоньева. - М.: Высш. шк., 1975. - 197с. - ISBN 200000946032.
5. **Климанов, А.В.** Сборник задач по теории переноса, дозиметрии и защите от ионизирующих излучений: Учебное пособие / А.А. Званцев, В.А. Климанов, А.И. Ксенофонтов, Н.Н. Могиленец, М.П. Панин, В.В. Смирнов; под ред. В.А. Климанова. - М.: НИЯУ МИФИ, 2011. -196 с. - ISBN 978-5-7262-1487-0.
6. **Шаров, Ю.Н.** Дозиметрия и радиационная безопасность / Ю.Н. Шаров, Н.В. Шубин – М.:Энергоатомиздат, 1991. – 280с. - ISBN 5-283-03837-8.
7. **Афанасов, М.И.** Основы радиохимии и радиоэкологии. Сборник задач. Учебное пособие / М.И. Афанасов, А.А. Абрамов, С.С. Бердоносков - М.: химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. – 116 с.
8. **Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы.** - М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. - 100 с.

## Приложение А

(справочное)

Таблица А.1 – Основные физические постоянные

Скорость света в вакууме	$c = 2,998 \cdot 10^{10} \text{ см/с}$
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Универсальная газовая постоянная	$R = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$
Постоянная Больцмана	$k = \begin{cases} 1,3807 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/К} \\ 1,3807 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К} \\ 0,8617 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К} \end{cases}$
Элементарный заряд	$e = \begin{cases} 4,803 \cdot 10^{-10} \text{ СГСЭ} \\ 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \end{cases}$
Масса покоя электрона	$m_e = \begin{cases} 0,911 \cdot 10^{-27} \text{ г} \\ 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ а.е.м.} \\ 0,511 \text{ МэВ} \end{cases}$
Масса покоя протона	$m_p = \begin{cases} 1,6726 \cdot 10^{-24} \text{ г} \\ 1,007276 \text{ а.е.м.} \\ 938,28 \text{ МэВ} \end{cases}$
Постоянная Планка	$\hbar = \begin{cases} 1,0546 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с} \\ 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ 0,6582 \cdot 10^{-15} \text{ эВ} \cdot \text{с} \end{cases}$
Классический радиус электрона	$r_e = e^2 / m_e c^2 = 2,81794 \cdot 10^{-13} \text{ см}$

Таблица А.2 – Соотношения между единицами измерения некоторых физических величин [2]

Наименование величины	Единицы измерения
Масса	$1 \text{ а.е.м.} = \begin{cases} 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г} \\ 931,5 \text{ МэВ} \end{cases}$
Энергия	$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$
Активность	$1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$
Сечение процесса	$1 \text{ б} = 10^{-24} \text{ см}^2$
Индукция магнитного поля	$1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}$
Давление	$1 \text{ мм.рт.ст.} = 133,3 \text{ Па}$ $1 \text{ атм} = 101,3 \text{ кПа}$
Расстояние	$1 \text{ фм} = 10^{-13} \text{ см}$ $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ см}$
Время	$1 \text{ год} = 3,11 \cdot 10^7 \text{ с}$
Экспозиционная доза	$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$

Таблица А.3 – Плотность некоторых веществ [2]

Вещество	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Вещество	Плотность, г/см <sup>3</sup>
Алюминий	2,7	Олово	7,4
Бериллий	1,85	Платина	21,5
Бор	2,45	Плутоний	19,8
Ванадий	5,87	Ртуть	13,6
Вода	1,0	Свинец	11,3
Воздух (н.у.)	$1,293 \cdot 10^{-3}$	Серебро	10,5
Графит	1,6	Тяжелая вода	1,1
Железо	7,8	Уран	19,0
Золото	19,3	Фосфор	1,83
Кремний	2,35	Цезий	1,87
Медь	8,9	Цинк	7,0

Таблица А.4 – Коэффициенты качества различных видов излучения [3]

Вид излучения	К
Рентгеновское и $\gamma$ -излучения	1
Электроны	1
Протоны	10
$\alpha$ -частицы	20
Медленные нейтроны (50 – 100 кэВ)	3
Быстрые нейтроны (> 50 кэВ)	10
Тяжелые ионы	20

Таблица А.5 - Массовые коэффициенты ослабления  $\mu/\rho$  и поглощения  $\tau/\rho$   $\gamma$ -излучения,  $\text{см}^2/\text{г}$  [2]

Энергия, МэВ	Al		Pb		H <sub>2</sub> O		воздух	
	$\mu/\rho$	$\tau/\rho$	$\mu/\rho$	$\tau/\rho$	$\mu/\rho$	$\tau/\rho$	$\mu/\rho$	$\tau/\rho$
0,1	0,169	0,0371	5,46	2,16	0,171	0,0253	0,155	0,0233
0,2	0,122	0,0275	0,942	0,586	0,137	0,0299	0,123	0,0269
0,4	0,0927	0,0287	0,220	0,136	0,106	0,0328	0,0953	0,0295
0,6	0,0779	0,0286	0,119	0,0684	0,0896	0,0329	0,0804	0,0295
0,8	0,0683	0,0278	0,0866	0,0477	0,0786	0,0321	0,0706	0,0288
1,0	0,0614	0,0269	0,0703	0,0384	0,0706	0,0310	0,0635	0,0276
1,5	0,0500	0,0246	0,0550	0,0280	0,0590	0,0283	0,0515	0,0254
2,0	0,0431	0,0227	0,0463	0,0248	0,0493	0,0260	0,0445	0,0236
3,0	0,0360	0,0201	0,0410	0,0238	0,0390	0,0227	0,0360	0,0211
4,0	0,0310	0,0188	0,0421	0,0253	0,0339	0,0204	0,0307	0,0193
6,0	0,0264	0,0174	0,0436	0,0287	0,0275	0,0178	0,0250	0,0173
8,0	0,0229	0,0169	0,0458	0,0310	0,0240	0,0163	0,0220	0,0163

Таблица А.6 – Микроскопические сечения рассеяния и поглощения нейтронов ядрами, б [6]

Элемент	H	Be	B	C	Fe	Cd
$\sigma_s$	38	7	4	4,8	11	7
$\sigma_a$	0,33	0,001	755	0,037	2,53	2450

Таблица А.7 – Толщина защиты из свинца в зависимости от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения, см [6]

Кратность ослабления	Энергия $\gamma$ -излучения, МэВ													
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2
2	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0	1,15	1,3	1,5	1,7	1,85	2
5	0,2	0,4	0,6	0,9	1,1	1,5	1,9	2,2	2,5	2,8	3,4	3,8	4,1	4,3
10	0,3	0,55	0,9	1,3	1,6	2,1	2,6	3,05	3,5	3,8	4,5	5,1	5,6	5,9
20	0,3	0,6	1,1	1,5	2,0	2,6	3,25	3,85	4,4	4,9	5,8	6,6	7,2	7,6
50	0,4	0,85	1,4	1,95	2,6	3,25	3,95	4,6	5,3	6,0	7,2	8,2	9,0	9,6
100	0,5	1,0	1,6	2,3	3,0	3,85	4,7	5,5	6,3	7,0	8,45	9,65	10,6	11,3
200	0,6	1,25	1,9	2,6	3,4	4,4	5,3	6,3	7,2	8,0	9,65	11,1	12,2	12,9
500	0,65	1,4	2,2	3,1	4,0	5,1	6,1	7,2	8,2	9,2	11,3	12,9	14,2	15,0
1000	0,7	1,5	2,4	3,3	4,4	5,7	6,95	8,1	9,2	10,2	12,3	14,1	15,5	16,5
2000	0,85	1,7	2,7	3,8	5,0	6,3	7,6	8,8	10,0	11,1	13,5	15,4	16,8	17,9
5000	0,9	1,9	3,0	4,2	5,5	7,0	8,5	9,9	11,2	12,4	14,9	17,0	18,6	19,8
10000	1,05	2,1	3,3	4,55	5,9	7,5	9,1	10,6	12,0	13,3	16,1	18,3	20,1	21,3

Таблица А.8 – Толщина защиты из железа в зависимости от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения, см [6]

Кратность ослабления	Энергия $\gamma$ -излучения, МэВ													
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2
2	0,7	1,2	1,7	2,2	2,5	2,7	2,9	3,1	3,2	3,3	3,45	3,6	3,8	3,9
5	1,4	2,5	3,4	4,1	4,8	5,1	5,5	5,7	6,1	6,4	6,9	7,4	7,8	8,1
10	1,9	3,5	4,6	5,6	6,3	6,8	7,3	7,7	8,1	8,5	9,3	10,0	10,6	11,0
20	2,3	4,3	5,7	6,8	7,7	8,3	8,8	9,4	9,8	10,3	11,3	12,2	13,0	13,6
50	2,9	5,2	7,1	8,4	9,5	10,3	11,0	11,6	12,2	12,7	13,9	15,1	16,1	16,9
100	3,4	6,1	8,1	9,6	10,8	11,7	12,5	13,2	13,9	14,5	16,1	17,3	18,5	19,5
200	4,2	7,0	9,1	10,7	12,0	13,1	14,0	14,8	15,6	16,3	18,0	19,6	20,8	22,0
500	4,4	7,7	10,1	12,0	13,7	14,9	16,0	17,0	17,9	18,7	20,6	22,3	23,7	25,0
1000	4,5	8,2	11,0	13,2	15,0	16,3	17,5	18,6	19,6	20,5	22,6	24,4	26,1	27,5
2000	4,9	9,0	11,1	14,4	16,2	17,7	19,0	20,2	21,2	22,2	24,5	26,5	28,3	30,0
5000	5,6	10,1	13,4	15,8	17,7	19,3	20,7	22,0	23,2	24,3	27,0	29,4	31,4	33,3
10000	6,8	11,5	14,7	17,1	19,0	20,7	22,3	23,6	24,9	26,0	28,8	31,3	33,6	35,5

Таблица А.9 – Толщина защиты из бетона в зависимости от кратности ослабления и энергии  $\gamma$ -излучения, см [6]

Кратность ослабления	Энергия $\gamma$ -излучения, МэВ														
	0,1	14,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,25	1,5	1,75	2	3
2	4,7	28,2	9,9	11,3	12,3	12,4	12,4	12,6	12,7	12,9	13,3	13,6	13,8	14,1	15,3
5	5,6	43,4	15,5	18,8	21,1	21,8	22,3	22,6	23,0	23,5	24,6	25,8	27,0	28,2	32,9
10	8,2	47,0	19,7	23,7	25,8	26,8	27,8	28,4	29,1	29,9	31,9	34,0	35,9	43,4	47,5
20	8,2	58,1	21,4	25,8	29,9	31,9	33,6	35,0	36,2	37,0	39,9	42,5	44,8	47,0	54,0
50	9,9	65,7	25,1	30,8	35,0	37,6	39,4	41,2	42,8	44,6	48,5	52,1	55,2	58,1	66,3
100	11,5	74,0	28,9	35,2	39,9	43,0	45,3	47,2	48,8	50,5	54,5	58,3	62,2	65,7	77,5
200	12,7	84,5	32,4	39,2	44,6	47,9	50,5	52,6	54,6	56,4	60,8	65,3	69,7	74,0	88,0
500	13,8	92,7	35,2	43,9	50,5	54,5	57,3	58,8	62,5	64,6	69,8	74,8	79,8	84,5	101,0
1000	15,5	100,4	39,2	48,1	55,2	59,2	62,5	65,3	67,8	70,4	76,1	81,7	87,6	92,7	120,9
2000	17,6	110,9	42,3	52,4	59,9	64,1	67,4	70,4	73,2	75,7	82,2	88,5	94,6	100,4	132,7
5000	18,8	118,6	45,4	56,4	65,7	70,0	74,0	77,0	80,2	82,8	90,2	97,4	104,2	110,9	143,2
10000	18,8	35,2	48,5	60,3	69,3	74,7	79,1	82,9	85,2	89,2	97,2	104,5	111,5	118,6	152,6



Таблица А.10 Дозовый фактор накопления для свинца [7]

$E_\gamma$ , МэВ	$\mu d$										
	0,5	1	2	3	4	5	6	7	8	10	15
0,13	1,40	1,59	2,06	2,46	2,88	3,38	3,99	4,77	5,82	9,21	39,7
0,15	1,29	1,40	1,59	1,7	1,77	1,82	1,86	1,91	1,95	2,05	2,36
0,2	1,15	1,18	1,23	1,25	1,27	1,28	1,29	1,30	1,31	1,33	1,37
0,3	1,10	1,13	1,21	1,26	1,30	1,34	1,37	1,40	1,42	1,47	1,56
0,4	1,11	1,17	1,29	1,38	1,45	1,51	1,57	1,62	1,67	1,76	1,95
0,5	1,14	1,22	1,38	1,50	1,61	1,71	1,80	1,89	1,96	2,10	2,42
0,6	1,14	1,22	1,41	1,57	1,69	1,80	1,90	2,00	2,10	2,28	2,65
0,8	1,14	1,28	1,53	1,74	1,91	2,08	2,24	2,39	2,54	2,83	3,44
1,0	1,16	1,31	1,61	1,87	2,10	2,32	2,52	2,75	2,96	3,37	4,30
2,0	1,21	1,39	1,76	2,12	2,47	2,83	3,20	3,58	3,97	4,76	6,80

Таблица А.11 Основные годовые пределы доз [8]

Нормируемые величины	Пределы доз	
	Персонал (группа А)	Население
Эффективная доза	20 мЗв/год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв/год	1 мЗв/год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв/год
Эквивалентная доза за год		
в хрусталике глаза	150 мЗв	15 мЗв
в коже	500 мЗв	50 мЗв
в кистях и стопах	500 мЗв	50 мЗв

Персонал (группа А) - лица, работающие с техногенными источниками или находящиеся по условиям работы в сфере их воздействия (группа Б).

"Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)" [8] обязывают проводить проектирование защиты с коэффициентом запаса по мощности эквивалентной дозы, равным 2. Это создает резерв, компенсирующий возможные погрешности в исходных данных, возможность облучения от неучтенных источников и т.п. Таким образом, при постоянной работе с источниками ионизирующих излучений (1700 ч в год) проектная мощность дозы на поверхности защиты не должна превышать значения  $P_D = 36 \cdot 10^{-6}$  Зв/день или  $P_D = 6 \cdot 10^{-6}$  Зв/ч [7].

Таблица А.12 Периодическая система элементов Д.И. Менделеева

Период	Ряд	Г Р У П П Ы Э Л Е М Е Н Т О В													
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII						
I	1	(H)							<b>H</b> <sup>1</sup> Водород 1,00797	<b>He</b> <sup>2</sup> Гелий 4,0026	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <span>Обозначение элемента</span> <span>Атомный номер</span> </div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 5px auto; width: fit-content;"> <b>Li</b><sup>3</sup> Литий 6,939                 </div> <div style="text-align: right; margin-top: 5px;">Относительная атомная масса</div>				
II	2	<b>Li</b> <sup>3</sup> Литий 6,939	<b>Be</b> <sup>4</sup> Бериллий 9,0122	<b>B</b> <sup>5</sup> Бор 10,811	<b>C</b> <sup>6</sup> Углерод 12,01115		<b>O</b> <sup>8</sup> Кислород 15,9994	<b>F</b> <sup>9</sup> Фтор 18,9984	<b>Ne</b> <sup>10</sup> Неон 20,179						
III	3	<b>Na</b> <sup>11</sup> Натрий 22,9898	<b>Mg</b> <sup>12</sup> Магний 24,305	<b>Al</b> <sup>13</sup> Алюминий 26,9815	<b>Si</b> <sup>14</sup> Кремний 28,086	<b>P</b> <sup>15</sup> Фосфор 30,9738	<b>S</b> <sup>16</sup> Сера 32,064	<b>Cl</b> <sup>17</sup> Хлор 35,453	<b>Ar</b> <sup>18</sup> Аргон 39,948						
IV	4	<b>K</b> <sup>19</sup> Калий 39,102		<b>Sc</b> <sup>21</sup> Скандий 44,956	<b>Ti</b> <sup>22</sup> Титан 47,90	<b>V</b> <sup>23</sup> Ванадий 50,942	<b>Cr</b> <sup>24</sup> Хром 51,996	<b>Mn</b> <sup>25</sup> Марганец 54,9380	<b>Fe</b> <sup>26</sup> Железо 55,847	<b>Co</b> <sup>27</sup> Кобальт 58,9330	<b>Ni</b> <sup>28</sup> Никель 58,71				
	5	<b>Cu</b> <sup>29</sup> Медь 63,546	<b>Zn</b> <sup>30</sup> Цинк 65,37	<b>Ga</b> <sup>31</sup> Галлий 69,72	<b>Ge</b> <sup>32</sup> Германий 72,59	<b>As</b> <sup>33</sup> Мышьяк 74,9216	<b>Se</b> <sup>34</sup> Селен 78,96	<b>Br</b> <sup>35</sup> Бром 79,904	<b>Kr</b> <sup>36</sup> Криптон 83,80						
V	6	<b>Rb</b> <sup>37</sup> Рубидий 85,47	<b>Sr</b> <sup>38</sup> Стронций 87,62	<b>Y</b> <sup>39</sup> Иттрий 88,905	<b>Zr</b> <sup>40</sup> Цирконий 91,22	<b>Nb</b> <sup>41</sup> Ниобий 92,906	<b>Mo</b> <sup>42</sup> Молибден 95,94	<b>Tc</b> <sup>43</sup> Технеций [99]	<b>Ru</b> <sup>44</sup> Рутений 101,07	<b>Rh</b> <sup>45</sup> Родий 102,905	<b>Pd</b> <sup>46</sup> Палладий 106,4				
	7	<b>Ag</b> <sup>47</sup> Серебро 107,868	<b>Cd</b> <sup>48</sup> Кадмий 112,40	<b>In</b> <sup>49</sup> Индий 114,82		<b>Sb</b> <sup>51</sup> Сурьма 121,75	<b>Te</b> <sup>52</sup> Теллур 127,60		<b>Xe</b> <sup>54</sup> Ксенон 131,30						
VI	8	<b>Cs</b> <sup>55</sup> Цезий 132,905	<b>Ba</b> <sup>56</sup> Барий 137,34	<b>La*</b> <sup>57</sup> Лантан 138,91	<b>Hf</b> <sup>72</sup> Гафний 178,49	<b>Ta</b> <sup>73</sup> Тантал 180,948	<b>W</b> <sup>74</sup> Вольфрам 183,85	<b>Re</b> <sup>75</sup> Рений 186,2	<b>Os</b> <sup>76</sup> Осмий 190,2	<b>Ir</b> <sup>77</sup> Иридий 192,2	<b>Pt</b> <sup>78</sup> Платина 195,09				
	9		<b>Hg</b> <sup>80</sup> Ртуть 200,59	<b>Tl</b> <sup>81</sup> Таллий 204,37	<b>Pb</b> <sup>82</sup> Свинец 207,19	<b>Bi</b> <sup>83</sup> Висмут 208,980	<b>Po</b> <sup>84</sup> Полоний [210]*	<b>At</b> <sup>85</sup> Астат [210]	<b>Rn</b> <sup>86</sup> Радон [222]						
VII	10	<b>Fr</b> <sup>87</sup> Франций [223]	<b>Ra</b> <sup>88</sup> Радий [226]	<b>Ac**</b> <sup>89</sup> Актиний [227]	<b>Rf</b> <sup>104</sup> Резерфордий [261]	<b>Db</b> <sup>105</sup> Дубний [262]	<b>Sg</b> <sup>106</sup> Сиборгий [263]	<b>Bh</b> <sup>107</sup> Борий [262]	<b>Hs</b> <sup>108</sup> Хассий [265]	<b>Mt</b> <sup>109</sup> Мейтнерий [266]	110				
Лантаноиды*		58 <b>Ce</b> 140,12 Церий	59 <b>Pr</b> 140,907 Празеодим	60 <b>Nd</b> 144,24 Неодим	61 <b>Pm</b> [147]* Прометий	62 <b>Sm</b> 150,35 Самарий	63 <b>Eu</b> 151,96 Европий	64 <b>Gd</b> 157,25 Гадолиний	65 <b>Tb</b> 158,924 Тербий	66 <b>Dy</b> 162,50 Диспрозий	67 <b>Ho</b> 164,930 Гольмий	68 <b>Er</b> 167,26 Эрбий	69 <b>Tm</b> 168,934 Тулий	70 <b>Yb</b> 173,04 Иттербий	71 <b>Lu</b> 174,97 Лютеций
Актиноиды**		90 <b>Th</b> 232,038 Торий	91 <b>Pa</b> [231] Протактиний	92 <b>U</b> 238,03 Уран	93 <b>Np</b> [237] Нептуний	94 <b>Pu</b> [244] Плутоний	95 <b>Am</b> [243] Америций	96 <b>Cm</b> [247] Кюрий	97 <b>Bk</b> [247] Берклий	98 <b>Cf</b> [252]* Калифорний	99 <b>Es</b> [254] Эйнштейний	100 <b>Fm</b> [257] Фермий	101 <b>Md</b> [257] Менделевий	102 <b>No</b> [255] Нобелий	103 <b>Lr</b> [256] Лоуренсий

Учебное пособие

Татьяна Михайловна Чмерева

Татьяна Владимировна Климова

**ЗАДАЧИ ПО РАДИАЦИОННОЙ  
ФИЗИКЕ**

ISBN 978-5-7410-1717-3



9 785741 017173