

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ И ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ДОЗИМЕТРИИ

*Учебно-методическое пособие
по решению основных типов задач*

Севастополь
СевГУ
2019

УДК 539.1 + 621.039
ББК 22.38 + 31.4
Б388

Р е ц е н з е н т ы :

В.И. Гришковец – профессор кафедры общей и физической химии
ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского», д.х.н., профессор
Г.В. Кучерик – доцент кафедры радиоэкология и экологическая
безопасность ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный
университет», к.т.н., доцент

Бежин Н.А.

Б388 Основы ядерной физики и дозиметрии: учеб.-метод. пособие по
решению основных типов задач / Н.А. Бежин, А.А. Выдыш. – Севастополь:
СевГУ, 2019. – 180 с.

Пособие является практикумом по решению основных типов задач по дисциплине
«Основы ядерной физики и дозиметрии» для студентов, обучающихся по
специальностям 18.03.01 «Химическая технология» и 18.05.02 «Химическая технология
материалов современной энергетики», и направлено на закрепление лекционного
материала и приобретение практических навыков.

УДК 539.1 + 621.039
ББК 22.38 + 31.4

Рассмотрено и рекомендовано на заседании кафедры «Химические
технологии и новые материалы» Института ядерной энергии и
промышленности СевГУ, протокол № 26 от 22 мая 2019 года.

Изд. № 286/19. Объем 11,25 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1 Особенности физики микромира	6
2 Строение и свойства атомных ядер	15
3 Энергия связи атомных ядер	21
4 Радиоактивность	29
5 Накопление и распад радиоактивных ядер	37
6 α -излучение	46
7 β -излучение	53
8 γ -излучение	64
9 Ядерные реакции. нейтроны	73
10 Реакции деления и синтеза	82
11 Дозиметрические расчеты	87
12 Расчет характеристик ионизационной камеры	108
13 Расчет характеристик газоразрядного счетчика	123
14 Расчет характеристик сцинтилляционного счетчика	138
15 Расчет характеристик полупроводникового детектора	150
Список литературы	161
Приложение А. Некоторые свойства ядер	162
Приложение Б. Линейные коэффициенты ослабления гамма-излучения	171
Приложение В. Линейные коэффициенты передачи энергии	172
Приложение Г. Массово-энергетические соотношения	173
Приложение Д. Численное значение некоторых физических постоянных	173
Приложение Е. Плотность и атомный (молекулярный) вес некоторых веществ	174

Приложение Ж. Соотношения между единицами измерения характеристик поля излучений	175
Приложение З. Основные дозиметрические величины	175
Приложение И. Соотношения между единицами измерения основных дозиметрических величин	176
Приложение К. Гамма-постоянные некоторых радионуклидов по мощности эффективной дозы Γ_E , мощности воздушной кермы Γ_K и мощности экспозиционной дозы Γ_X	177
Приложение Л. Номограмма для расчета защиты временем, количеством и расстоянием	178
Приложение М. Характеристики неорганических сцинтилляторов	179
Приложение Н. Характеристики органических сцинтилляторов	179
Приложение О. Характеристики различных материалов для ППД	180
Приложение П. Зависимость линейных коэффициентов от энергии гамма-кванта в кремнии и германии	180

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Основы ядерной физики и дозиметрии» посвящена описанию современных представлений о строении атомных ядер, ядерных реакциях как источниках ядерной энергии, свойствах ионизирующих излучений, воздействии их на человека и методах их измерения.

Дисциплина направлена на овладение студентами знаний основ современной теории строения ядра, законов радиоактивного распада, ядерных реакций, взаимодействия ядерных излучений с веществом, основных принципов дозиметрии и защиты от ионизирующего излучения.

Эта дисциплина состоит из двух самостоятельных, но тесно взаимосвязанных разделов: «Прикладная ядерная физика» и «Основы дозиметрии». Общая целевая установка изучения курса – обучить слушателей основам прикладной ядерной физики как физической основы радиохимии и дозиметрии ионизирующих излучений в объеме, позволяющем обеспечить базовую подготовку будущего специалиста, умеющего на инженерном уровне обеспечивать радиационную безопасность персонала на объектах ядерной энергетики.

В результате освоения дисциплины будущий специалист приобретет знания, умения и навыки, обеспечивающие достижение целей основных образовательных программ по специальностям 18.03.01 «Химическая технология» и 18.05.02 «Химическая технология материалов современной энергетики».

Данное пособие является практикумом по решению основных типов задач по дисциплине «Основы ядерной физики и дозиметрии» и направлено на закрепление лекционного материала и приобретение практических навыков. В учебно-методическом пособии рассмотрены задачи ядерной физики, посвященные строению атомного ядра, закономерностям радиоактивных превращений, ядерным реакциям, а также дозиметрии. Задачи сопровождаются необходимым теоретическим материалом, а также подробными решениями. Приложения, расположенные в конце пособия, содержат справочные материалы.

1 ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКИ МИКРОМИРА

1.1 Квантово-механические представления о физике микромира

Особенностями микрочастиц являются их крайне малые масса и размеры, и движение с очень большими (околосветовыми) скоростями. Малая масса приводит к волновому характеру движения микрочастиц, а движение с большими скоростями приводит к появлению релятивистских закономерностей, описываемых теорией относительности.

В отличие от классической теории, все частицы в квантовой механике выступают как носители и корпускулярных, и волновых свойств, которые не исключают, а дополняют друг друга. Волновая природа электронов, протонов и других «частиц» подтверждена опытами по дифракции частиц.

Корпускулярно-волновой дуализм характерен для света. Он представляет собой волны и поток частиц – фотонов. Длина волны и энергия фотона определяется полученными Планком и Эйнштейном соотношениями:

$$E = h \cdot \nu, \quad (1.1)$$

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\nu}, \quad (1.2)$$

где ν – частота излучения;

c – скорость света, м/с ($c = 299\,792\,458 \pm 1,2$ м/с $\approx 3 \cdot 10^8$ м/с);

h – постоянная Планка (квант действия), Дж·с ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,1 \cdot 10^{-15}$ эВ·с).

Часто применяется приведённая постоянной Планка:

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,0546 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}.$$

Очень важным является то, что волновые свойства света проявляются лишь при взаимодействии с объектами, имеющими размеры порядка длины волны, такими, например, как дифракционная решётка или межатомные расстояния в кристаллах.

Волновой характер движения может проявляться только у микрочастиц, имеющих столь малую массу, что длина волны становится соизмеримой с размерами микрообъектов. Макротела же при движении будут иметь столь малую длину волны, что не существует объектов, при взаимодействии с которыми проявлялся бы волновой характер их движения.

Это доказал Луи де Бройль исходя из теории относительности. Он показал, что если импульс частицы равен p , то «ассоциированная» с этой частицей волна должна иметь длину волны:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{\sqrt{2Em}}, \quad (1.3)$$

где m , v и E – масса, скорость и энергия частицы соответственно.

Эрвин Шрёдингер, прослышав о работе Луи де Бройля представил новую теорию, которая является прочным математическим обоснованием этих идей и составляет содержание науки «Квантовая механика». Наиболее известно уравнение Шрёдингера для одной частицы:

$$\frac{\hbar^2}{8\pi^2 m} \nabla^2 \psi + [E - U(x)]\psi = 0, \quad (1.4)$$

где ψ – пси-функция (комплексная функция координат и времени, волновая функция);

E – полная энергия частицы;

$U(x)$ – потенциальная энергия;

∇^2 – оператор Лапласа (или лапласиан).

Т.о. состояние квантовой системы описывается волновой функцией, квадрат модуля которой определяет вероятность данного состояния и, следовательно, вероятности для значений физических величин, его характеризующих.

Из квантовой механики вытекает, что не все физические величины могут одновременно иметь точные значения. Фундаментальным положением квантовой теории является **принцип неопределённости**, утверждающий, что характеризующие физическую систему так называемые дополнительные физические величины (например, координата и импульс, энергия и время нахождения частицы в данном энергетическом состоянии) не могут одновременно принимать точные значения. Это отражает двойственную, корпускулярно-волновую природу частиц материи (электронов, протонов и т.д.).

Принцип неопределённости был сформулирован В. Гейзенбергом. Неточности при одновременном определении дополнительных величин связаны **соотношением неопределенностей Гейзенберга**, которое для неточностей в определении координаты x и проекции на нее импульса p имеет вид:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar \quad \text{или} \quad \Delta x \cdot \Delta v \geq \frac{\hbar}{m}. \quad (1.5)$$

Соотношение неопределенностей для энергии E и времени τ :

$$\Delta E \cdot \tau \geq \hbar. \quad (1.6)$$

Формула $\Delta x \cdot \Delta \nu \geq \frac{\hbar}{m}$ позволяет измерять время нахождения ядра в возбуждённом состоянии путём измерения энергий гамма-квантов, испускаемых ядром при возвращении его в основное энергетическое состояние. Измеряя разброс (неопределённость) этих энергий, рассчитывают время жизни возбуждённого ядра.

1.2 Относительность массы, размеров и хода времени в движущихся системах

Другой особенностью физики микромира является движение микрочастиц с большими, околосветовыми скоростями. Это приводит к появлению целого ряда так называемых «релятивистских» эффектов, описываемых специальной теорией относительности, которая создана Альбертом Эйнштейном, в основе которой лежат 2 положения:

- принцип относительности, означающий равноправие всех инерциальных систем отсчета;
- постоянство скорости света в вакууме, ее независимость от скорости движения источника света.

Исходя из второго положения сложение скоростей двух, движущихся навстречу друг другу объектов осуществляется в соответствии с формулой:

$$v_{\Sigma} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c^2}}. \quad (1.7)$$

Этой формулой следует пользоваться при движении микрочастиц с околосветовыми скоростями. Так, при движении фотонов ($v_1 = v_2 = c$) получаем $v_{\Sigma} = c$, что довольно парадоксально с точки зрения обычного мышления.

Из этой формулы также следует, что при движении макрообъектов (пуля, самолёт) даже со сверхзвуковыми скоростями из-за большой скорости света они будут сближаться со скоростью $v_{\Sigma} = v_1 + v_2$, т. е. по формуле классической физике.

Т.о. теория относительности считает скорость света максимально достижимой скоростью. Но, если представить себе ракету с постоянно работающим двигателем, то она должна бы преодолеть скорость света за счёт постоянного ускорения. Однако этого не может произойти, т.к. в соответствии с теорией относительности с увеличением скорости растёт масса объекта:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1.8)$$

где m_0 – масса покоя (масса объекта в системе, относительно которой он неподвижен).

При сверхскоростях (называемых релятивистскими) зависимость энергии E тела от его скорости v описывается уже не формулой классической механики

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad (1.9)$$

а релятивистской формулой:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (1.10)$$

Из формулы видно, что энергия тела стремится к бесконечности при скорости v , стремящейся к c , поэтому если масса покоя не равна нулю, то скорость тела всегда меньше c , хотя при $E \gg mc^2$ она может стать сколь угодно близкой к c .

Со скоростью света всегда движутся частицы, масса покоя которых равна нулю (фотоны – кванты света, нейтрино). Т.о. скорость света является предельной скоростью передачи любых взаимодействий и сигналов из одной точки пространства в другую.

При малых скоростях, разлагая квадратный корень в ряд, получаем приближенно:

$$E = m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}. \quad (1.11)$$

Второй член справа есть обычная кинетическая энергия, первый же член показывает, что покоящееся тело обладает запасом энергии $E_0 = m_0 c^2$, называемой энергией покоя (т.н. **принцип эквивалентности энергии и массы**, или **принцип эквивалентности Эйнштейна**).

При сообщении телу (или системе тел) энергии возрастает и масса. Это обычно трактуют как переход энергии в массу, что не соответствует физическому смыслу процесса. Реально происходит переход энергии покоя в энергию движения (кинетическую) и эквивалентный переход массы покоя в массу движения:

$$E_0 \leftrightarrow E_{кин} \text{ и } m_0 \leftrightarrow m_{движ}$$

Эквивалентность этого перехода определяется соотношением:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2. \quad (1.12)$$

Если, как это принято в ядерной физике, массу измерять в атомных единицах массы (а.е.м), а энергию – в мегаэлектронвольтах (МэВ), то получим расчётную формулу:

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931,5 \text{ МэВ}. \quad (1.13)$$

Эта формула является столь же важной для ядерной физики, как формула закона Ома для расчётов в электронике. Она применяется для описания и расчётов энергии любых ядерных процессов – радиоактивности, ядерных реакций, аннигиляции и т.п.

Так, при делении ядра урана с образованием двух ядер – осколков и двух нейтронов масса продуктов деления будет меньше исходной массы ядра урана. За счёт этого выделится энергия в виде кинетической энергии осколков и нейтронов. При торможении их энергия передаётся атомам окружающих ядро материалов. Последние начинают двигаться быстрее – увеличивается температура среды. Таким образом энергия покоя ядра урана переходит в тепловую энергию.

Общая энергия, выделяющаяся на один акт деления, может быть определена из уравнения реакции по уменьшению массы в реакции, например,

$${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{92}^{236}\text{U} \rightarrow {}_{56}^{139}\text{Ba} + {}_{36}^{95}\text{Kr} + 2{}_0^1\text{n}$$

$$\Delta E = [m({}^{235}\text{U}) + m(\text{n}) - m({}^{139}\text{Ba}) - m({}^{95}\text{Kr}) - 2m(\text{n})] 931,5 \text{ МэВ} = 205 \text{ МэВ}.$$

Из эквивалентности массы и энергии вытекает много следствий. Одно из наиболее впечатляющих – аннигиляция пары частиц и полное (100 %) превращение их суммарной массы в излучение с соответствующей энергией. Такая аннигиляция наблюдается для пары электрон – позитрон (электрон заряжен отрицательно, а позитрон положительно) и для пары протон – антипротон.

Эквивалентностью массы и энергии объясняется происхождение энергии звезд, она лежит в основе принципов получения атомной энергии и создания ядерного оружия, использующего деление и синтез ядер.

Теория относительности выявила ограниченность представлений классической физики об «абсолютных» пространстве и времени, неправомерность их обособления от движущейся материи; она дает более точное, по сравнению с классической механикой, отображение объективных процессов реальной действительности.

В релятивистской теории пространственные расстояния и промежутки времени не остаются неизменными при переходе из одной системы отсчета в другую, движущуюся относительно первой со скоростью v . Длины сокращаются (в направлении движения) в определенное количество раз, и в такое же число раз растягиваются промежутки времени:

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}, \quad (1.14)$$

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (1.15)$$

Характерное для теории относительности явление замедления времени может принимать существенные масштабы. За счёт этого явления частицы, образующиеся из космических лучей в верхних слоях атмосферы и имеющие очень малый период полураспада, могут достигать поверхности Земли.

Примеры решения задач

Пример 1.1. Доказать, исходя из соотношения неопределённости Гейзенберга, невозможность нахождения электрона в ядре ($R_{\text{я}} = 10^{-14}$ м).

Решение

Дано:	Из соотношения неопределённости Гейзенберга выражают скорость частицы:
$m_e = 9,10953 \cdot 10^{-31}$ кг	
$R_{\text{я}} = 10^{-14}$ м	
$\hbar = 1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	$\Delta x \cdot \Delta v \geq \frac{\hbar}{m},$
$\Delta v_e - ?$	

$$\Delta v \geq \frac{\hbar}{m \cdot \Delta x},$$

$$\Delta v \geq \frac{1,0546 \cdot 10^{-34}}{9,10953 \cdot 10^{-31} \cdot 10^{-14}} = 1,16 \cdot 10^{10} \text{ м/с},$$

$\Delta v > c$, что невозможно.

Ответ: $\Delta v > c$, что невозможно.

Пример 1.2. Определить длину волны промежуточного нейтрона, имеющего энергию 100 кэВ.

Решение

Дано:	Определяют длину волны:
$E_n = 100 \text{ кэВ} = 100 \cdot 10^3 \text{ эВ} \cdot$	
$\cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ} =$	$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2Em}},$
$= 1,602 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}$	
$m_n = 1,67496 \cdot 10^{-27}$ кг	$\lambda_n = \frac{6,62617 \cdot 10^{-34}}{\sqrt{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-14} \cdot 1,67496 \cdot 10^{-27}}} = 9,045 \cdot 10^{-14} \text{ м}.$
$h = 6,62617 \cdot 10^{-34}$ Дж·с	
$\lambda_n - ?$	Ответ: $\lambda_n = 9,045 \cdot 10^{-14}$ м.

Пример 1.3. В термоядерном синтезе на 1 кг дейтериево-тритиевой плазмы выделяется около 81 млрд. ккал. Определить степень уменьшения массы $\Delta m/m$ в этом процессе.

Решение

Дано:

$$m = 1 \text{ кг}$$

$$\Delta E = 81 \cdot 10^9 \text{ ккал} = 81 \cdot 10^{12} \text{ ккал} \cdot$$

$$4,185 \text{ Дж/ккал} = 3,4 \cdot 10^{14} \text{ Дж}$$

$$\frac{\Delta m}{m} - ?$$

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2,$$

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2},$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{\Delta E}{m \cdot c^2},$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{3,4 \cdot 10^{14}}{1 \cdot (3 \cdot 10^8)^2} = 3,78 \cdot 10^{-3} = 0,378\%.$$

Ответ: $\frac{\Delta m}{m} = 3,78 \cdot 10^{-3} = 0,378\%.$

Пример 1.4. Во сколько раз возрастает масса протонов на выходе синхрофазотрона, если их конечная скорость $2,902 \cdot 10^{10}$ см/с.

Решение

Дано:

$$v = 2,902 \cdot 10^{10} \text{ см/с} = 2,902 \cdot 10^8 \text{ м/с}$$

$$\frac{m}{m_0} - ?$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$\frac{m}{m_0} = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(2,902 \cdot 10^8)^2}{(3 \cdot 10^8)^2}}} = 3,945.$$

Ответ: $\frac{m}{m_0} = 3,945.$

Контрольные задания

1. Определить длину волны летящей пули ($m = 9$ г, $v = 100$ м/с). При взаимодействии с какими объектами может проявиться волновой характер ее движения?

2. Определить длину волны теплового нейтрона ($m = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг, $v = 2200$ м/с). $E_n = 0,1$ эВ. При взаимодействии, с какими объектами может проявиться волновой характер его движения?

3. Чему равна длина волны теплового нейтрона, если его энергия составляет 0,025 эВ?

4. Чему равна длина волны теплового нейтрона, если его энергия составляет 0,025 эВ?

5. Исходя из соотношения неопределенностей Гейзенберга, доказать невозможность нахождения электронов в ядре ($R_{\text{я}} \approx 10^{-12}$ см).

6. Исходя из соотношения неопределенностей Гейзенберга, рассчитать массу виртуальной частицы, передающей взаимодействие со скоростью света на расстояние $1,5 \cdot 10^{-13}$ см.

7. Исходя из соотношения неопределенностей Гейзенберга, рассчитать массу виртуальной частицы, которая, двигаясь со скоростью света может передавать действие на расстояние 10^{-12} см.

8. Полагая размеры атома $\sim 10^{-8}$ см, рассчитать неопределенность скорости электрона, находящегося на внешней его орбите.

9. Каковы должны быть размеры кристаллической решетки, чтобы при взаимодействии с ней проявлялись волновые свойства электрона, ускоренного разностью потенциалов 20 эВ?

10. Разность потенциалов ЭЛТ телевизора около 20 кэВ, а толщина изображающего пучка порядка 0,1 мм. Почему волновая природа движения электронов не мешает четкости изображения на экране? Сравнить длину волны электрона с толщиной пучка.

11. Ширина трека α -частицы составляет 0,1 мм. Насколько она больше ее приведенной длины волны. Влияет ли волновой характер движения на ширину трека. Масса частицы 4 аеи, $v = 0,1 \cdot c$.

12. Как соотносятся ширина трека протона 0,1 мм и его длина волны при энергии 1 МэВ?

13. Во сколько раз возрастает масса протонов на выходе синхрофазотрона, если их конечная скорость $2,902 \cdot 10^{10}$ см/с.

14. Поезд достигает скорости 130 км/ч, полагая его вес 1000 т, подсчитать, на, сколько грамм возрастет его масса.

15. На какую величину уменьшится масса искусственного спутника Земли, если реактор на его борту выработал 2000 кВт·ч энергии (1 кВт·ч = 3,6 МДж)?

16. Во сколько раз возрастает масса частицы, если скорость ее на выходе достигает 0,999 скорости света?

17. Подсчитать годовую поправку времени для звездолета будущего, движущегося со скоростью $2,6 \cdot 10^5$ км/с.

18. Подсчитать годовую поправку времени для современного самолета, летящего со скоростью 1000 м/с.

19. Рассчитать годовую поправку времени для искусственного спутника Земли, летящего со скоростью 8 км/с.

20. На какую величину «уйдут вперед» часы космонавтов за счет релятивистских эффектов, если они пробыли на орбите 0,5 года? Скорость станции 8 м/с.

21. В термоядерном боеприпасе используется около 18 кг «взрывчатки» (${}^6\text{Li}^2\text{H}$), которая обеспечивает взрыв, эквивалентный 1 млн. т тротила (1 т тротила = 4,184 МДж). Какая часть термоядерной взрывчатки (%) «превращается» в энергию?

22. Какое количество энергии выделится при термоядерном синтезе ${}^4\text{He}$ из 1 кг водородной плазмы, если уменьшение масс при этом составляет около 0,4 %?

23. В среднем все население Земли потребляет $142,3 \cdot 10^{12}$ кВт·ч электроэнергии (1 кВт·ч = 3,6 МДж). Какое количество ${}^{235}\text{U}$ необходимо израсходовать за год, если в энергию «превращается» 0,1 % его массы?

24. В термоядерном синтезе на 1 кг дейтериево-тритиевой плазмы выделяется около 81 млрд. ккал. Определить степень уменьшения массы $\Delta m/m$ в этом процессе.

25. Какая энергия выделится при взрыве дейтериево-тритиевого заряда массой 100 кг, если уменьшение массы при этом составляет 0,8 %?

26. Чему равен энергетический выход реакции, если масса продуктов реакции меньше массы исходных веществ на 0,003 аем?

27. Заряженные π -мезоны синхрофазотронного происхождения имеют скорость 0,99 скорости света и проходят расстояние до самораспада 200 см. Определить «собственное время жизни» этих частиц.

28. Какова должна быть энергия виртуальной частицы, если она передает взаимодействие со скоростью света на расстояние 10^{-13} см?

29. Какое расстояние пролетит частица со скоростью $0,99 \cdot c$, если время ее жизни в покое составляет 10^{-7} секунды?

2 СТРОЕНИЕ И СВОЙСТВА АТОМНЫХ ЯДЕР

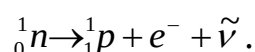
2.1 Нуклоны

В соответствии с протонно-нейтронной теорией ядра состоят из протонов и нейтронов, называемых **нуклонами**. Термином нуклон ввели, когда выяснили, что ядерные силы у протонов и нейтронов одинаковы (без учета электромагнитных сил). Так как ядерные силы намного превышают электромагнитные, то замена протона на нейтрон внутри ядра практически не влияет на его общую энергию.

Свойства их достаточно хорошо изучены. Их массы близки:

$$m_p = 1,67265 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,007276 \text{ аеи} = 1836,1 \text{ } m_e = 938,26 \text{ МэВ}, \\ m_n = 1,67496 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665 \text{ аеи} = 1838,6 \text{ } m_e = 939,55 \text{ МэВ}.$$

Поскольку масса нейтрона на $2,5 \text{ } m_e$ больше, чем масса протона, то энергетически возможен распад нейтрона на протон и электрон. Действительно, нейтрон является нестабильной частицей. В свободном состоянии он распадается:



Однако в связанном (нуклонно-ядерном) состоянии нейтроны устойчивы и образуют стабильные ядра.

В легких ядрах количество нуклонов примерно равно. В тяжёлых – количество нейтронов должно быть большим, чтобы компенсировать силы взаимного кулоновского расталкивания протонов.

Оптимальным соотношением чисел нейтронов и протонов должно быть:

$$\left(\frac{N}{Z} \right)_{opt} = 0,98 + 0,015 \cdot A^{2/3}. \quad (2.1)$$

Если у данного конкретного ядра $\frac{N}{Z} = \left(\frac{N}{Z} \right)_{opt}$, то ядро стабильно.

Если $\frac{N}{Z} > \left(\frac{N}{Z} \right)_{opt}$, то ядро нейтронно-избыточно, и в нём происходит превращение нейтрона в протон: ${}_0^1n \rightarrow {}_1^1p + e^- + \tilde{\nu}$ (β^- -радиоактивность).

Если $\frac{N}{Z} < \left(\frac{N}{Z} \right)_{opt}$, то ядро нейтронно-дефицитно, и в нём происходит превращение протона в нейтрон: ${}_1^1p \rightarrow {}_0^1n + e^+ + \nu$ (β^+ -радиоактивность).

Для стабильных ядер можно также получить следующие выражения:

$$Z = \frac{A}{1,98 + 0,015A^{2/3}}, \quad (2.2)$$

$$N_{cm} = A - Z_{cm} = \left(1 - \frac{1}{1,98 + 0,015A^{2/3}}\right) \cdot A. \quad (2.3)$$

2.2 Размеры атомных ядер

Отличие микрочастиц от макрообъектов заключается в том, что радиус атома, ядра, нуклона не может быть измерен посредством приближения к ним каких-либо масштабов, а может быть найден только путём статистических наблюдений и расчётов. Все экспериментальные способы определения радиуса ядра $R_{я}$ показали, что $R_{я}$ монотонно растёт с увеличением массового числа A приблизительно как корень третьей степени из него:

$$R_{я} \cong R_0 \cdot \sqrt[3]{A}. \quad (2.4)$$

Из этой формулы следует, что объём ядра пропорционален A , и, следовательно, плотность всех ядер приблизительно одинакова (одинаковое число нуклонов на единицу объёма).

Для R_0 экспериментально было получено значение $(1,38 \div 1,41) \cdot 10^{-15}$ метра. В дальнейшем будем использовать расчётную формулу:

$$R_{я} = 1,4 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A} \text{ м.} \quad (2.5)$$

Сравнение характеристик атома и ядра представлено в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Характерные порядки размеров атома и ядра

Размеры	Линейные размеры	Площадь	Объём
Атом	10^{-8} см	10^{-16} см ²	10^{-24} см ³
Ядро	10^{-12} см	10^{-24} см ²	10^{-36} см ³
Отношение	10^4	10^8	10^{12}

Таким образом, если представить себе атом размером со стадион 200 м, то ядро будет представлять собой камушек диаметром 2 см.

2.3 Заряд атомных ядер

Заряд атомных ядер наиболее точно был измерен английским физиком Мозли в 1913 г. Он установил, зависимость между частотой спектральных

линий характеристического рентгеновского излучения ν и атомным номером Z излучающего элемента. Согласно закону Мозли, «квадратный корень из частоты соответственных линий в рентгеновских спектрах различных элементов увеличивается при переходе от данного элемента к следующему на одну и ту же величину».

Характеристическое рентгеновское излучение – это излучение предварительно возбуждённых атомов (поток быстрых электронов или нагревом) при переходе их электронов из состояния с более высокой энергией в основное состояние (с более высокой орбиты на более низкую). Уровень энергии электрона на орбите зависит от заряда ядра и положения орбиты. Энергия испущенного фотона рентгеновского излучения связана с его частотой. Исходя из вышеизложенного, из закона Мозли могут быть получены формулы:

$$\nu = b \cdot (Z - a)^2, \quad (2.6)$$

$$E = h \cdot \nu = 10,25 \cdot (Z - 1)^2, \text{ эВ} \quad (2.7)$$

где a и b – постоянные, не зависящие от заряда.

Более прямым методом рассеяния альфа-частиц в 1920 г. измерил заряд ядра Д. Чедвик. Он также подтвердил связь между зарядом ядра и его местом в таблице Менделеева. Поэтому в настоящее время для того, чтобы определить заряд ядра, достаточно определить его номер в таблице Менделеева. Величина заряда при этом определится формулой:

$$Q_{\text{я}} = Z \cdot |q_e| = Z \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.} \quad (2.8)$$

2.4 Масса атомных ядер

Масса ядер, как и атомов, измеряется в атомных единицах массы.

В 1961 г. за атомную единицу массы (аеи) была принята $1/12$ массы изотопа углерода ^{12}C (углеродная единица). Изотоп ^{12}C оказался удобным и для физических измерений, т.к. природный углерод состоит из двух изотопов: ^{12}C – 99% и ^{13}C – 1%, но величины атомных масс элементов связаны только с первым из них. В результате была получена универсальная таблица относительных атомных масс.

$$1 \text{ аеи} = \frac{12 \text{ кг/моль}}{N_{\text{Ав}} \text{ моль}^{-1} \cdot 12} = \frac{1}{6,02209 \cdot 10^{26}} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Следует также отметить, что энергетический эквивалент $1 \text{ аеи} = 931,5 \text{ МэВ}$.

Следует иметь в виду, что эти измерения (они приведены в Приложение А) дают данные о массах именно атомов, а не ядер. Для получения значения массы ядер, необходимо воспользоваться соотношением:

$$M_{\text{я}} = M_A - Z \cdot m_e, \quad (2.9)$$

где m_e – масса электрона ($m_e = 0,0005$ аем).

2.5 Потенциальный барьер ядра

К общим свойствам ядер можно также отнести наличие у них потенциального барьера для положительно заряженных частиц.

Если положительно заряженную частицу вводить в ядро, то по мере приближения к ядру ей необходимо сообщать энергию на преодоление сил кулоновского отталкивания:

$$E_{\text{кул}} = \frac{z \cdot |q_e| \cdot Z \cdot |q_e|}{R}, \quad (2.10)$$

где z – заряд частицы;

Z, R – заряд и радиус ядра;

$|q_e|$ – заряд электрона.

Когда частица попадет в поле действия мощных ядерных сил притяжения, знак энергии меняется, и частица попадает в потенциальную яму.

Предположив, что

$$R = R_{\text{я}} = 1,4 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A} \text{ м.} \quad (2.11)$$

Можно рассчитать высоту потенциального барьера ядра:

$$E_{\text{нб\text{я}}} = 1,028 \cdot z \cdot Z \cdot A^{1/3} \text{ МэВ.} \quad (2.12)$$

Примеры решения задач

Пример 2.1. Определить радиус ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$.

Решение

Дано: ${}^{235}_{92}\text{U}$ $R_{\text{я}} - ?$	$R_{\text{я}} = 1,4 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A} \text{ м,}$ $R_{\text{я}} = 1,4 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{235} = 8,64 \cdot 10^{-15} \text{ м.}$ Ответ: $R_{\text{я}} = 8,64 \cdot 10^{-15} \text{ м.}$
--	--

Пример 2.2. Определить плотность ядра ${}^{40}_{19}\text{K}$ ($m_{\text{ам}}({}^{40}\text{K}) = 39,96400$ аем).

Решение

Дано: ${}^{40}_{19}\text{K}$ $m_{\text{ам}}({}^{40}\text{K}) = 39,96400 \text{ аем}$	$\rho = \frac{m_{\text{я}}}{V_{\text{я}}},$
--	---

$\begin{array}{l} m_e = 9,10953 \cdot 10^{-31} \text{ кг} = \\ = 0,0005 \text{ аем} \\ \hline \rho - ? \end{array}$	$\rho = \frac{m_{am} - Z \cdot m_e}{4\pi \cdot R_{я}^3},$ $R_{я} = 1,4 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{A},$ $\rho = \frac{(39,9640 - 19 \cdot 0,0005) \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27}}{4\pi \cdot (1,4 \cdot 10^{-15} \cdot \sqrt[3]{40})^3} = 4,81 \cdot 10^{16} \text{ кг/м}^3$
---	---

Ответ: $\rho = 4,81 \cdot 10^{16} \text{ кг/м}^3$

Пример 2.3. Определить природу вещества, если энергия характеристического излучения его атомов составляет 64000 эВ.

Дано: $\begin{array}{l} E = 64000 \text{ эВ} \\ \hline Z = ? \end{array}$	Решение $E = h \cdot \nu = 10,25 \cdot (Z - 1)^2 \text{ эВ},$ $Z = \sqrt{\frac{E}{10,25}} + 1,$ $Z = \sqrt{\frac{64000}{10,25}} + 1 = 80,02,$ $Z = 80 \rightarrow {}_{80}\text{Hg} \rightarrow \text{Ртуть}.$
---	---

Ответ: ${}_{80}\text{Hg} \rightarrow \text{Ртуть}.$

Пример 2.4. Определить вид превращения (β^+ или β^-) ядра ${}^{127}_{56}\text{Ba}$.

Дано: $\begin{array}{l} {}^{127}_{56}\text{Ba} \\ \hline \beta^+, \beta^- - ? \end{array}$	Решение $\frac{N}{Z} = \frac{127 - 56}{56} = 1,268,$ $\left(\frac{N}{Z}\right)_{opt} = 0,98 + 0,015 \cdot A^{2/3},$ $\left(\frac{N}{Z}\right)_{opt} = 0,98 + 0,015 \cdot 127^{2/3} = 1,359,$ $\frac{N}{Z} < \left(\frac{N}{Z}\right)_{opt} \Rightarrow \beta^+.$
--	--

Ответ: $\beta^+.$

Контрольные задачи

1. Написать полное обозначение следующих нуклидов: бериллий-9, титан-48, галлий-70, радиокобальт-60, самарий-150, радон-222.

2. Написать полное обозначение следующих радионуклидов: кислород-17, фосфор-32, медь-64, криптон-80, протактиний-234.

3. Написать полные обозначения радионуклидов: ниобий-93, бром-90, стронций-90, иттрий-91, плутоний-239, калифорний-251.

4. Написать полное обозначение радионуклидов: криптон-90, рубидий-90, стронций-90. К каким видам ядер (изотопам, изотонам, изобарам) они относятся.

5. Написать полное обозначение ядер радионуклидов: свинец-210, свинец-212, свинец-214. К каким видам атомных ядер (изотопам, изотонам, изобарам) относятся эти ядра?

6. Написать полное обозначение радионуклидов: ксенон-133, криптон-81, уран-235, плутоний-240, америций-244.

7. Рассчитать плотность ядра свинца-207 ($m_{am} = 207,2$).

8. Определить плотность ядра атома серы-32 ($m_{am} = 32,059$).

9. Определить плотность заряда ядра (Кл/см³) тория-232 ($m_{am} = 232,038$).

10. Определить плотность заряда (Кл/см³) ядра ¹⁰⁸Ag.

11. Определить зарядовое число ядра с массовым числом 120.

12. Определить вид превращения (β^+ или β^-) ядра ⁴¹K.

13. Определить, стабилен ли нуклид ³²P.

14. Определить, стабилен или радиоактивен нуклид натрий-20. Какой вид превращения (β^+ или β^-) он должен претерпевать?

15. Определить площадь сечения ядра урана-238.

16. Определить площадь сечения ядра урана-235.

17. Определить, какую часть массы атома содержит ¹⁸O ($m_{am} = 17,9992$).

18. Подсчитать, какую часть массы атома составляет масса ядра ²³⁹Pu ($m_{am} = 239,0522$).

19. Какое вещество содержалось в пробе, если энергия характеристического излучения его составляет 8000 эВ?

20. Какое вещество содержится в пробе, если энергия характеристического рентгеновского излучения 6400 эВ?

21. Какое вещество находится в пробе, если измеренная энергия характеристического излучения равна 16400 эВ?

22. Какова энергия характеристического рентгеновского излучения Sn?

23. Определить, какую часть площади сечения атома ¹⁸⁰Ta ($r_a = 10^{-8}$ см) занимает площадь его ядра?

24. Чему равен электрический заряд (в Кл) ядер ²⁰Ne и ²⁵⁶Md?

25. Сколько ядер содержится в 1 грамме олова-116 ($m_{am} = 115,9017$)?

26. Подтвердить расчетом массу в кг, приходящуюся на 1 аем.

27. Показать расчетом, через формулы теории относительности, что энергетический эквивалент 1 аем равен 931,5 МэВ.

3 ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНЫХ ЯДЕР

3.1 Взаимосвязь энергии и массы в атомных ядрах

Атомное ядро представляет собой связанную систему, состоящую из нуклонов – протонов и нейтронов. Как и в любой другой связанной системе в атомном ядре полная энергия ядра меньше, чем суммарная энергия свободных нуклонов на величину энергии связи. И соответственно масса ядра меньше массы свободных нуклонов на величину дефекта массы (рис. 3.1):

$$m_{\text{я}} < Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n, \quad (3.1)$$

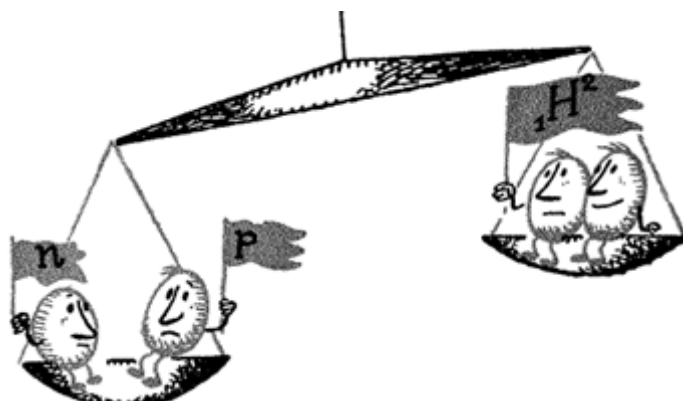


Рис. 3.1. Масса ядра меньше массы свободных нуклонов

Таким образом, **дефект массы атомного ядра** – это разность между сумой масс составляющих ядро нуклонов, находящихся в свободном состоянии, и массой ядра:

$$\Delta m = Z \cdot m({}_1^1p) + (A - Z) \cdot m({}_0^1n) - m_{\text{я}}, \quad (3.2)$$

где Z – число протонов в ядре,

$(A - Z)$ – число нейтронов в ядре.

Энергия связи атомного ядра – это энергия, которая выделяется при образовании ядра из составляющих его нуклонов, и которая затрачивается при «разборке» ядра на составляющие его нуклоны.

При этом величина энергии связи определится выражением:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = (Z \cdot m({}_1^1p) + (A - Z) \cdot m({}_0^1n) - m_{\text{я}}) \cdot c^2, \quad (3.3)$$

В ядерной физике масса, как правило, измеряется в аем, а энергия – в МэВ. Если при этом учесть, что в справочниках даются массы не ядер, а атомов, то расчётные формулы приобретают вид:

$$\Delta m = Z \cdot m({}_1^1H) + (A - Z) \cdot m({}_0^1n) - m_{\text{ат}} \text{ аем}, \quad (3.4)$$

$$E_{св} = [Z \cdot m({}_1^1H) + (A - Z) \cdot m({}_0^1n) - m_{ам}] \cdot 931,5 \text{ МэВ}, \quad (3.5)$$

где $m({}_1^1H) = 1,00783$ аем – масса протия – атома водорода 1;

$m_{ам}$ – масса атома, аем.

Энергия связи характеризует прочность данного ядра, но сравнивать прочность различных ядер следует по средней величине энергии связи, приходящейся на один нуклон. Эту величину называют удельной энергией связи $\Delta E_{св}$:

$$\Delta E_{св} = \frac{E_{св}}{A}, \quad (3.6)$$

где A – массовое число, число нуклонов в ядре.

3.2 Энергия связи дополнительного нейтрона

Энергию для преодоления потенциального барьера реакций деления, передают ядрам с помощью нейтронов. Энергия связи дополнительного нейтрона в некоторых ядрах (таких как ${}^{235}\text{U}$ или ${}^{239}\text{Pu}$), оказалась достаточной для осуществления реакции деления. Поскольку при этом вылетало 2 – 3 новых нейтрона, появилась возможность осуществления цепной ядерной реакции.

Энергия связи дополнительного нейтрона может быть рассчитана по разности масс исходных и конечных продуктов процесса поглощения дополнительного нейтрона:

$${}_Z^AX + {}_0^1n \rightarrow {}_Z^{A+1}Y, \\ \Delta E_n = [m({}_Z^AX) + m({}_0^1n) - m({}_Z^{A+1}Y)] \cdot 931,5 \text{ МэВ}. \quad (3.7)$$

3.3 Вычисление энергии связи ядер через декремент их массы

При определении величины атомной единицы массы ее взяли равной 1/12 массы атома ${}^{12}\text{C}$. Таким образом масса нейтрального атома изотопа углерода ${}^{12}\text{C}$, будучи измерена в этих единицах равна 12, т.е. совпадает с массовым числом A (${}^{12}\text{C}$). Значение массы других атомов отличается от массового числа. Разность между значением массы атома и его массовым числом называется **декрементом масс** δ :

$$\delta = M - A. \quad (3.8)$$

Отношение декремента масс к массовому числу называется **упаковочным коэффициентом**:

$$\varphi = \frac{\delta}{A} = \frac{M - A}{A} = \frac{M}{A} - 1. \quad (3.9)$$

Для получения выражения для энергии связи через декремент масс преобразуют выражение энергии связи в единицах массы, прибавив и отняв от правой части равные величины A :

$$E_{св} = Z \cdot m_{ам}({}^1H) + (A - Z)m_n - m_{ам}(A, Z) + A - A, \quad (3.10)$$

$$E_{св} = Z \cdot [m_{ам}({}^1H) - m_n] + A(m_n - 1) - \delta, \quad (3.11)$$

подставим значение масс атома водорода и нейтрона:

$$\begin{aligned} m_{ам}({}^1H) &= 1,00783 \text{ а.е.м.} \\ m_n &= 1,00866 \text{ а.е.м.} \\ E_{св} &= 0,00866 \cdot A - 0,00083 \cdot Z - \delta. \end{aligned} \quad (3.12)$$

разделив на A получим выражение для удельной энергии связи:

$$\Delta E_{св} = \frac{E_{св}}{A} = 0,00866 - 0,00083 \cdot \frac{Z}{A} - \varphi. \quad (3.13)$$

Таким образом, получим формулу, связывающую упаковочный коэффициент и энергию связи нуклона в ядре.

3.4 Полуэмпирическая формула для вычисления энергии связи и изотопической массы атомного ядра (формула Вайцеккера – Ферми)

Все предыдущие формулы для определения энергии связи ядра исходят из точно определенной массы ядра. Эти массы определяются экспериментально с помощью довольно сложной аппаратуры. Результаты измерений сводятся в таблицы. Однако процесс этот сложный и не все массы атомов определены. Поэтому важное значение имеет формула Вайцеккера – Ферми, позволяющая определить массу атома, исходя из его атомного номера Z и веса A . Проследим вывод этой формулы.

В первом приближении энергия связи ядра пропорциональна массовому числу A . Введем коэффициент пропорциональности α и запишем энергию связи в виде:

$$E_{св} = \alpha \cdot A. \quad (3.14)$$

В такой записи предполагается, что в ядре все нуклоны равноценны. На самом же деле это не верно, так как поверхностные нуклоны ядерной

«капли» притягиваются только с одной (внутренней) стороны. Введем поправку на поверхностное натяжение, пропорциональную поверхности капли, т.е. $\sim A^{2/3}$:

$$E_{св} = \alpha \cdot A - \beta \cdot A^{2/3}, \quad (3.15)$$

где β – коэффициент пропорциональности, учитывающий поправку на поверхностное натяжение.

Далее нужно учесть кулоновское расталкивание. Каждый из Z протонов отталкивается от $Z - 1$ протонов. Введем поправку на кулоновское отталкивание протонов, пропорциональную $Z \cdot (Z - 1) \approx Z^2$ и обратно пропорциональную радиусу ядра $R \sim A^{1/3}$:

$$E_{св} = \alpha \cdot A - \beta \cdot A^{2/3} - \gamma \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}}, \quad (3.16)$$

где γ – коэффициент пропорциональности, учитывающий поправку на кулоновское отталкивание протонов.

Наконец, формула должна определять наблюдающуюся в природе тенденцию к симметрии в строении атомных ядер. Эта симметрия в явном виде выступает в легких ядрах, которые, как правило, состоят примерно из одинакового числа протонов и нейтронов. Это означает, что ядра с $Z = A/2$ обладают наибольшей устойчивостью и, следовательно, имеют наибольшую энергию связи. Введем поправку на отклонение от равенства $Z = A/2$:

$$E_{св} = \alpha \cdot A - \beta \cdot A^{2/3} - \gamma \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \varepsilon \cdot \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A}, \quad (3.17)$$

где ε – коэффициент пропорциональности, учитывающий поправку на отклонение от равенства $Z = A/2$.

С учетом выражения энергии связи в энергетических единицах (МэВ), получают формулу для вычисления массы атомов:

$$m_{am}(A, Z) = Z \cdot m_{am}(^1H) + (A - Z)m_n - E_{св}, \quad (3.18)$$

$$m_{am}(A, Z) = Z \cdot m_{am}(^1H) + (A - Z)m_n - \alpha \cdot A + \beta \cdot A^{2/3} + \gamma \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} + \varepsilon \cdot \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A}. \quad (3.19)$$

Эта формула хорошо передает значение масс атомов с нечетными A . При этом достаточно точные значения масс (до второго знака после запятой) получаются не только для стабильных, но и для радиоактивных ядер. Однако для ядер с четным значением A формула дает неправильное значение масс.

Все ядра по их устойчивости можно разделить на три группы:

1. Наиболее устойчивые ядра с четным Z и четным $N = A - Z$ (четно-четные).
2. Менее устойчивые четно-нечетные и нечетно-четные (с нечетным A) ядра.
3. Как правило нестабильные нечетно-нечетные ядра (известно только четыре стабильных ядра такого типа ${}^2_1\text{H}$, ${}^6_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$ и ${}^{14}_7\text{N}$).

В связи с этим масса атомных ядер с данным четным массовым числом $A = \text{const}$ при последовательном изменении заряда ядер Z на единицу меняется не плавно, а скачкообразно. Такой характер изменения массы ядер с изменением Z не предусмотрен формулой, приведенной выше, поэтому для четно-четных ядер она дает завышенное значение массы, а для нечетно-нечетных заниженное. Чтобы формула правильно передавала значение масс всех ядер вводят поправку на четность Δ :

$$m_{am}(A, Z) = Z \cdot m_{am}({}^1_1\text{H}) + (A - Z)m_n - \alpha \cdot A + \beta \cdot A^{2/3} + \frac{Z^2}{A^{1/3}} + \varepsilon \cdot \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} \pm \Delta, \quad (3.20)$$

$+\Delta$ для нечетно-нечетных ядер;
 $\Delta = 0$ для нечетных A ;
 $-\Delta$ для четно-четных ядер.

Если массу выражать в единицах массы (аеи), то:

$$m_{am}(A, Z) = Z \cdot m_{am}({}^1_1\text{H}) + (A - Z)m_n - \frac{E_{св}}{931,5}, \quad (3.21)$$

$$m_{am}(A, Z) = Z \cdot m_{am}({}^1_1\text{H}) + (A - Z)m_n - \frac{\alpha \cdot A + \beta \cdot A^{2/3} + \frac{Z^2}{A^{1/3}} + \varepsilon \cdot \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} \pm \Delta}{931,5}, \quad (3.22)$$

Таким образом, окончательный вид формул для энергии связи имеет вид:

$$E_{св} = \alpha \cdot A - \beta \cdot A^{2/3} - \gamma \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \varepsilon \cdot \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} \mp \Delta, \quad (3.23)$$

Следует обратить внимание, что для $E_{св}$ знак перед Δ меняется на противоположный, т.е. для $E_{св}$:

$-\Delta$ для нечетно-нечетных ядер;
 $\Delta = 0$ для нечетных A ;
 $+\Delta$ для четно-четных ядер.

Поправочный член Δ учитывает наибольшие изменения энергии связи, вызванные попарным взаимодействием нуклонов в ядре.

Коэффициенты α , β , γ , ε и Δ были найдены сравнением с известными значениями масс атомов:

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,01691 \text{ а.е.м.} = 15,75 \text{ МэВ;} \\ \beta &= 0,01911 \text{ а.е.м.} = 17,8 \text{ МэВ;} \\ \gamma &= 0,000762 \text{ а.е.м.} = 0,71 \text{ МэВ;} \\ \varepsilon &= 0,10181 \text{ а.е.м.} = 94,8 \text{ МэВ;} \\ \Delta &= 0,036 \cdot A^{-3/4} \text{ а.е.м.} = 33,5 \cdot A^{-3/4} \text{ МэВ.}\end{aligned}$$

По данным формулам можно с хорошим совпадением получить значения масс ядер для $A > 15$.

Примеры решения задач

Пример 3.1. Рассчитать дефект массы и энергию связи ядра ${}_{90}^{234}\text{Th}$.

Решение

Дано:	Определяют дефект массы:
${}_{90}^{234}\text{Th}$	
$E_{св} - ?$	$\Delta m = Z \cdot m({}_1^1\text{H}) + (A - Z) \cdot m({}_0^1\text{n}) - m_{ам},$
$\Delta m - ?$	$\Delta m = 90 \cdot 1,00783 + (234 - 90) \cdot 1,008665 - 234,04363 =$ $= 1,90883 \text{ аем},$

Определяют энергию связи ядра:

$$\begin{aligned}E_{св} &= \Delta m \cdot 931,5, \\ E_{св} &= 1,90883 \cdot 931,5 = 1778,08 \text{ МэВ.}\end{aligned}$$

Ответ: $\Delta m = 1,90883 \text{ аем}$, $E_{св} = 1778,08 \text{ МэВ}$.

Пример 3.2. Определить удельную энергию связи ядер ${}_{20}^{40}\text{Ca}$ и ${}_{20}^{41}\text{Ca}$, объяснить результат.

Решение

Дано:	Определяют удельные энергии связи ядра:
${}_{20}^{40}\text{Ca}$	
${}_{20}^{41}\text{Ca}$	
$\Delta E_{св} - ?$	$E_{св} = [Z \cdot m({}_1^1\text{H}) + (A - Z) \cdot m({}_0^1\text{n}) - m_{ам}] \cdot 931,5$ $\Delta E_{св} = \frac{E_{св}}{A} = \frac{[Z \cdot m({}_1^1\text{H}) + (A - Z) \cdot m({}_0^1\text{n}) - m_{ам}] \cdot 931,5}{A}$
	$\Delta E_{св}({}_{20}^{40}\text{Ca}) = \frac{[20 \cdot 1,00783 + (40 - 20) \cdot 1,008665 - 39,96259] \cdot 931,5}{40} = 8,5537 \text{ МэВ}$
	$\Delta E_{св}({}_{20}^{41}\text{Ca}) = \frac{[20 \cdot 1,00783 + (41 - 20) \cdot 1,008665 - 40,96228] \cdot 931,5}{41} = 8,5490 \text{ МэВ}$

В первом случае удельная энергия связи больше, т. к. имеет место чётно-чётное ядро.

Ответ: $\Delta E_{св}({}_{20}^{40}\text{Ca}) = 8,5537 \text{ МэВ}$, $\Delta E_{св}({}_{20}^{41}\text{Ca}) = 8,5490 \text{ МэВ}$.

Пример 3.3. Определить энергию связи дополнительного нейтрона, падающего в ядро ${}^{233}_{92}\text{U}$.

Решение

Дано: ${}^{233}_{92}\text{U}$ $\Delta E_n - ?$	${}^{233}_{92}\text{U} + {}^1_0n \rightarrow {}^{234}_{92}\text{U}$ $\Delta E_n = [m({}^{233}_{92}\text{U}) + m({}^1_0n) - m({}^{234}_{92}\text{U})] \cdot 931,5,$ $\Delta E_n = (233,03965 + 1,008665 - 234,04097) \cdot 931,5 = 6,84 \text{ МэВ}.$
--	--

Ответ: $\Delta E_n = 6,84 \text{ МэВ}$.

Пример 3.4. Рассчитать массу атома ${}^{238}_{92}\text{U}$. Определить степень ошибки.

Решение

Дано: ${}^{238}_{92}\text{U}$ $m_{ам} - ?$ $\varepsilon - ?$	$E_{св} = \alpha \cdot A - \beta \cdot A^{2/3} - \gamma \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \varepsilon \cdot \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} \mp \Delta,$ $E_{св} = 15,75 \cdot 238 - 17,8 \cdot 238^{2/3} - 0,71 \cdot \frac{92^2}{238^{1/3}} - 94,8 \cdot \frac{\left(\frac{238}{2} - 92\right)^2}{238} +$ $+ 33,5 \cdot 238^{-3/4} = 1805,364 \text{ МэВ},$ $m_{ам}(A, Z) = Z \cdot m_{ам}({}^1_1\text{H}) + (A - Z)m_n - \frac{E_{св}}{931,5},$ $m_{ам}(A, Z) = 92 \cdot 1,00783 + (238 - 92) \cdot 1,008665 - \frac{1805,364}{931,5} = 238,04732 \text{ аеМ},$ $\varepsilon = \frac{ m_{ам} - m_{расч} }{m_{ам}} \cdot 100\%,$ $\varepsilon = \frac{ 238,05021 - 238,04732 }{238,05021} \cdot 100\% = 1,21 \cdot 10^{-3}\%.$
---	---

Ответ: $m_{ам} = 238,04732 \text{ аеМ}$, $\varepsilon = 1,21 \cdot 10^{-3} \%$.

Контрольные задачи

1. Определить какая энергия выделится при слиянии двух ядер дейтерия.
2. Определить какая энергия выделится при α -распаде ядра ${}^{226}_{88}\text{Ra}$?
3. Какая энергия выделится при слиянии двух ядер ${}^6_3\text{Li}$?
4. Какая энергия выделится при слиянии ${}^3_1\text{H}$ и ${}^3_2\text{He}$?

5. Какая энергия выделится при распаде ядра ^8Be на 2 α -частицы?
6. Какая энергия выделится при β^- -превращении ядра ^{41}Ar ?
7. Рассчитать энергию, которая выделится при делении ядра ^{233}U на два ядра: ^{139}Ba и ^{90}Kr , если при этом еще вылетают 4 нейтрона.
8. Рассчитать дефект массы и энергию связи ядра ^{32}S .
9. Определить дефект массы и энергию связи ядра ^{12}C .
10. Изотоп какого элемента с массовым числом 90 наиболее устойчив?
11. Изотоп какого элемента наиболее устойчив при массовом числе 193?
12. Какой нуклид имеет оптимальное соотношение N/Z при массовом числе, равном 120.
13. Сравнить какое ядро устойчивее ^{40}Ar или ^{238}U ?
14. Сравнить какое из ядер ^{41}Ar и ^{40}Ar устойчивее?
15. С помощью формулы Вайцеккера-Ферми рассчитать массу атома ^{202}Hg , определить погрешность по сравнению с табличными данными.
16. С помощью формулы Вайцеккера-Ферми рассчитать массу атома ^{116}Sn , определить погрешность по сравнению с табличными данными.
17. С помощью формулы Вайцеккера-Ферми рассчитать массу атома ^{238}U , определить погрешность по сравнению с табличными данными.
18. Рассчитать с помощью формулы Вайцеккера-Ферми массу атома ^{226}Ra , определить погрешность по сравнению с табличными данными.
19. Рассчитать с помощью формулы Вайцеккера-Ферми массу атома ^{239}Pu , определить погрешность по сравнению с табличными данными.
20. С помощью формулы Вайцеккера-Ферми рассчитать массу атома ^{74}Br , определить погрешность по сравнению с табличными данными.
21. С помощью формулы Вайцеккера-Ферми рассчитать массу ^{212}Pb , определить погрешность по сравнению с табличными данными.
22. С помощью формулы Вайцеккера-Ферми рассчитать массу ^{90}Sr , определить погрешность по сравнению с табличными данными.
23. Насколько уменьшает энергию связи ненасыщенность ядерных сил поверхностных нуклонов в ядре ^{230}Th ?
24. Насколько уменьшают энергию связи силы электростатического отталкивания протонов в ядре ^{239}Pu ?
25. Определить энергию связи дополнительного нейтрона к ядру ^{122}Sb .
26. Рассчитать энергию связи дополнительного нейтрона к ядрам ^{86}Kr и ^{87}Kr . Почему одна больше другой?
27. Сравнить удельные энергии связи ядер ^{84}Kr и ^{85}Kr , объяснить различие величин.
28. Рассчитать упаковочные коэффициенты ядер ^{116}In и ^{116}Sn . Какое ядро имеет более плотную упаковку, почему?
29. Рассчитать упаковочные коэффициенты ядер ^{235}U и ^{238}U . Какое ядро имеет более плотную упаковку, почему?

4 РАДИОАКТИВНОСТЬ

4.1 Экспоненциальный закон радиоактивного распада

Первоначально открытые радиоактивные вещества имели не изменяющуюся во времени интенсивность излучения. Однако в 1902 г. Э. Резерфордом был открыт новый радиоактивный элемент – радон (Rn), образующийся при α -распаде радия. Это вещество оказалось замечательно тем, что интенсивность его излучения заметно уменьшалась со временем. В частности, она уменьшалась вдвое за 3,8 дня. Это происходило за счет распада атомов радона, т.е. уменьшения их числа.

Период полураспада $T_{1/2}$ – время, за которое первоначальное количество радиоактивных атомов уменьшается в два раза.

Широкое исследование радиоактивных элементов показало, что величина $T_{1/2}$ неодинакова для разных элементов, но всегда одна и та же для определенных изотопов.

Невозможно сказать, какой именно атом испытывает распад, связанный с излучением какой-либо частицы, но благодаря громадному числу атомов этот процесс в среднем протекает так, что за каждую единицу времени распадается всегда одна и та же часть λ всех атомов.

Это означает, что **скорость распада** (количество атомов, распавшихся за единицу времени) пропорциональна количеству атомов N :

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N, \quad (4.1)$$

где λ – постоянной распада (одна и та же часть всех атомов, которая распадается за каждую единицу времени);

знак (–) перед значением скорости означает, что количество атомов N уменьшается.

Приведем уравнение к виду:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt, \quad (4.2)$$

затем проинтегрируем его:

$$\ln N = -\lambda t + C, \quad (4.3)$$

Постоянную C определяем из условия, что для $t = 0$, $N = N_0$, тогда:

$$C = \ln N_0, \quad (4.4)$$

и уравнение перепишется:

$$\ln \frac{N}{N_0} = \lambda t, \quad (4.5)$$

проинтегрируем его и получим:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}, \quad (4.6)$$

или

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}. \quad (4.7)$$

Это уравнение отражает **экспоненциальный закон радиоактивного распада** – количество атомов (ядер) радиоактивного вещества убывает со временем экспоненциально.

Если в это уравнение вместо t подставить время полураспада $T_{1/2}$, то N в нем будет равно $N_0/2$, и можно найти соотношение между $T_{1/2}$ и λ :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (4.8)$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}, \quad (4.9)$$

логарифмируем:

$$-\ln 2 = -\lambda T_{1/2}, \quad (4.10)$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}. \quad (4.11)$$

Исходя из этого соотношения, можно получить более удобную для расчётов формулу:

$$N = N_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (4.12)$$

Иногда используется понятие **среднего времени жизни** ядер, которое определяется как сумма времен жизни всех ядер, деленная на количество этих ядер. Определяют эту сумму следующим образом, в момент времени t распадается за промежуток времени dt количество ядер:

$$dN = \lambda \cdot N_{(t)} \cdot dt. \quad (4.13)$$

Сумма времени жизни этих атомов будет:

$$t \cdot dN = \lambda t \cdot N_{(t)} \cdot dt. \quad (4.14)$$

Проинтегрировав это выражение от $t = 0$ до $t = \infty$ (т.к. за $t = \infty$ распадутся все атомы) и разделив эту сумму на первоначальное количество атомов N_0 , получают выражение для среднего времени жизни:

$$\tau = \frac{\int_{t=0}^{\infty} \lambda t \cdot N_{(t)} \cdot dt}{N_0} = \frac{\int_{t=0}^{\infty} \lambda t \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} \cdot dt}{N_0}, \quad (4.15)$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda}, \quad (4.16)$$

если подставим значение τ в уравнение закона радиоактивного распада, то получим:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \tau} = N_0 \cdot e^{-\lambda \frac{1}{\lambda}} = \frac{N_0}{e}, \quad (4.17)$$

т.е. за среднее время жизни количество атомов вещества уменьшается в e раз.

Значение $T_{1/2}$ для различных радионуклидов приведены в приложении А.

4.2 Активность

Скорость распада радиоактивного вещества, определяемая количеством распавшихся ядер в единицу времени, принято называть **активностью** данного вещества:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad (4.18)$$

Умножим в уравнении закона радиоактивного распада (4.7) обе части уравнения на λ получим **закон изменения активности со временем**:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ или } A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}}. \quad (4.19)$$

Также можно записать **закон изменения массы вещества со временем**:

$$m = m_0 e^{-\lambda t}. \quad (4.20)$$

Единицей измерения активности **в системе СИ** является 1 беккерель (1 Бк) – активность источника, в котором происходит 1 распад в секунду:

$$1 \text{ Бк} = 1 \text{ расп/с}.$$

До введения системы СИ в качестве меры радиоактивности было взято такое количество радиоактивного вещества, в котором в одну секунду происходит такое же количество распадов, как и в 1 г чистого радия. Однако

такое определение единицы измерения радиоактивности оказалось неудобным, т.е. количество распадов в 1 г радия постоянно уточнялось. Поэтому условились определять единицу радиоактивности (или единицу количества радиоактивного вещества), названную «Кюри» как $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду, или как количество вещества, претерпевающего $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в секунду. Это определение приблизительно совпадает со старым «естественным» определением этой единицы. Соотношение *внесистемной* и *системной* единиц измерения активности:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Ки} &= 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}, \\ 1 \text{ Бк} &= 2,7 \cdot 10^{-11} \text{ Ки}. \end{aligned}$$

Исходя из количества атомов можно получить зависимость *массы вещества от активности*:

$$m = \frac{N \cdot M}{N_A} = \frac{A \cdot M}{\lambda \cdot N_A} = \frac{A \cdot M \cdot T_{1/2}}{0,693 \cdot N_A} = 2,4 \cdot 10^{-24} \cdot A \cdot M \cdot T_{1/2} \text{ г}, \quad (4.21)$$

где A – активность, Бк;

$T_{1/2}$ – период полураспада, с;

$$m = \frac{3,7 \cdot 10^{10} \cdot A \cdot M}{\lambda \cdot N_A} = \frac{5,34 \cdot 10^{10} \cdot A \cdot M \cdot T_{1/2}}{N_A} = 8,88 \cdot 10^{-14} \cdot A \cdot M \cdot T_{1/2} \text{ г}, \quad (4.22)$$

где A – активность, Ки.

Часто приходится иметь дело с:

– *удельной активностью* – активностью, содержащейся в единице массы вещества (Бк/кг, Ки/кг):

$$A_{\text{уд}} = \frac{A}{m}, \quad (4.23)$$

– *объемной активностью* – активностью, содержащейся в единице объема (Бк/м³, Ки/м³, Бк/л, Ки/л):

$$A_v = \frac{A}{V}, \quad (4.24)$$

– *удельной поверхностной активностью* – активностью, приходящейся на единицу площади (Бк/м², Ки/м²):

$$A_s = \frac{A}{S}, \quad (4.25)$$

Последнюю величину иногда называют радиоактивным загрязнением (заражением) поверхности, а объемную активность – концентрацией.

Примеры решения задач

Пример 4.1. Какова в настоящее время активность источника ^{137}Cs , если по паспорту она была 30 мКи на март 1984 года ($T_{1/2} = 30$ лет).

Решение

Дано:	1. Определяют прошедшее время:
$A_0 = 30$ мКи	$06.2019 - 03.1984 = 35$ лет 3 месяца $\approx 35,25$ года
$T_{1/2} = 30$ лет	2. Определяют активность в настоящее время:
$A - ?$	

$$A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

$$A = 30 \cdot 2^{-\frac{35,25}{30}} = 13,29 \text{ мКи.}$$

Ответ: $A = 13,29$ мКи.

Пример 4.2. Исходная активность образца ^{242}Am в 1973 году составляла $1,5 \cdot 10^{11}$ Бк. Период полураспада ^{242}Am – 152 года. Какова масса ^{242}Am в настоящее время в образце и как она уменьшилась?

Решение

Дано:	1. Определяем прошедшее время:
$A_0 = 1,5 \cdot 10^{11}$ Бк	$2019 - 1973 = 46$ лет
$T_{1/2} = 152$ года	2. Определяем активность в настоящее время:
$m - ?$	
$\Delta m - ?$	

$$A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

$$A = 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 2^{-\frac{46}{152}} = 1,216 \cdot 10^{11} \text{ Бк.}$$

3. Определяем массу в настоящее время:

$$m = 2,4 \cdot 10^{-24} \cdot A \cdot M \cdot T_{1/2},$$

$$m = 2,4 \cdot 10^{-24} \cdot 1,216 \cdot 10^{11} \cdot 242 \cdot 152 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 0,339 \text{ г.}$$

4. Определяем исходную массу:

$$m = 2,4 \cdot 10^{-24} \cdot A \cdot M \cdot T_{1/2},$$

$$m_0 = 2,4 \cdot 10^{-24} \cdot 1,5 \cdot 10^{11} \cdot 242 \cdot 152 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 0,418 \text{ г.}$$

5. Определяют уменьшение массы:

$$\Delta m = m_0 - m,$$

$$\Delta m = 0,418 - 0,339 = 0,079 \text{ г.}$$

Ответ: $m = 0,339$ г, $\Delta m = 0,079$ г.

Пример 4.3. Два измерения, выполненные через 1 час, дали результаты – 120 Бк и 40 Бк. Определить период полураспада.

Решение

Дано:
$A_0 = 120$ Бк
$A = 40$ Бк
$t = 1$ ч
$T_{1/2} = ?$

Выражают период полураспада:

$$A = A_0 \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}},$$

$$2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} = \frac{A}{A_0},$$

$$-\frac{t}{T_{1/2}} \cdot \lg 2 = \lg \left(\frac{A}{A_0} \right),$$

$$T_{1/2} = -\frac{t}{\lg \left(\frac{A}{A_0} \right)} \cdot \lg 2,$$

$$T_{1/2} = -\frac{1}{\lg \left(\frac{40}{120} \right)} \cdot \lg 2 = 0,63 \text{ ч.}$$

Ответ: $T_{1/2} = 0,63$ ч.

Контрольное задание

1. Какую активность в настоящее время имеет препарат ^{90}Sr , если 14 лет назад она была 10^5 Бк ($T_{1/2} = 27,8$ лет)?
2. Определить активность источника ^{137}Cs в настоящее время, если 20 лет назад она была 30 мКи ($T_{1/2} = 30$ лет).
3. Источник ^{90}Sr ($T_{1/2} = 27,8$ лет) имел поверхностную активность $3 \cdot 10^5$ расп/мин·см², измеренную 15 лет назад. Какова она сейчас?
4. Какую активность имеет в настоящее время источник ^{60}Co , если по паспорту его активность 15 мКи на май 1996 года ($T_{1/2} = 5,2$ лет)?
5. Какую активность имеет в настоящее время источник ^{60}Co , если по паспорту его активность 10 мКи на май 1992 года ($T_{1/2} = 5,2$ лет)?
6. Источник ^{90}Sr имеет по паспорту активность $2 \cdot 10^4$ расп/мин, измеренную в ноябре 1975 года ($T_{1/2} = 27,8$ лет). Определить активность в настоящее время.
7. Определить активность источника ^{90}Sr в настоящее время, если в мае 1975 года была 30 мКи ($T_{1/2} = 27,8$ лет).

8. Какую активность имеет препарат ^{90}Sr , если его паспортная активность 5000 Бк на ноябрь 1987 года ($T_{1/2} = 27,8$ лет)?

9. Какую активность имеет в настоящее время источник ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30$ лет), если в ноябре 1977 года она была 30 мКи.

10. Какова в настоящее время активность источника ^{137}Cs , если по паспорту она была 30 мКи на май 1984 года ($T_{1/2} = 30$ лет).

11. Определить активность 1 кг ^{235}U , если его период полураспада $7,13 \cdot 10^8$ лет.

12. Определить активность 1 г ^{90}Sr ($T_{1/2} = 27,8$ лет).

13. Какую активность имеет 1 г ^{99}Tc ($T_{1/2} = 2,1 \cdot 10^5$ лет).

14. Какую активность имеет навеска чистого ^{235}U массой 1 г ($T_{1/2} = 7,13 \cdot 10^8$ лет)?

15. Определить какую активность имеет 1 г соли KCl , если в составе калия имеется 0,0119 % ^{40}K , являющегося β -излучателем с периодом полураспада $1,3 \cdot 10^9$ лет.

16. Период полураспада ^{239}Pu $2,44 \cdot 10^4$ лет, какой активностью обладает 1 кг препарата?

17. Определить период полураспада чистого вещества 50 мг которого показали активность 10^6 Бк ($M = 138$).

18. Каков период полураспада вещества, если 1 г его имеет активность $3,7 \cdot 10^{12}$ Бк ($M = 110$)?

19. Чему равен период полураспада вещества, если 0,1 г его имеет активность 10 Ки ($M = 138$)?

20. 1 г чистого вещества имеет активность 0,1 Ки. Определить период полураспада ($M = 138$).

21. Определить период полураспада, если 0,1 г чистого вещества имеет активность 10 мКи ($M = 120$).

22. Определить период полураспада препарата, если измерения с разностью в 10 минут дали скорости счета 5000 имп/мин и 1000 имп/мин.

23. Определить период полураспада, если измеренная через 2 часа дали скорость счета 20 имп/с и 10 имп/с.

24. Два измерения активности, выполненные через 3 дня, дали величины 5 мКи и 50 мКи. Определить период полураспада.

25. При определении активности препарата ^{118}Sb за 12 часов измерения был зарегистрирован спад с 4,054 мКи до 811 мКи. Каков измеренный период полураспада?

26. Скорость счета от препарата за 12 минут изменилась с 5000 имп/с до 1500 имп/с. Чему равен период полураспада.

27. Два измерения активности, выполненные через 10 часов, дали скорости счета 2000 имп/с и 1500 имп/с. Определить период полураспада.

28. Два измерения, выполненные через 1 час, дали результаты – 120 Бк и 40 Бк. Определить период полураспада.

29. Определить период полураспада одного из изотопов галлия (^{73}Ga), если после 10 часов активность снизилась в 4 раза.

30. Определить период полураспада препарата, если при измерении через 1 час его активность изменилась в 4 раза?

31. Определить массу $2 \cdot 10^6$ Ки ^{140}Ba , если его период полураспада равен 13 дней.

32. Рассчитать в какой массе ^{232}Th происходит 100 α -распадов в секунду ($T_{1/2} = 1,39 \cdot 10^{10}$ лет).

33. Определить массу, выброшенного при аварии из реактора ^{131}I , если его активность составила 10^7 Ки ($T_{1/2} = 8,05$ дней).

34. Определить массу, выброшенного из реактора ^{137}Cs , если его активность составляет $1,5 \cdot 10^{16}$ Бк ($T_{1/2} = 30$ лет).

35. Определить массу, выброшенного из реактора ^{85}Kr , если его активность составляет $50 \cdot 10^6$ Ки ($T_{1/2} = 10,7$ лет).

36. Определить какую массу ^{89}Sr выбросил аварийный реактор, если его активность $2 \cdot 10^6$ Ки, а период полураспада 50,5 суток.

37. Определить массу, выброшенного из реактора ^{133}Xe , если его активность составляет $50 \cdot 10^6$ Ки, а период полураспада 5,3 суток.

38. Какая доля трития остается нераспавшейся после выдержки воды в бассейне в течение двух лет ($T_{1/2} = 12,26$ лет)?

39. Какая доля ^{90}Sr распалась за 10 лет, прошедшего после аварии ($T_{1/2} = 27,8$ лет)?

40. В доске, взятой из древнего строения, осталось 70 % ^{14}C от исходного. Сколько лет назад было срублено дерево ($T_{1/2} = 5790$ лет)?

41. Исходная активность образца ^{227}Ac в 1995 году составляла 100 Бк. Период полураспада ^{227}Ac – 21,7 лет. Какова масса ^{227}Ac в настоящее время в образце и как она уменьшилась?

42. Исходная активность образца ^{228}Th в 2012 году составляла 140 Бк. Период полураспада ^{228}Th – 1,9 лет. Какова масса ^{228}Th в настоящее время в образце и как она уменьшилась?

43. Исходная активность образца ^{238}Pu в 1987 году составляла 170 Бк. Период полураспада ^{238}Pu – 87,74 года. Какова масса ^{238}Pu в настоящее время в образце и как она уменьшилась?

44. Исходная активность образца ^{250}Cf в 2009 году составляла 240 Бк. Период полураспада ^{250}Cf – 13,2 года. Какова масса ^{250}Cf в настоящее время в образце и как она уменьшилась?

45. Исходная активность образца ^{244}Cm в 2011 году составляла 190 Бк. Период полураспада ^{244}Cm – 18,1 года. Какова масса ^{244}Cm в настоящее время в образце и как она уменьшилась?

46. Исходная активность образца ^{235}Np в 2013 году составляла 500 Бк. Период полураспада ^{235}Np – 410 дней. Какова масса ^{235}Np в настоящее время в образце и как она уменьшилась?

5 НАКОПЛЕНИЕ И РАСПАД РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР

5.1 Общее уравнение накопления и распада атомных ядер

В практике довольно часто имеют место случаи, когда образовавшийся в результате распада элемент в свою очередь также является радиоактивным. Рассмотрим процесс накопления и распада атомных ядер в этом случае.

Процесс распада материнского вещества описывается уравнением:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1, \quad (5.1)$$

где N_1 – количество ядер материнского вещества в момент t ;

λ_1 – постоянная распада материнского вещества.

А процесс изменения количества ядер дочернего изотопа будет складываться из двух процессов – накопления за счет распада материнского изотопа и распада:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2, \quad (5.2)$$

где N_2 – количество ядер дочернего вещества в момент t ;

λ_2 – постоянная распада дочернего вещества.

Таким образом, имеется система уравнений. Решение уравнения распада материнского вещества известно:

$$N_1 = N_{1(0)} \cdot e^{-\lambda_1 t}, \quad (5.3)$$

где $N_{1(0)}$ – количество ядер материнского вещества в момент $t = 0$.

Подставив это решение в уравнение распада дочернего изотопа, получим следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_{1(0)} \cdot e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2. \quad (5.4)$$

Решение этого уравнения осуществляется методом умножения на интегрирующий множитель. В итоге получится следующее уравнение накопления и распада дочернего радиоактивного вещества:

$$N_{2(t)} = N_{1(0)} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) + N_{2(0)} \cdot e^{-\lambda_2 t}. \quad (5.5)$$

где $N_{2(0)}$ – количество ядер дочернего вещества в момент $t = 0$.

Для случая $N_{2(0)} = 0$, т.е. когда имеем исходный чистый материнский изотоп:

$$N_{2(t)} = N_{1(0)} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}). \quad (5.6)$$

Проанализируем несколько важных для практики случаев применения полученного уравнения.

5.2 Радиоактивное равновесие (вековое и подвижное)

При рассмотрении природных радиоактивных семейств видно, что самыми долгоживущими изотопами являются родоначальники семейств.

Рассмотрим случай, когда дочерний элемент является короткоживущим, а материнский – долгоживущим, т.е. $T_{1/2\ 1} \gg T_{1/2\ 2}$ и следовательно $\lambda_1 \ll \lambda_2$ – **вековое равновесие**.

Исходя из этого можно формулу для чистого материнского изотопа переписать в виде:

$$N_{2(t)} = N_{1(0)} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot (1 - e^{-\lambda_2 t}), \quad (5.7)$$

$$A_{2(t)} = A_{1(0)} \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2\ 2}}} \right). \quad (5.8)$$

Через 5 – 10 периодов полураспада дочернего изотопа $1 - e^{-\lambda_2 t}$ асимптотически приблизится к единице, и установится радиоактивное равновесие:

$$N_{2(t)} = N_{1(0)} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \quad (5.9)$$

или

$$N_{2(t)} \cdot \lambda_2 = N_{1(0)} \cdot \lambda_1, \quad (5.10)$$

$$A_{2(t)} = A_{1(0)}. \quad (5.11)$$

Это уравнение является уравнением **векового равновесия**. Оно означает, что скорости распада (активности) материнского и дочернего вещества равны, а отношения количеств атомов обратно пропорциональны постоянным распада:

$$\frac{N_{2(t)}}{N_{1(0)}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}. \quad (5.12)$$

Графически изменение количества ядер материнского и дочернего изотопов для векового равновесия можно представлено на рис. 5.1.

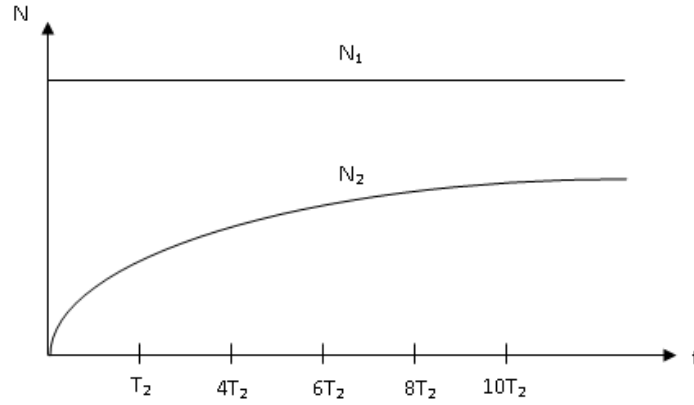


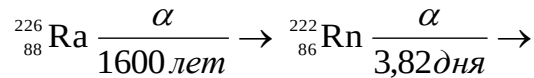
Рис. 5.1. Графически изменение количества ядер материнского и дочернего изотопов для векового равновесия

Исходя из приведенных рассуждений, в радиоактивном ряду должно выполняться равенство:

$$\lambda_1 N_{1(0)} = \lambda_2 N_2 = \lambda_3 N_3 = \dots \quad (5.13)$$

Однако обязательным условием этого равенства является то, что материнский изотоп должен иметь очень большой период полураспада.

Пример векового равновесия:



Кроме состояния векового равновесия, которое характерно для веществ с очень большим периодом полураспада и большим отличием между постоянными распада материнского и дочернего изотопов, существует еще состояние **подвижного (динамического) равновесия**. Оно бывает, когда периоды полураспада (постоянные распада) отличаются, не столь значительно, и при этом материнское вещество является более долгоживущим, т.е. $\lambda_1 < \lambda_2$.

Исходя из условия $\lambda_1 < \lambda_2$ получим, что через некоторое время t , равное нескольким $T_{1/2\ 2}$, $e^{-\lambda_1 t} \gg e^{-\lambda_2 t}$ и уравнение для чистого материнского изотопа может быть записано:

$$N_{2(t)} = N_{1(0)} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_1 t}, \quad (5.14)$$

$$A_{2(t)} = A_{1(0)} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2_1}}} = A_{1(0)} \cdot \frac{T_{1/2_1}}{T_{1/2_1} - T_{1/2_2}} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2_1}}}, \quad (5.15)$$

или

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (5.16)$$

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} . \quad (5.17)$$

Это уравнение и будет уравнением динамического равновесия. Графически процесс изменения количеств ядер N_1 и N_2 будет выглядеть как показано на рис. 5.2.

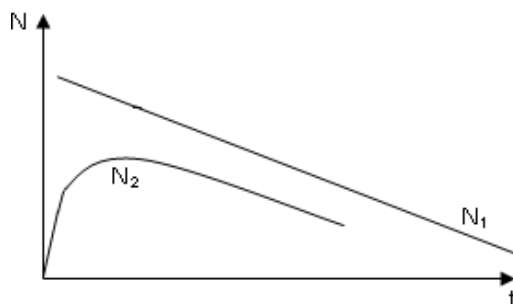
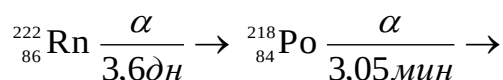


Рис. 5.2. Графически изменение количества ядер материнского и дочернего изотопов для подвижного равновесия

Количество ядер материнского и дочернего изотопов изменяется, но соотношение остается постоянным.

Пример подвижного равновесия:



5.3 Отсутствие радиоактивного равновесия между элементами

Условием установления радиоактивного равновесия между элементами (векового или динамического) является больший период полураспада у материнского изотопа по сравнению с дочерним. Если же это условие не соблюдается, то **равновесие не наступит**.

Пусть $\lambda_1 > \lambda_2$, тогда по истечении достаточного большого времени $e^{-\lambda_1 t} \ll e^{-\lambda_2 t}$ и уравнение для чистого материнского изотопа переписывается как:

$$N_{2(t)} = N_{1(0)} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot e^{-\lambda_2 t} , \quad (5.18)$$

$$A_{2(t)} = A_{1(0)} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2_2}}} = A_{1(0)} \cdot \frac{T_{1/2_1}}{T_{1/2_1} - T_{1/2_2}} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2_2}}} , \quad (5.19)$$

т.е. количество ядер будет убывать с периодом полураспада дочернего изотопа. Графически этот процесс будет выглядеть как показано на рис. 5.3. Здесь материнский изотоп распадается раньше, чем наступит радиоактивное равновесие.

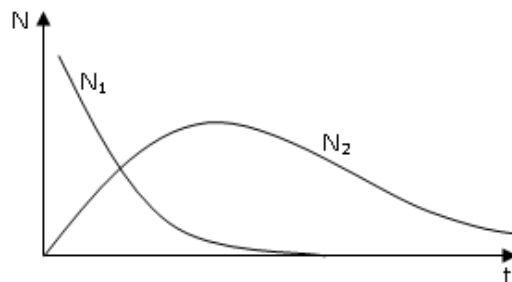


Рис. 5.3. Графически изменение количества ядер материнского и дочернего изотопов при отсутствии равновесия

Радиоактивное равновесие может отсутствовать в природных условиях между членами ряда еще и тогда, когда образующийся изотоп уносится из руды. Это может быть за счет того, что образующийся элемент газообразен, например, радон. Или потому, что образующийся элемент выщелачивается природными водами.

Соотношения между периодами полураспада в цепочках распада представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Соотношения между периодами полураспада в цепочках распада

Модельная ситуация	Условие	Полная активность образца	Время наступления
Вековое равновесие	$T_{1/2\ 1} \gg T_{1/2\ 2}$	Увеличивается	Примерно $7T_{1/2\ 2}$
Подвижное равновесие	$T_{1/2\ 1} > T_{1/2\ 2}$	Увеличивается	Зависит от $T_{1/2\ 2}$
Отсутствие равновесия	$T_{1/2\ 1} < T_{1/2\ 2}$	Уменьшается	Мгновенно

Примечание. $T_{1/2\ 1}$ – период полураспада материнского ядра, $T_{1/2\ 2}$ – период полураспада дочернего ядра.

Максимальное время установления равновесия может быть определено по формуле:

$$t_{\max} = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \ln\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) = \frac{T_{1/2\ 1} \cdot T_{1/2\ 2}}{0,693 \cdot (T_{1/2\ 1} - T_{1/2\ 2})} \cdot \ln\left(\frac{T_{1/2\ 1}}{T_{1/2\ 2}}\right). \quad (5.20)$$

5.4 Баланс радиоактивных атомов в цепочке радиоактивных превращений

В случае цепочки радиоактивных превращений баланс радиоактивных атомов определяется следующими дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1, \quad (5.21)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = -\lambda_2 N_2 + \lambda_1 N_1, \quad (5.22)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = -\lambda_3 N_3 + \lambda_2 N_2, \quad (5.23)$$

.....

где индекс 1 относится к первичному материнскому радиоактивному веществу, а индексы 2, 3, ... – к дочерним.

Если считать, что в начальный момент времени $t = 0$ существует только первичное радиоактивное вещество то общее выражение для активности некоторого n -ого нуклида будет иметь вид:

$$A_n = A_{1(0)} \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 \cdot \dots \cdot \lambda_n \cdot \left(\frac{e^{-\lambda_1 t}}{(\lambda_2 - \lambda_1) \cdot (\lambda_3 - \lambda_1) \cdot \dots \cdot (\lambda_n - \lambda_1)} + \frac{e^{-\lambda_2 t}}{(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot (\lambda_3 - \lambda_2) \cdot \dots \cdot (\lambda_n - \lambda_2)} + \dots + \frac{e^{-\lambda_n t}}{(\lambda_1 - \lambda_n) \cdot (\lambda_2 - \lambda_n) \cdot \dots \cdot (\lambda_{n-1} - \lambda_n)} \right) \quad (5.24)$$

5.5 Правила смещения

Зная, какое ядро распадается и тип распада, всегда можно определить, какое ядро получится в результате распада.

Дело в том, что в результате α -распада уносится два протона и два нейтрона и, таким образом, получается ядро с массовым числом A на 4 меньше и с Z на 2 меньше, т.е. образовавшийся элемент смещен относительно исходного в таблице Менделеева на 2 клетки.

При β -распаде же массовое число ядра не изменяется, а образовавшийся элемент смещается на одну клетку вправо.

Эти правила, называемые правилами смещения сформулированы в 1913 г. Фаянсом и Содди. Схематически их можно записать так:



Примеры решения задач

Пример 5.1. Для векового равновесия определить активность дочернего радионуклида ^{90}Y ($T_{1/2} = 2,67$ дня) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ^{90}Sr 5 дней назад составляла 20 мКи.

Решение

Дано: $A_0(^{90}\text{Sr}) = 20 \text{ мКи}$ $T_{1/2}(^{90}\text{Y}) = 2,67 \text{ дня}$ $t = 5 \text{ дней}$ $A(^{90}\text{Y}) - ?$	Определяют активность дочернего изотопа в настоящее время: $A_{2(t)} = A_{1(0)} \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2_2}}}\right),$ $A(^{90}\text{Y}) = 20 \cdot \left(1 - 2^{-\frac{5}{2,67}}\right) = 14,54 \text{ мКи.}$
--	--

Ответ: $A(^{90}\text{Y}) = 14,54 \text{ мКи.}$

Пример 5.2. Для подвижного равновесия определить активность дочернего радионуклида ^{218}Po ($T_{1/2}(^{218}\text{Po}) = 3,05 \text{ мин}$) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ^{222}Rn ($T_{1/2}(^{222}\text{Rn}) = 3,6 \text{ дней}$) 2 дня назад составляла 30 мКи.

Решение

Дано: $A_0(^{222}\text{Rn}) = 30 \text{ мКи}$ $T_{1/2}(^{218}\text{Po}) = 3,05 \text{ мин}$ $T_{1/2}(^{222}\text{Rn}) = 3,6 \text{ дней}$ $t = 2 \text{ дня}$ $A(^{218}\text{Po}) - ?$	Определяют активность дочернего изотопа в настоящее время: $A_{2(t)} = A_{1(0)} \cdot \frac{T_{1/2_1}}{T_{1/2_1} - T_{1/2_2}} \cdot 2^{-\frac{t}{T_{1/2_1}}},$ $A(^{218}\text{Po}) = 30 \cdot \frac{3,6 \cdot 24 \cdot 60}{3,6 \cdot 24 \cdot 60 - 3,05} \cdot 2^{-\frac{2}{3,6}} = 20,42 \text{ мКи.}$
---	--

Ответ: $A(^{218}\text{Po}) = 20,42 \text{ мКи.}$

Пример 5.3. Определить максимальное время установления равновесия между радионуклидами с периодами полураспада: $T_{1/2_1} = 1 \text{ день}$, $T_{1/2_2} = 3 \text{ ч.}$

Решение

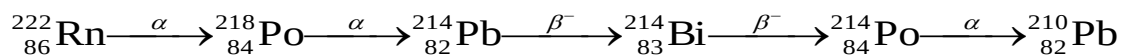
Дано: $T_{1/2_1} = 1 \text{ день}$ $T_{1/2_2} = 3 \text{ ч}$ $t_{\max} - ?$	Определяют максимальное время установления равновесия: $t_{\max} = \frac{T_{1/2_1} \cdot T_{1/2_2}}{0,693 \cdot (T_{1/2_1} - T_{1/2_2})} \cdot \ln\left(\frac{T_{1/2_1}}{T_{1/2_2}}\right),$ $t_{\max} = \frac{1 \cdot 24 \cdot 3}{0,693 \cdot (1 \cdot 24 - 3)} \cdot \ln\left(\frac{1 \cdot 24}{3}\right) = 10,3 \text{ ч.}$
--	---

Ответ: $t_{\max} = 10,3 \text{ ч.}$

Пример 5.4. Написать цепочку радиоактивного распада $^{222}_{86}\text{Rn}$, если он претерпевает 2α , $2\beta^-$ и 1α распады.

Решение

Записывают цепочку распада, используя правилами смещения Фаянса и Содди:



Контрольное задание

1. Для векового равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 4$ дня) в настоящее время, если активность материнского радионуклида 3 дня назад составляла 25 мКи.

2. Для векового равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 2$ дня) в настоящее время, если активность материнского радионуклида 5 дней назад составляла 15 мКи.

3. Для векового равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 3,5$ дня) в настоящее время, если активность материнского радионуклида 8 дней назад составляла 20 мКи.

4. Для векового равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 2,9$ дней) в настоящее время, если активность материнского радионуклида 6 дней назад составляла 23 мКи.

5. Для векового равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 4,1$ дней) в настоящее время, если активность материнского радионуклида 5 дней назад составляла 18 мКи.

6. Для подвижного равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 5$ мин) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2} = 5$ дней) 4 дня назад составляла 35 мКи.

7. Для подвижного равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 4,5$ мин) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2} = 24$ ч) 36 ч назад составляла 31 мКи.

8. Для подвижного равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 3,3$ мин) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2} = 4$ дня) 6 дней назад составляла 29 мКи.

9. Для подвижного равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 5,3$ мин) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2} = 6,7$ ч) 5 ч назад составляла 27 мКи.

10. Для подвижного равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2} = 37$ мин) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2} = 1$ день) 20 ч назад составляла 33 мКи.

11. Для отсутствия равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2\ 2} = 3,7$ ч) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2\ 1} = 18$ мин) 9 ч назад составляла 15 мКи.

12. Для отсутствия равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2\ 2} = 7$ ч) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2\ 1} = 25$ мин) 6 ч назад составляла 18 мКи.

13. Для отсутствия равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2\ 2} = 3$ дня) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2\ 1} = 5$ мин) 10 ч назад составляла 26 мКи.

14. Для отсутствия равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2\ 2} = 20$ ч) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2\ 1} = 3$ мин) 12 ч назад составляла 23 мКи.

15. Для отсутствия равновесия определить активность дочернего радионуклида ($T_{1/2\ 2} = 40$ ч) в настоящее время, если активность материнского радионуклида ($T_{1/2\ 1} = 1$ ч) 25 ч назад составляла 19 мКи.

16. Определить максимальное время установления равновесия между радионуклидами с периодами полураспада: $T_{1/2\ 1} = 3$ дня, $T_{1/2\ 2} = 7$ ч.

17. Определить максимальное время установления равновесия между радионуклидами с периодами полураспада: $T_{1/2\ 1} = 10,5$ лет, $T_{1/2\ 2} = 15,5$ дней.

18. Определить максимальное время установления равновесия между радионуклидами с периодами полураспада: $T_{1/2\ 1} = 3,2$ ч, $T_{1/2\ 2} = 20$ дней.

19. Определить максимальное время установления равновесия между радионуклидами с периодами полураспада: $T_{1/2\ 1} = 20$ дней, $T_{1/2\ 2} = 2,5$ ч.

20. Определить максимальное время установления равновесия между радионуклидами с периодами полураспада: $T_{1/2\ 1} = 20$ лет, $T_{1/2\ 2} = 11,7$ дней.

21. Написать цепочку радиоактивного распада для $^{237}_{93}\text{Np}$, если происходит 1α , $1\beta^-$, 2α и $1\beta^-$ превращения.

22. Написать цепочку радиоактивного распада, начиная с $^{213}_{83}\text{Bi}$, если происходит 1α и $2\beta^-$ превращений.

23. Написать цепочку радиоактивных превращений $^{210}_{84}\text{Po}$, который претерпел $1\beta^-$, 2α и $2\beta^-$ превращений.

24. Написать цепочку радиоактивных превращений для $^{137}_{54}\text{Xe}$, если он претерпевает $4\beta^-$ превращения.

25. Написать цепочку радиоактивного распада $^{232}_{90}\text{Th}$, претерпевающего 1α , $2\beta^-$, 2α превращений.

6 α -ИЗЛУЧЕНИЕ

6.1 Энергетика α -распада

Альфа-распад – это самопроизвольное радиоактивное превращение атомного ядра, при котором испускается α -частица (${}^4_2\text{He}$).

В результате такого превращения материнское ядро с электрическим зарядом Z и массовым числом A превращается в новое дочернее ядро с зарядом $Z - 2$.

α -частица имеет массу $4,003873$ а.е.м. = $6,64783 \cdot 10^{-24}$ г, удельную энергию связи $\Delta E_{св} = 7,05$ МэВ/нуклон, скорость вылета α -частицы $14000 - 20000$ км/с.

Расчетным путем энергию, освобождающуюся при α -распаде, можно определить через массы исходного ядра, дочернего ядра и α -частицы:

$$E_{\alpha\text{-расп}} = [M_a({}^A_Z X) - M_a({}^{A-4}_{Z-2} Y) - M_a({}^4_2 \text{He})] \cdot 931,5 \text{ МэВ}. \quad (6.1)$$

При этом энергия α -распада распределяется между кинетическими энергиями ядра отдачи и α -частицы. Исходя из закона сохранения импульса:

$$m_{\text{яо}} v_{\text{яо}} = m_{\alpha} v_{\alpha}. \quad (6.2)$$

Возведя обе части равенства в квадрат и разделив на 2, получим:

$$m_{\text{яо}} E_{\text{яо}} = m_{\alpha} E_{\alpha}, \quad (6.3)$$

откуда

$$E_{\text{яо}} = E_{\alpha} \frac{m_{\alpha}}{m_{\text{яо}}}, \quad (6.4)$$

поскольку $m_{\alpha} \ll m_{\text{яо}}$, то $E_{\alpha} \gg E_{\text{яо}}$. Таким образом кинетическая энергия α -частицы значительно больше энергии ядра отдачи.

6.2 Пробег α -частиц в воздухе

Рассмотрение фотографий треков α -частиц показывает, что они прямолинейны и имеют почти одинаковую длину, за исключением длиннопробежных α -частиц. Длина пробега α -частиц различной начальной энергии E_{α} показана в табл. 6.1.

Как видно из графика на рис. 6.1 (кривая a), пробеги абсолютного большинства α -частиц остаются одинаковыми. На участке 1-2 кривая резко падает до нуля, однако не параллельно оси ординат, а постепенно. Это характеризует некоторый разброс в длине пробега (2 – 3 %).

Кривая b характеризует относительное число α -частиц с пробегом R .

Максимум этой кривой соответствует среднему пробегу $\bar{R}$ α -частиц. Средний пробег является основной характеристикой данного α -радиоактивного изотопа.

Таблица 6.1

Пробеги α -частиц в некоторых средах

Энергия α -частиц, МэВ	4	6	8	10
Воздух, см	2,5	4,6	7,4	10,6
Биологическая ткань, мкм	31	56	96	130
Алюминий, мкм	16	30	48	69

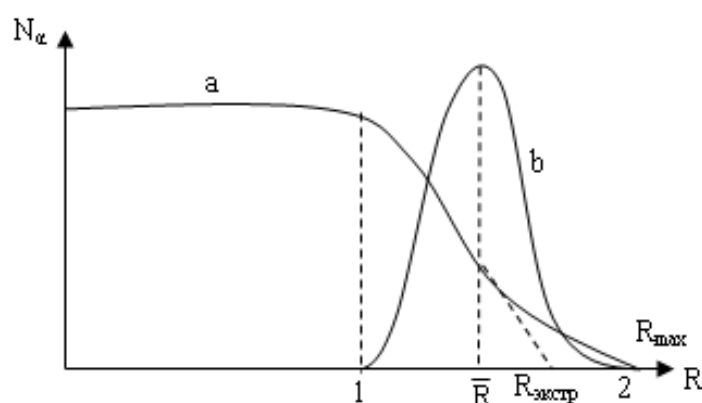


Рис. 6.1. Пробег α -частиц

В таблицах физических величин обычно указывается именно $\bar{R}$ — средний пробег. Иногда используются и другие пробеги. В частности, длина, получаемая прямолинейным продолжением кривой a до пересечения с осью абсцисс называется экстраполированным (практическим) пробегом $R_{экстр}$. Пересечение кривой «а» с осью абсцисс определяет максимальный пробег R_{max} . Подобными кривыми можно было бы воспользоваться для определения начальной энергии α -частицы (в момент вылета).

Зная выражение энергии частицы через скорость, нетрудно получить формулу, связывающую пробег в воздухе и энергию α -частицы:

$$\bar{R}_{\alpha-возд} = 0,318 \cdot E_{\alpha}^{3/2} \text{ см}, \quad (6.5)$$

где E_{α} — начальная кинетическая энергия α -частицы, МэВ.

6.3 Пробег α -частиц в различных средах. Правило Брэгга-Климена

Определение пробега α -частиц в различных средах производится на основе эмпирического правила Брега-Климена, согласно которому пробеги α -

частиц в двух различных веществах обратно пропорциональны плотностям этих веществ.

Исходя из этого правила можно произвести вычисления пробега α -частицы в веществе по приближенной формуле Брега-Климена (с точностью до 10 %):

$$R = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot \bar{R}_{\alpha-\text{возд}} \frac{\sqrt{A}}{\rho} = \frac{10^{-4} \cdot \sqrt{AE_{\alpha}^3}}{\rho} \text{ см}, \quad (6.6)$$

где R – пробег в данном веществе, см;

$\bar{R}_{\alpha-\text{возд}}$ – пробег α -частиц в воздухе, см;

ρ – плотность среды, г/см³;

A – среднее массовое число.

Данное правило имеет приближенную точность, но погрешность его (± 10 %) вполне допустима для практических расчетов.

Иногда возникает затруднение с определением $\bar{A}$ (среднего атомного веса, среднего атомного числа). Рекомендуется определять его таким образом:

1. Для сложных молекулярных веществ, как:

$$\bar{A} = \frac{M}{n}, \quad (6.7)$$

где M – молекулярный вес;

n – число атомов в молекуле.

Например, $\bar{A}$ стекла ($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$):

$$\bar{A} = \frac{478}{23} = 21,2.$$

2. Для механических смесей:

$$\bar{A} = \sum p_i \cdot M_i, \quad (6.8)$$

где p_i – весовая доля i -го вещества

Для многокомпонентных по составу сред расчет массового пробега R_{α} (г/см²) можно также выполнить по формуле:

$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{f_i}{R_{\alpha,i}} \right), \quad (6.9)$$

где $R_{\alpha,i}$ – пробег α -частицы в материале i -го компонента с весовым содержанием f_i , г/см².

Примеры решения задач

Пример 6.1. Используя справочные данные по массам атомов, определить полную энергию альфа-распада ^{235}U .

Решение

Дано: ^{235}U $E_\alpha - ?$	Записывают альфа-распад ^{235}U :
	$^{235}_{92}\text{U} \xrightarrow{\alpha} ^{231}_{90}\text{Th} + ^4_2\text{He}.$

Определяют энергию альфа-распада:

$$E_\alpha = [M_a(^{235}_{92}\text{U}) - M_a(^{231}_{90}\text{Th}) - M_a(^4_2\text{He})] \cdot 931,5,$$

$$E_\alpha = (235,0439 - 231,0363 - 4,0026) \cdot 931,5 = 0,005 \cdot 931,5 = 4,6575 \text{ МэВ}.$$

Ответ: $E_\alpha = 4,6575 \text{ МэВ}$.

Пример 6.2. Рассчитать пробег α -частиц ^{239}Pu ($E = 5,25 \text{ МэВ}$) в биологической ткани. Принять атомную массу биологической ткани $A = 15,7$, а ее плотность 1 г/см^3 .

Решение

Дано: $E = 5,25 \text{ МэВ}$ $A = 15,7$ $\rho = 1 \text{ г/см}^3$ $R_\alpha - ?$	Пробег α -частиц в среде:
	$R_\alpha = \frac{10^{-4} \sqrt{A \cdot E_\alpha^3}}{\rho},$
	$R_\alpha = \frac{10^{-4} \sqrt{15,7 \cdot 5,25^3}}{1} = 4,77 \cdot 10^{-3} \text{ см}.$

Ответ: $R_\alpha = 4,77 \cdot 10^{-3} \text{ см}$.

Пример 6.3. Определить пробег α -частиц в воздухе от многокомпонентного источника, состоящего из ^{239}Pu ($E = 5,15 \text{ МэВ}$) и ^{238}U ($E = 4,18 \text{ МэВ}$). Весовое содержание плутония $0,6$, урана – $0,4$.

Решение

Дано: $E_{\text{Pu}} = 5,15 \text{ МэВ}$ $E_{\text{U}} = 4,18 \text{ МэВ}$ $b_{\text{Pu}} = 0,6$ $b_{\text{U}} = 0,4$ $R - ?$	Массовый пробег от многокомпонентных сред рассчитывается по формуле:
	$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^m \left(\frac{b_i}{R_{\alpha i}} \right),$
	$\frac{1}{R} = \frac{b_{\text{Pu}}}{R_{\alpha \text{Pu}}} + \frac{b_{\text{U}}}{R_{\alpha \text{U}}}.$

Пробег α -частиц в воздухе определяют по формуле:

$$R_{\alpha} = 0,318 \cdot E_{\alpha}^{3/2}.$$

Тогда:

$$\begin{aligned} \frac{1}{R} &= \frac{b_{Pu}}{0,318 \cdot E_{\alpha Pu}^{3/2}} + \frac{b_U}{0,318 \cdot E_{\alpha U}^{3/2}}, \\ \frac{1}{R} &= \frac{0,6}{0,318 \cdot 5,15^{3/2}} + \frac{0,4}{0,318 \cdot 4,18^{3/2}} = 0,3086, \\ R &= \frac{1}{0,3086} = 3,086 \text{ см.} \end{aligned}$$

Ответ: $R = 3,086$ см.

Пример 6.4. Альфа-частицы, возникающие при распаде ^{238}U , имеют пробег в железе $1,1 \cdot 10^{-3}$ см, плотность железа $7,9 \text{ г/см}^3$, $A = 56$. Чему равна кинетическая энергия частиц?

Решение

Дано:

$$A = 56$$

$$\rho = 7,9 \text{ г/см}^3$$

$$R = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ см}$$

$$E_{\alpha} - ?$$

Выражают энергию из формулы для расчета пробега:

$$R_{\alpha} = \frac{10^{-4} \sqrt{A \cdot E_{\alpha}^3}}{\rho},$$

$$R_{\alpha}^2 = \frac{10^{-8} A \cdot E_{\alpha}^3}{\rho^2},$$

$$E_{\alpha}^3 = \frac{R^2 \rho^2}{10^{-8} A},$$

$$E_{\alpha} = \sqrt[3]{\frac{R^2 \rho^2}{10^{-8} A}},$$

$$E_{\alpha} = \sqrt[3]{\frac{(1,1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 7,9^2}{10^{-8} \cdot 56}} = 5,13 \text{ МэВ.}$$

Ответ: $E_{\alpha} = 5,13$ МэВ.

Пример 6.5. Рассчитать длину пробега α -частиц ($E = 7$ МэВ), испускаемых большей частью ядер ^{243}Am в бронзе ($\rho = 8,5 \text{ г/см}^3$, 90 % Cu, 10% Sn).

Решение

Дано:

$$E = 7 \text{ МэВ}$$

$$90 \% \text{ Cu}, 10 \% \text{ Sn}$$

1. Рассчитывают атомную массу бронзы:

$$A = 0,9A_{\text{Cu}} + 0,1A_{\text{Sn}},$$

$\rho = 8,5 \text{ г/см}^3$ $R_\alpha - ?$	$A = 0,9 \cdot 64 + 0,1 \cdot 119 = 69,5.$
---	--

2. Рассчитывают длину пробега α -частиц:

$$R_\alpha = \frac{10^{-4} \sqrt{A \cdot E_\alpha^3}}{\rho},$$

$$R_\alpha = \frac{10^{-4} \sqrt{69,5 \cdot 7^3}}{8,5} = 1,82 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

Ответ: $R_\alpha = 1,82 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$

Пример 6.6. Во сколько раз пробег α -частиц в воздухе, испускаемых ^{239}Pu ($E = 5,15 \text{ МэВ}$) больше пробега α -частиц ^{238}U ($E = 4,18 \text{ МэВ}$)?

Решение

Дано: $E_{\text{Pu}} = 5,15 \text{ МэВ}$ $E_{\text{U}} = 4,18 \text{ МэВ}$	Пробег α -частиц в воздухе: $R_\alpha = 0,318 \cdot E_\alpha^{3/2}.$
--	--

$\frac{R_1}{R_2} - ?$	Тогда: $\frac{R_1}{R_2} = \frac{0,318 \cdot E_{\alpha 1}^{3/2}}{0,318 \cdot E_{\alpha 2}^{3/2}} = \left(\frac{E_{\alpha 1}}{E_{\alpha 2}} \right)^{3/2},$ $\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{5,15}{4,18} \right)^{3/2} = 1,37.$
-----------------------	--

Ответ: $\frac{R_1}{R_2} = 1,37.$

Контрольное задание

1. Используя справочные данные по массам атомов, определить полную энергию альфа-распада ^{218}Po .
2. Используя справочные данные по массам атомов, определить энергию α -частиц, возникающих при распаде ^{239}Pu .
3. Используя справочные данные по массам атомов, определить энергию ядра отдачи при α -распаде ^{226}Ra .
4. Определить энергию ядра отдачи при α -распаде ^{235}U , если энергия α -частиц составляет $4,4 \text{ МэВ}$.
5. Какую часть от кинетической энергии α -частиц составляет энергия дочерних ядер отдачи, возникающих при распаде ядер ^{238}U ?

6. Рассчитать длину пробега альфа-частиц ($E = 6 \text{ МэВ}$), испускаемых большей частью ядер америция в бронзе ($\rho = 8,5 \text{ г/см}^3$, 85 % Cu, 15 % Sn).

7. Рассчитать длину пробега альфа-частиц ($E = 4,7 \text{ МэВ}$), испускаемых большей частью ядер америция в бронзе ($\rho = 8,5 \text{ г/см}^3$, 95 % Cu, 5 % Sn).

8. Рассчитать среднюю длину пробега альфа-частиц ($E = 4,77 \text{ МэВ}$), испускаемых большей частью ядер ^{226}Ra в мягкой биологической ткани ($A = 5$, $\rho \approx 1 \text{ г/см}^3$).

9. Рассчитать пробег альфа-частиц ($E = 4,8 \text{ МэВ}$) в биологической ткани. Атомная масса биологической ткани 16, а плотность $1,1 \text{ г/см}^3$.

10. Рассчитать среднюю длину пробега альфа-частиц ($E = 5,8 \text{ МэВ}$), испускаемых большей частью ядер ^{239}Pu в стекле ($\rho = 2,8$, $A = 20$).

11. Определить пробег в воде α -частиц, возникающих при распаде ^{246}Cf ($E = 6,1 \text{ МэВ}$).

12. Чему равен пробег в воде α -частиц, возникающих при распаде ^{222}Rn ($E = 5,5 \text{ МэВ}$).

13. Определить пробег α -частиц в воздухе от многокомпонентного источника, состоящего из ^{239}Pu ($E = 7 \text{ МэВ}$) и ^{238}U ($E = 6 \text{ МэВ}$). Весовое содержание плутония 0,45, урана – 0,55.

14. Определить пробег α -частиц в воздухе от многокомпонентного источника, состоящего из ^{243}Am ($E = 4,75 \text{ МэВ}$) и ^{246}Cf ($E = 5,25 \text{ МэВ}$). Весовое содержание ^{243}Am – 0,5, ^{246}Cf – 0,5.

15. Определить пробег α -частиц в воздухе от многокомпонентного источника, состоящего из ^{243}Am ($E = 5,7 \text{ МэВ}$) и ^{246}Cf ($E = 4,8 \text{ МэВ}$). Весовое содержание ^{243}Am – 0,5, ^{246}Cf – 0,5.

16. Альфа-частицы имеют пробег в свинце $1 \cdot 10^{-3} \text{ см}$, плотность свинца $11,34 \text{ г/см}^3$, $A = 207$. Чему равна кинетическая энергия частиц?

17. Альфа-частицы имеют пробег в железе $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ см}$, плотность железа $7,9 \text{ г/см}^3$, $A = 56$. Чему равна кинетическая энергия частиц?

18. Альфа-частицы, возникающие при распаде ^{238}Pu имеют пробег в железе порядка 11 мкм. Чему равна кинетическая энергия этих частиц?

19. Во сколько раз пробег альфа-частиц ($E = 7 \text{ МэВ}$) в воздухе, испускаемых плутонием больше пробега альфа-частиц урана ($E = 5 \text{ МэВ}$)?

20. Во сколько раз пробег альфа-частиц ($E = 2,5 \text{ МэВ}$) в воздухе, испускаемых плутонием больше пробега альфа-частиц урана ($E = 4,7 \text{ МэВ}$)?

21. Подсчитать начальную скорость α -частицы с энергией 5 МэВ.

22. Подсчитать начальную скорость α -частицы с энергией 4,5 МэВ.

23. Подсчитать начальную скорость движения в воздухе ядер отдачи ^{214}Pb , возникающих при альфа-распаде ^{218}Po ($E_\alpha = 6 \text{ МэВ}$).

24. Какую энергию должна иметь α -частица, чтобы попасть внутрь ядра ^{235}U ?

25. Какую энергию должна иметь α -частица, чтобы попасть внутрь ядра ^{14}N ?

7 β -ИЗЛУЧЕНИЕ

7.1 β – превращение

Бета-превращение атомных ядер – это процесс самопроизвольного превращения нестабильных ядер в ядра-изобары с зарядовыми числами, отличными на $\Delta Z \pm 1$, в результате испускания электрона или позитрона или захвата электрона.

Ядра естественных радиоактивных изотопов, имеющие некоторый «избыток» нейтронов, так называемые **«нейтронно-избыточные» ядра** испускают отрицательные электроны (β^- , e^-), ядра же искусственных радиоактивных изотопов, имеющие некоторый «избыток» протонов, т.е. **«нейтронно-дефицитные»** испускают положительные электроны, т.е. позитроны (β^+ , e^+).

К β -превращению относится также и процесс ***K-захвата*** (его иногда называют ***Э-захват***) – «поглощение» атомными ядрами одного электрона с ближайшего к нему, первого K-уровня атома. Этот K-захват приводит к тому же ядерному превращению, что и позитронное β -излучение.

Энергию бета-превращения E_β можно вычислить по разности масс исходных атомов и продуктов превращения, пользуясь уравнением (1.13).

В случае **β^- -превращения** и ***K-захвата***:

$$E_\beta = (M_Z - M_{Z+1}) \cdot 931,5 \text{ МэВ}, \quad (7.1)$$

где M – массы нейтральных атомов, а.е.м.

Условие **β^- -превращения** и ***K-захвата***: $M_Z > M_{Z+1}$.

В случае **β^+ -превращения** нейтральный атом теряет один из электронов в своей оболочке, энергия бета-превращения равна:

$$E_\beta = (M_Z - M_{Z-1} - 2m_e) \cdot 931,5 \text{ МэВ}, \quad (7.2)$$

где m_e – масса электрона.

Условие **β^+ -превращения**: $M_Z > M_{Z-1} + 2m_e$.

7.2 Взаимодействия бета-излучения с веществом

Основной тип взаимодействия бета-излучения с веществом – электромагнитное взаимодействие с электронами и ядрами атомов:

– при взаимодействии с электронами происходит ионизация и возбуждение атомов (ионизационные потери энергии);

– при взаимодействии с ядрами возникает тормозное излучение, являющееся вторичным рентгеновским излучением (радиационные потери):

$$\Delta E_{\text{полн}} = \Delta E_{\text{ион}} + \Delta E_{\text{рад}}. \quad (7.3)$$

Соотношение ионизационных $\Delta E_{\text{ион}}$ и радиационных $\Delta E_{\text{рад}}$ потерь энергии определяется эмпирической формулой:

$$\frac{\Delta E_{\text{рад}}}{\Delta E_{\text{ион}}} = \frac{E_{\beta} \cdot Z}{800}. \quad (7.4)$$

Рассмотрение этой формулы показывает, что, для того чтобы уменьшить тормозное (вторичное рентгеновское) излучение, защиту от него следует выбирать с малым Z .

7.3 Пробег электронов в веществе

Путь электронов в веществе представляет собой ломаную линию (рис. 7.1). Общая длина этой линии превышает толщину слоя вещества, который полностью поглощает β -частицы. Поскольку β -излучение к тому же имеет непрерывный спектр, то говорить о пробеге β -частиц в том смысле, как это было для α -излучения, не представляется возможным.

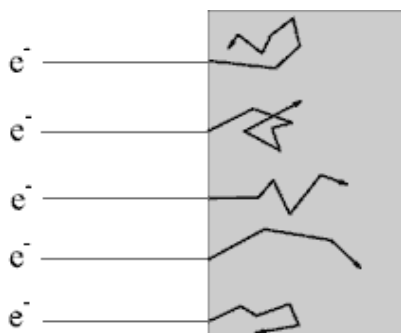


Рис. 7.1. Путь электронов в веществе

Поэтому говорят либо о максимальном пробеге β -частиц наибольшей для данного изотопа энергии, либо о практическом пробеге. При этом под **максимальным (истинным) пробегом** понимают всю длину пути электрона в веществе (длину выпрямленной траектории). Под **практическим пробегом** понимают толщину слоя вещества, полностью поглощающего β -частицы максимальной для данного изотопа энергии.

Толщина слоя поглощения r , выражаемая в см, различна для различных веществ. Поэтому вместо того, чтобы применять для оценки пробега β -частиц линейную толщину слоя в см, применяют **массовую толщину слоя** R в г/см² или мг/см²:

$$R = r \cdot \rho \text{ г/см}^2, \quad (7.5)$$

где r — толщина слоя поглощения, см.

На практике для расчета пробега β -частиц часто используют эмпирические зависимости, которые довольно точно дают значение пробега в алюминии для разных диапазонов энергии:

– для очень мягкого β -излучения ($0,03 < E_{\beta\max} < 0,15$ МэВ):

$$R_{Al} = 0,15 \cdot E_{\beta\max} - 0,0028 \text{ г/см}^2, \quad (7.6)$$

– для мягкого β -излучения ($0,15 < E_{\beta\max} < 0,8$ МэВ):

$$R_{Al} = 0,407 \cdot E_{\beta\max}^{1,38} \text{ г/см}^2, \quad (7.7)$$

– для жесткого β -излучения ($E_{\beta\max} > 0,8$ МэВ):

$$R_{Al} = 0,542 \cdot E_{\beta\max} - 0,133 \text{ г/см}^2. \quad (7.8)$$

Существует также формула Фламмерсфельда для $0 < E_{\beta\max} < 3$ МэВ:

$$R_{Al} = 0,11 \cdot \left(\sqrt{1 + 22,4 \cdot E_{\beta\max}^2} - 1 \right) \text{ г/см}^2. \quad (7.9)$$

И формула для $0,5 < E_{\beta\max} < 3$ МэВ:

$$R_{Al} = 0,52 \cdot E_{\beta\max} - 0,09 \text{ г/см}^2. \quad (7.10)$$

Обычно измерение практического пробега производят с целью определения энергии излучения и по ней идентификации изотопа. Поэтому существенным является решение приведенных уравнений относительно $E_{\beta\max}$:

$$E_{\beta\max} = 6,67 R_{Al} + 0,0186 \text{ МэВ для } 0,002 \text{ г/см}^2 < R < 0,02 \text{ г/см}^2, \quad (7.11)$$

$$E_{\beta\max} = 1,92 R_{Al}^{0,725} \text{ МэВ для } 0,02 \text{ г/см}^2 < R < 0,3 \text{ г/см}^2, \quad (7.12)$$

$$E_{\beta\max} = 1,85 R_{Al} + 0,245 \text{ МэВ для } R \geq 0,3 \text{ г/см}^2. \quad (7.13)$$

По пробегу β -частиц в алюминии R_{Al} , рассчитывают их пробег в любом веществе:

$$R_x = R_{Al} \cdot \frac{(Z/A)_{Al}}{(Z/A)_x} \text{ г/см}^2. \quad (7.14)$$

Грубая оценка максимальных пробегов β -частиц в алюминии и воздухе, может быть получена из соотношений

$$r_{Al} \approx 0,25 \cdot E_{\beta} \text{ см}, \quad (7.15)$$

$$r_{\text{возд}} \approx 400 \cdot E_{\beta} \text{ см}, \quad (7.16)$$

где E_{β} – энергия бета-излучения, МэВ.

Пробег β -частиц в любой среде приблизительно во столько раз меньше или больше их пробега в воздухе, во сколько раз плотность данной среды больше или меньше плотности воздуха:

$$\frac{r_{\text{среды}}}{r_{\text{возд}}} = \frac{R_{\text{среды}}}{R_{\text{возд}}} = \frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho_{\text{среды}}}. \quad (7.17)$$

7.4 Поглощение β -частиц веществом

Итак, в результате взаимодействия β -частицы с веществом, она постепенно теряет свою энергию на ионизацию и возбуждение атомов, а также на тормозное излучение. Израсходовав всю энергию, электрон поглощается веществом.

Для β -частиц, испускаемых радиоактивными изотопами, **ослабление плотности потока β -частиц в поглотителе (интенсивность β -излучения)** убывает по экспоненциальному закону:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu_m R}, \quad (7.18)$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu_m R}, \quad (7.19)$$

где R – массовая толщина поглотителя, г/см²;

μ_m – массовый коэффициент поглощения электронов, см²/г.

Значения **массового коэффициента поглощения** μ_m могут быть определены приближенно из следующей зависимости от граничной энергии β -частиц E_β (МэВ):

$$\mu_m = 22 \cdot E_\beta^{-1,33} \approx 15,5 \cdot E_\beta^{-1,41} \approx 17 \cdot E_\beta^{-1,43} \text{ см}^2/\text{г}. \quad (7.20)$$

Часто для практической оценки степени поглощения β -частиц тем или иным веществом пользуются величиной так называемого **слоя половинного ослабления** $\Delta_{1/2}$, при котором интенсивность β -излучения уменьшается вдвое. Величину слоя половинного поглощения можно определить из закона ослабления, положив:

$$\varphi_{0,5} = \frac{\varphi_0}{2} = \varphi_0 \cdot e^{-\mu_m \Delta_{1/2}}, \quad (7.21)$$

тогда массовый слой половинного ослабления β -частиц:

$$\Delta_{1/2} = 0,693 \cdot \mu_m^{-1} = 0,032 \cdot E_\beta^{1,33} \text{ г/см}^2. \quad (7.22)$$

Связь между массовой толщиной защиты и слоем половинного ослабления:

$$R = \Delta_{1/2} \cdot n, \quad (7.23)$$

где n – количество слоев половинного ослабления.

Кратность ослабления (поглощения) β -излучения определяют по формулам:

$$k = \frac{\varphi_0}{\varphi} = e^{\mu_m R}, \quad (7.24)$$

$$k = 2^n. \quad (7.25)$$

Весьма удобно пользоваться на практике и готовыми графиками (рис. 7.2):

$$R_{\beta\max} = f(E_{\beta\max}), \quad (7.26)$$

$$\Delta_{1/2} = f(E_{\beta\max}). \quad (7.27)$$

К этому методу обычно прибегают для проверки расчетных данных. Кроме того, он незаменим для мягкого β -излучения, когда формула для μ не годится.

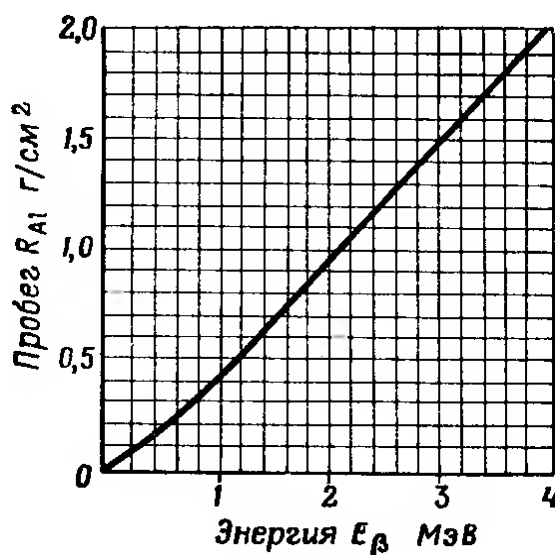


Рис. 7.2. Зависимость $R_{Al} = f(E_\beta)$

Примеры решения задач

Пример 7.1. Определить толщину стенки пенала из алюминия, в котором хранится β -излучатель ^{32}P , если максимальная энергия β -частиц 1,708 МэВ.

Решение

Дано: $E_\beta = 1,708 \text{ МэВ}$ $d - ?$	Толщина стенки пенала для защиты от β-излучения должна быть равна или больше максимального пробега β-частиц в среде, из которой изготовлена защита, т.е.:
--	--

$$d \geq r_{Al} = 0,25 \cdot E_\beta,$$

$$d \geq r_{Al} = 0,25 \cdot 1,708 = 0,427 \text{ см.}$$

Ответ: $d \geq 0,427$ см.

Пример 7.2. Оценить пробег β -частиц (см), испускаемых ^{90}Y ($E_\beta = 2,18$ МэВ) в воздухе ($\rho = 0,00129$ г/см³) и биологической ткани ($\rho = 1$ г/см³).

Решение

Дано:

$$E_\beta = 2,18 \text{ МэВ}$$

$$\rho_{\text{возд}} = 0,00129 \text{ г/см}^3$$

$$\rho_{\text{б.т.}} = 1 \text{ г/см}^3$$

$$r_{\text{возд}} - ?$$

$$r_{\text{б.т.}} - ?$$

1. Определяют пробег β -частиц в воздухе:

$$r_{\text{возд}} = 400 \cdot E_\beta,$$

$$r_{\text{возд}} = 400 \cdot 2,18 = 872 \text{ см} = 8,72 \text{ м.}$$

2. Определяют пробег β -частиц в биологической ткани:

$$\frac{r_{\text{б.т.}}}{r_{\text{возд}}} = \frac{\rho_{\text{возд}}}{\rho_{\text{б.т.}}},$$

$$r_{\text{б.т.}} = \frac{\rho_{\text{возд}} \cdot r_{\text{возд}}}{\rho_{\text{б.т.}}},$$

$$r_{\text{б.т.}} = \frac{0,00129 \cdot 872}{1} = 1,125 \text{ см.}$$

Ответ: $r_{\text{возд}} = 8,72$ м; $r_{\text{б.т.}} = 1,125$ см.

Пример 7.3. Определить массовый пробег (г/см²) β -частиц в кадмии ($A = 112$, $Z = 48$) с энергией $E_\beta = 2$ МэВ.

Решение

Дано:

$$A = 112$$

$$Z = 48$$

$$E_\beta = 2 \text{ МэВ}$$

$$R_{\text{Cd}} - ?$$

1. Определяют массовый пробег в алюминии:

$$R_{\text{Al}} = 0,542 \cdot E_{\beta\text{max}} - 0,133,$$

$$R_{\text{Al}} = 0,542 \cdot 2 - 0,133 = 0,951 \text{ г/см}^2.$$

2. Определяют пробег β -частиц в кадмии:

$$R_{\text{Cd}} = R_{\text{Al}} \cdot \frac{(Z/A)_{\text{Al}}}{(Z/A)_{\text{Cd}}},$$

$$R_{\text{Cd}} = 0,951 \cdot \frac{(13/27)}{(48/112)} = 1,068 \text{ г/см}^2.$$

Ответ: $R_{\text{Cd}} = 1,068$ г/см².

Пример 7.4. Определить толщину защиты (см) и плотность потока β -частиц ($E_\beta = 3$ МэВ) после ослабления защитой, если плотность потока до

ослабления составляет 10^{44} част/(м²·с). Защитный материал – железо ($\rho = 7,9$ г/см³), количество слоев половинного ослабления 100.

Решение

Дано:
 $E_\beta = 3$ МэВ
 $\varphi_0 = 10^{44}$ част/(м²·с)
 $\rho = 7,9$ г/см³
 $n = 100$

 $r = ?$
 $\varphi = ?$

1. Определяют величину слоя половинного ослабления:

$$\Delta_{1/2} = 0,032 \cdot E_\beta^{1,33},$$

$$\Delta_{1/2} = 0,032 \cdot 3^{1,33} = 0,138 \text{ г/см}^2.$$

2. Определяют массовую толщину защиты:

$$R = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$R = 0,138 \cdot 100 = 13,8 \text{ г/см}^2.$$

3. Определяют линейную толщину защиты:

$$r = \frac{R}{\rho},$$

$$r = \frac{13,8}{7,9} = 1,75 \text{ см.}$$

4. Определяют массовый коэффициент поглощения:

$$\mu_m = 22 \cdot E_\beta^{-1,33},$$

$$\mu_m = 22 \cdot 3^{-1,33} = 5,103 \text{ см}^2/\text{г.}$$

5. Определяют плотность потока β -частиц после ослабления защитой:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu_m R},$$

$$\varphi = 10^{44} \cdot e^{-5,103 \cdot 13,8} = 2,6 \cdot 10^{13} \text{ част/(м}^2 \cdot \text{с).}$$

Ответ: $r = 1,75$ см, $\varphi = 2,6 \cdot 10^{13}$ част/(м²·с).

Пример 7.5. Слой алюминия 0,05 см уменьшил скорость счета от источников β -излучения в 3 раза ($\rho = 2,7$ г/см³). Какова энергия β -частиц?

Решение

Дано:
 $r = 0,05$ см
 $k = 3$
 $\rho = 2,7$ г/см³

 $E_\beta = ?$

1. Определяют массовую толщину защиты от β -излучения:

$$R = r \cdot \rho,$$

$$R = 0,05 \cdot 2,7 = 0,135 \text{ г/см}^2.$$

2. Определяют количество слоев половинного ослабления:

$$k = 2^n,$$

$$n = \frac{\lg k}{\lg 2},$$

$$n = \frac{\lg 3}{\lg 2} = 1,58.$$

3. Определяют слой половинного ослабления:

$$R = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$\Delta_{1/2} = \frac{R}{n},$$

$$\Delta_{1/2} = \frac{0,135}{1,58} = 0,085 \text{ г/см}^2.$$

4. Определяют энергию β -излучения из формулы для расчета слоя половинного ослабления:

$$\Delta_{1/2} = 0,032 \cdot E_{\beta}^{1,33},$$

$$E_{\beta} = {}^{1,33}\sqrt{\frac{\Delta_{1/2}}{0,032}},$$

$$E_{\beta} = {}^{1,33}\sqrt{\frac{0,085}{0,032}} = 2,085 \text{ МэВ},$$

Ответ: $E_{\beta} = 2,085 \text{ МэВ}$.

Пример 7.6. Определить толщину защиты (см) и плотность потока β -частиц ($E_{\beta} = 5 \text{ МэВ}$) до ослабления защиты, если после ослабления она составляет $10^{15} \text{ част}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Защитный материал – свинец ($\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$), кратность ослабления 10000.

Решение

Дано:

$$E_{\beta} = 5 \text{ МэВ}$$

$$\varphi = 10^{15} \text{ част}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$$

$$\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$$

$$k = 10000$$

$$r - ?$$

$$\varphi_0 - ?$$

1. Определяют величину слоя половинного ослабления:

$$\Delta_{1/2} = 0,032 \cdot E_{\beta}^{1,33},$$

$$\Delta_{1/2} = 0,032 \cdot 5^{1,33} = 0,272 \text{ г/см}^2.$$

2. Определяют количество слоев половинного ослабления:

$$k = 2^n,$$

$$n = \frac{\lg k}{\lg 2},$$

$$n = \frac{\lg 10000}{\lg 2} = 13,29.$$

3. Определяют массовую толщину защиты:

$$R = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$R = 0,272 \cdot 13,29 = 3,615 \text{ г/см}^2.$$

4. Определяют линейную толщину защиты:

$$r = \frac{R}{\rho},$$

$$r = \frac{3,615}{11,34} = 0,32 \text{ см.}$$

5. Определяют плотность потока β -частиц до ослабления:

$$k = \frac{\varphi_0}{\varphi},$$

$$\varphi_0 = k \cdot \varphi,$$

$$\varphi_0 = 10000 \cdot 10^{15} = 10^{19} \text{ част/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Ответ: $r = 0,32 \text{ см}$, $\varphi_0 = 10^{19} \text{ част/(м}^2 \cdot \text{с)}.$

Пример 7.7. Образец резины химкомплекта $10 \times 10 \text{ см}$ весит 7 г . Определить кратность ослабления β -излучения с энергией $2,5 \text{ МэВ}$.

Решение

Дано:
$S = 10 \times 10 \text{ см}$
$m = 7 \text{ г}$
$E_\beta = 2,5 \text{ МэВ}$
$k - ?$

1. Определяют массовую толщину защиты:

$$R = r \cdot \rho,$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{S \cdot r},$$

$$R = r \cdot \frac{m}{S \cdot r} = \frac{m}{S},$$

$$R = \frac{7}{10 \cdot 10} = 0,07 \text{ г/см}^2.$$

2. Определяют массовую толщину защиты:

$$\mu_m = 22 \cdot E_\beta^{-1,33},$$

$$\mu_m = 22 \cdot 2,5^{-1,33} = 6,5 \text{ см}^2/\text{г}.$$

3. Определяют кратность ослабления:

$$k = \frac{\varphi_0}{\varphi} = e^{\mu_m R},$$

$$k = e^{6,5 \cdot 0,07} = 1,58.$$

Ответ: $k = 1,58$.

Контрольное задание

1. Определить толщину защиты (см) и плотность потока бета-частиц ($E = 4$ МэВ) после ослабления защитой, если до ослабления она составляет $2 \cdot 10^{50}$ част/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Защитный материал – железо, плотность $7,9 \text{ г/см}^3$, количество слоев половинного ослабления 200.

2. Определить толщину защиты (см) и плотность потока бета-частиц ($E = 3,8$ МэВ) после ослабления защитой, если до ослабления она составляет 10^{55} част/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Защитный материал – железо, плотность $7,9 \text{ г/см}^3$, количество слоев половинного ослабления 250.

3. Определить толщину защиты (см) и плотность потока бета-частиц ($E = 4,4$ МэВ) после ослабления защитой, если до ослабления она составляет 10^{45} част/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Защитный материал – бронза, плотность $8,5 \text{ г/см}^3$, количество слоев половинного ослабления 150.

4. Определить толщину защиты (см) и плотность потока бета-частиц ($E = 3,5$ МэВ) после ослабления защитой, если до ослабления она составляет $9 \cdot 10^{47}$ част/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Защитный материал – железо, плотность $7,9 \text{ г/см}^3$, количество слоев половинного ослабления 120.

5. Определить толщину защиты (см) и плотность потока бета-частиц ($E = 3,5$ МэВ) до ослабления защитой, если после ослабления она составляет $4 \cdot 10^{14}$ част/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Защитный материал – свинец, плотность $11,34 \text{ г/см}^3$, кратность ослабления 1000000.

6. Определить толщину защиты (см) и плотность потока бета-частиц ($E = 4,6$ МэВ) до ослабления защитой, если после ослабления она составляет $1,5 \cdot 10^{15}$ част/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$). Защитный материал – железо, плотность $7,9 \text{ г/см}^3$, кратность ослабления 500000.

7. Определить толщину стенки пенала из алюминия, в котором хранится бета-излучатель, если максимальная энергия бета-частиц $2,5$ МэВ.

8. Определить толщину стенки пенала из алюминия, в котором хранится бета-излучатель, если максимальная энергия бета-частиц $3,3$ МэВ.

9. Определить массовый пробег (г/см^2) бета-частиц в кадмии ($A = 112$, $Z = 48$) с энергией 5 МэВ.

10. Определить массовый пробег (г/см^2) бета-частиц в свинце ($A = 207$, $Z = 82$) с энергией 3,5 МэВ.

11. Оценить пробег (см) бета-частиц ($E = 4$ МэВ), испускаемых в воздухе ($\rho = 0,00129 \text{ г/см}^3$) и биологической ткани ($\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$).

12. Оценить пробег (см) бета-частиц ($E = 6,1$ МэВ), испускаемых в воздухе ($\rho = 0,00129 \text{ г/см}^3$) и биологической ткани ($\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$).

13. Слой алюминия 0,06 см уменьшил скорость счета от источника бета излучения в 4 раза. Какова энергия бета-частиц?

14. Слой алюминия 0,1 см уменьшил скорость счета от источника бета излучения в 7 раз. Какова энергия бета-частиц?

15. Образец резины химкомплекта 12×12 см весит 9 г. Определить кратность ослабления бета-излучения энергией 3,7 МэВ.

16. Образец резины химкомплекта 15×10 см весит 10 г. Определить кратность ослабления бета-излучения энергией 4,5 МэВ.

17. Во сколько раз ослабит бета-излучение ($E = 3,5$ МэВ) козырек из железа толщиной 0,5 мм? Плотность железа $7,9 \text{ г/см}^3$.

18. Во сколько раз ослабит бета-излучение ($E = 2,9$ МэВ) козырек из оргстекла толщиной 1 мм? Плотность оргстекла $1,1 \text{ г/см}^3$.

19. При какой энергии бета-излучения становятся одинаковыми радиационные и ионизационные потери в свинце?

20. При какой энергии сравниваются радиационные и ионизационные потери бета-частиц в вольфраме?

21. Как соотносятся потери на тормозное излучение бета-частицами одинаковой энергии в висмуте и в железе?

22. Как соотносятся потери на тормозное излучение бета-частицами одинаковой энергии в свинце и в вольфраме?

23. Анод рентгеновской трубки выполнен из вольфрама, напряжение 144 кВ. Каково соотношение энергии электронов, переходящей в рентгеновское излучение и энергии, пошедшей на ионизацию?

24. Анод рентгеновской трубки выполнен из вольфрама, напряжение 120 кВ. Каково соотношение энергии электронов, переходящей в рентгеновское излучение и энергии, пошедшей на ионизацию?

8 γ -ИЗЛУЧЕНИЕ

8.1 Общие свойства γ -излучения

Гамма-излучение – фотонное излучение с дискретным спектром, возникающее при изменении энергетического состояния атомного ядра.

γ -излучение представляет собой коротковолновое электромагнитное излучение: $\lambda = 10^{-13} \div 10^{-10}$ м ($10^{-3} \div 1$ Å); $\nu = 10^{18} \div 10^{21}$ Гц; $E_\gamma = 10$ кэВ $\div$ 20 МэВ.

При длинах волн $\lambda_\gamma = 10^{-3} \div 1$ Å волновые свойства у гамма-квантов выражены уже довольно слабо. Корпускулярные же свойства, наоборот проявляются очень четко и конкретно. Поэтому современная теория рассматривает γ -излучение не как электромагнитные волны (лучи), а как поток частиц (γ -квантов). Наиболее отчетливо корпускулярные свойства γ -квантов проявляются при взаимодействии γ -излучения с веществом (фотоэффект, Комптон-эффект и т.п.).

Количественно γ -излучение, как и любое другое излучение, характеризуется плотностью потока фотонов φ_γ и плотностью потока энергии φ (интенсивностью I) излучения.

Плотность потока частиц φ_N можно определить, как число частиц, проходящих через единицу площади S за единицу времени t (индекс φ_N означает вид частиц – φ_α , φ_β , φ_γ и т.д.):

$$\varphi_N = \frac{dN_N}{dS \cdot dt}, \quad (8.1)$$

при неизменном по времени и объему поле:

$$\varphi_N = \frac{N_N}{S \cdot t}. \quad (8.2)$$

Плотность потока энергии (интенсивность) определяется как энергия излучения, проходящего через единицу площади за единицу времени:

$$\varphi = \frac{dE}{dS \cdot dt}, \quad (8.3)$$

$$\varphi = \frac{E}{S \cdot t}. \quad (8.4)$$

Если излучение моноэнергично, то связь между этими величинами:

$$\varphi = \varphi_N \cdot E_N. \quad (8.5)$$

где E_N – энергия частицы.

8.2 Закон ослабления γ -излучения

Пучок γ -квантов, проходя через слой вещества ослабляется в результате трех процессов – фотоэлектрического поглощения (фотоэффекта), некогерентного рассеяния на свободных электронах (Комптон-эффекта) и образования электронно-позитронных пар (Пар-эффекта). В силу этого по мере прохождения излучения сквозь вещество, интенсивность пучка гамма-квантов непрерывно уменьшается с увеличением толщины поглощающего слоя. Схема прохождения через поглощающее тело узкого параллельного монохроматического пучка γ -квантов показана на рис. 8.1.

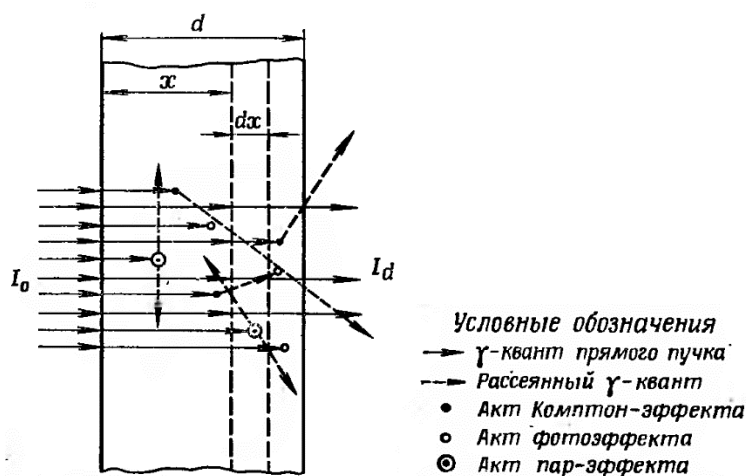


Рис. 8.1. Схема прохождения через поглощающее тело узкого параллельного монохроматического пучка γ -квантов

Опытным путем и теорией установлено, что **ослабление узкого монохроматического пучка γ -квантов** подчиняется экспоненциальному закону:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu d}, \quad (8.6)$$

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu d}, \quad (8.7)$$

где d – толщина слоя ослабления, см;

I_0 и I – интенсивность пучка до и после прохождения слоя ослабления;
 φ_0 и φ – плотность потока γ -квантов до и после прохождения слоя ослабления;

μ – линейный коэффициент ослабления излучения – доля гамма-квантов, взаимодействовавших на единице длины пути, см^{-1} .

При этом, поскольку длина пути может быть выражена не только в линейных единицах, но и в массовых, то кроме линейного коэффициента ослабления иногда применяют массовый μ_m :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \text{ см}^2/\text{г}, \quad (8.8)$$

где ρ – плотность вещества, см³/г.

Величина μ зависит от энергии излучения, от атомного номера вещества, причем довольно сложным образом. Поэтому для нахождения μ как правило пользуются таблицами, в которых для каждого вещества (наиболее употребительных в технике защиты) дается значение μ для различных энергий излучения (Приложение Б).

Ослабление широкого пучка гамма-квантов подчиняется сложному закону. В случае широкого пучка в интенсивность излучения после защиты существенный вклад дают рассеянные γ -кванты, которые в случае узкого пучка считались выбывшими из пучка и не учитывались. Поэтому для расчета *интенсивности (плотности потока) широкого пучка* за защитой, приходится вводить *коэффициент накопления B* и закон ослабления выглядит как:

$$I = I_0 \cdot B \cdot e^{-\mu \cdot d}, \quad (8.9)$$

$$\varphi = \varphi_0 \cdot B \cdot e^{-\mu \cdot d}. \quad (8.10)$$

Поскольку в технике защиты чаще всего приходится иметь дело с широкими пучками, то приходится использовать эту формулу. При этом B сложным образом зависит от энергии излучения и толщины защиты, поэтому его как правило берут из таблиц. B всегда больше единицы.

Кроме коэффициента ослабления излучения μ ослабляющую способность вещества также характеризует *слой половинного ослабления $\Delta_{1/2}$* (см). Толщина защиты в этом случае будет:

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n \text{ см}, \quad (8.11)$$

где n – число слоев половинного ослабления.

Кратность ослабления γ -излучения определяют по формулам:

$$k = \frac{\varphi_0}{\varphi} = e^{\mu \cdot d}, \quad (8.12)$$

$$k = 2^n. \quad (8.13)$$

Тогда

$$\Delta_{1/2} = \frac{\lg 2}{\mu} = \frac{0,693}{\mu} \text{ см}. \quad (8.14)$$

Длина релаксации – толщина слоя среды, уменьшающая плотность потока γ -квантов в e раз:

$$L = \frac{1}{\mu} \text{ см}. \quad (8.15)$$

Длину релаксации еще иногда называют средним пробегом γ -квантов в среде.

Примеры решения задач

Пример 8.1. Во сколько раз ослабляет гамма-излучения слой воды толщиной 0,5 м, если слой половинного ослабления составляет 10 см?

Решение

Дано:	1. Определяют число слоев половинного ослабления:
$d = 0,5 \text{ м} = 50 \text{ см}$	
$\Delta_{1/2} = 10 \text{ см}$	
$k - ?$	

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$n = \frac{d}{\Delta_{1/2}},$$

$$n = \frac{50}{10} = 5.$$

2. Определяют кратность ослабления γ -излучения:

$$k = 2^n,$$

$$k = 2^5 = 32.$$

Ответ: $k = 32$.

Пример 8.2. Какую энергию имеет гамма-излучения, если слой железа толщиной 2 см ослабляет его в 3 раза?

Решение

Дано:	1. Определяют линейный коэффициент ослабления излучения:
$d = 2 \text{ см}$	
$k = 3$	
$E - ?$	

$$k = e^{\mu \cdot d},$$

$$\ln k = \mu \cdot d,$$

$$\mu = \frac{\ln k}{d},$$

$$\mu = \frac{\ln 3}{2} = 0,549 \text{ см}^{-1}$$

2. Из приложения Б для железа выбирают значение энергии излучения, соответствующее $\mu = 0,549 \text{ см}^{-1}$:

$$E \approx 0,8 \text{ МэВ}.$$

Ответ $E \approx 0,8 \text{ МэВ}$.

Пример 8.3. Поток однородного гамма-излучения обеспечивает на пересчетной установке $6,602 \cdot 10^3$ имп/мин. Стальной фильтр толщиной 33,2 мм снижает скорость счета импульсов до 658 имп/мин. Какую толщину фильтра следует взять, чтобы интенсивность потока уменьшилась в 2 раза?

Решение

Дано:

$$\varphi_0 = 6,602 \cdot 10^3 \text{ имп/мин}$$

$$\varphi = 658 \text{ имп/мин}$$

$$d_1 = 33,2 \text{ мм} = 3,32 \text{ см}$$

$$k_2 = 2$$

$$d_2 = ?$$

1. Определяют кратность ослабления для первого случая:

$$k = \frac{\varphi_0}{\varphi},$$

$$k_1 = \frac{6,602 \cdot 10^3}{658} = 10,03.$$

2. Определяют число слоев половинного ослабления для первого случая:

$$k = 2^n,$$

$$n = \frac{\lg k}{\lg 2},$$

$$n_1 = \frac{\lg 10,03}{\lg 2} = 3,32.$$

3. Определяют слой половинного ослабления:

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$\Delta_{1/2} = \frac{d_1}{n_1},$$

$$\Delta_{1/2} = \frac{3,32}{3,32} = 1 \text{ см.}$$

4. Определяют число слоев половинного ослабления для второго случая:

$$k = 2^n,$$

$$n = \frac{\lg k}{\lg 2},$$

$$n_2 = \frac{\lg 2}{\lg 2} = 1.$$

5. Определяют толщину защиты для второго случая:

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$d_2 = 1 \cdot 1 = 1 \text{ см.}$$

Ответ $d_2 = 1 \text{ см.}$

Пример 8.4. Определить толщину защиты и плотность потока γ -квантов ($E = 3 \text{ МэВ}$) после ослабления защитой, если плотность потока до ослабления составляет 10^7 имп/мин . Защитный материал – железо ($\rho = 7,9 \text{ г/см}^3$), количество слоев половинного ослабления 10.

Решение

Дано:
 $E = 3 \text{ МэВ}$
 $\varphi_0 = 10^7 \text{ имп/мин}$
 $\rho = 7,9 \text{ г/см}^3$
 $n = 10$

$d - ?$
 $\varphi - ?$

1. Выбирают из приложения Б линейный коэффициент ослабления гамма-излучения с $E = 3 \text{ МэВ}$ для железа:

$$\mu = 0,284 \text{ см}^{-1}.$$

2. Определяют величину слоя половинного ослабления:

$$\Delta_{1/2} = \frac{0,693}{\mu},$$

$$\Delta_{1/2} = \frac{0,693}{0,284} = 2,44 \text{ см.}$$

3. Определяют толщину защиты:

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$d = 2,44 \cdot 10 = 24,4 \text{ см.}$$

5. Определяют плотность потока γ -квантов после ослабления защитой:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot e^{-\mu \cdot d},$$

$$\varphi = 10^7 \cdot e^{-0,284 \cdot 24,4} = 9,78 \cdot 10^3 \text{ имп/мин.}$$

Ответ: $d = 24,4 \text{ см}$, $\varphi = 9,78 \cdot 10^3 \text{ имп/мин.}$

Пример 8.5. Определить толщину защиты и плотность потока γ -квантов ($E = 5 \text{ МэВ}$) до ослабления защиты, если после ослабления она составляет 10^3 имп/мин . Защитный материал – свинец ($\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$), кратность ослабления 1000.

Решение

Дано:
 $E_\beta = 5 \text{ МэВ}$
 $\varphi = 10^3 \text{ имп/мин}$

1. Выбирают из приложения Б линейный коэффициент ослабления гамма-излучения с $E = 5 \text{ МэВ}$ для свинца:

$\rho = 11,34 \text{ г/см}^3$	
$k = 1000$	
$d - ?$	
$\varphi_0 - ?$	

$$\mu = 0,481 \text{ см}^{-1}.$$

2. Определяют величину слоя половинного ослабления:

$$\Delta_{1/2} = \frac{0,693}{\mu},$$

$$\Delta_{1/2} = \frac{0,693}{0,481} = 1,44 \text{ см},$$

3. Определяют количество слоев половинного ослабления:

$$k = 2^n,$$

$$n = \frac{\lg k}{\lg 2},$$

$$n = \frac{\lg 1000}{\lg 2} = 9,97.$$

4. Определяют толщину защиты:

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$d = 1,44 \cdot 9,97 = 14,36 \text{ см}.$$

5. Определяют плотность потока γ -квантов до ослабления:

$$k = \frac{\varphi_0}{\varphi},$$

$$\varphi_0 = k \cdot \varphi,$$

$$\varphi_0 = 1000 \cdot 10^3 = 10^6 \text{ имп/мин}.$$

Ответ: $d = 14,36 \text{ см}$, $\varphi_0 = 10^6 \text{ имп/мин}$.

Контрольное задание

1. Определить толщину защиты и плотность потока γ -квантов ($E = 4 \text{ МэВ}$) после ослабления защитой, если до ослабления она составляет $2 \cdot 10^6 \text{ имп/мин}$. Защитный материал – железо, плотность $7,9 \text{ г/см}^3$, количество слоев половинного ослабления 20.

2. Определить толщину защиты и плотность потока γ -квантов ($E = 3,8 \text{ МэВ}$) после ослабления защитой, если до ослабления она составляет 10^7 имп/мин . Защитный материал – железо, плотность $7,9 \text{ г/см}^3$, количество слоев половинного ослабления 25.

3. Определить толщину защиты и плотность потока γ -квантов ($E = 4,4$ МэВ) после ослабления защитой, если до ослабления она составляет 10^5 имп/мин. Защитный материал – бронза, плотность $8,5$ г/см³, количество слоев половинного ослабления 15.

4. Определить толщину защиты и плотность потока γ -квантов ($E = 3,5$ МэВ) до ослабления защитой, если после ослабления она составляет 900 имп/мин. Защитный материал – железо, плотность $7,9$ г/см³, кратность ослабления 2000.

5. Определить толщину защиты и плотность потока γ -квантов ($E = 3,5$ МэВ) до ослабления защитой, если после ослабления она составляет 400 имп/мин. Защитный материал – свинец, плотность $11,34$ г/см³, кратность ослабления 10000.

6. Определить толщину защиты и плотность потока γ -квантов ($E = 4,6$ МэВ) до ослабления защитой, если после ослабления она составляет 150 имп/мин. Защитный материал – железо, плотность $7,9$ г/см³, кратность ослабления 5000.

7. Во сколько раз ослабляет гамма-излучения стена толщиной $0,5$ м, если слой половинного ослабления составляет 4 см?

8. Во сколько раз ослабляет гамма-излучения слой воды толщиной $0,25$ м, если слой половинного ослабления составляет 1 см?

9. Во сколько раз ослабляет гамма-излучения стена толщиной 60 см, если слой половинного ослабления составляет $4,5$ см?

10. Во сколько раз ослабляет гамма-излучения слой грунта, толщиной 80 см, если слой половинного ослабления составляет $3,5$ см?

11. Во сколько раз ослабляет гамма-излучение энергией 1 МэВ химкомплект из резины. Если 100 см² его весят 70 г ($\rho = 1,2$ г/см³, значение μ брать как для углерода).

12. Во сколько раз ослабляет гамма-излучение энергией 2 МэВ химкомплект из резины. Если 150 см² его весят 100 г ($\rho = 1,2$ г/см³, значение μ брать как для углерода).

13. Рассчитать толщину защиты из меди, которая ослабляла бы узкий поток гамма-излучения ($E = 1$ МэВ) от источника ^{60}Co в 100 раз.

14. Рассчитать толщину защиты из олова, которая ослабляла бы узкий поток гамма-излучения ($E = 2$ МэВ) от источника ^{137}Cs в 20 раз

15. Рассчитать толщину защиты из железа, которая ослабляла бы узкий поток гамма-излучения ($E = 3$ МэВ) от источника ^{137}Cs в 15 раз.

16. Рассчитать толщину защиты из железа, которая ослабляла бы узкий поток гамма-излучения ($E = 2$ МэВ) от источника ^{60}Co в 100 раз.

17. Какую энергию имеет гамма-излучения, если слой свинца толщиной 2 см ослабляет его в 5 раз?

18. Какую энергию имеет гамма-излучения, если слой железа толщиной 4 см ослабляет его в 4 раз?

19. Для экранизации однородного гамма-излучения используется слой металла толщиной 44,4 мм с массовым коэффициентом для данного опыта $0,0438 \text{ см}^2/\text{г}$, снижающий интенсивность потока излучения в 9 раз. Определить энергию гамма-квантов и характер экранирующего материала.

20. Для экранизации однородного гамма-излучения используется слой металла толщиной 33,3 мм с массовым коэффициентом для данного опыта $0,0328 \text{ см}^2/\text{г}$, снижающий интенсивность потока излучения в 10 раз. Определить энергию гамма-квантов и характер экранирующего материала.

21. Алюминиевый фильтр толщиной 142 мм снижает интенсивность потока гамма-квантов в 10 раз. Рассчитать толщину свинцового фильтра, снижающего интенсивность потока в 12 раз.

22. Однородный поток, включающий в соотношение 1:1 компоненты с энергией квантов 500 кэВ и 1 МэВ, нормально падает и проходит сквозь свинцовый фильтр толщиной 10 мм. Вычислить соотношение этих компонентов на выходе из фильтра, объяснить полученный результат.

23. Поток однородного гамма-излучения вызывает в ионизационной камере ток силой $1,56 \cdot 10^{-4} \text{ мА}$. Медный фильтр толщиной 250 мм снижает ток до $3,9 \cdot 10^{-5} \text{ мА}$. Подчитать толщину фильтра, снижающего интенсивность излучения точно в 2 раза.

24. Поток однородного гамма-излучения обеспечивает на пересчетной установке $5,5 \cdot 10^5 \text{ имп/мин}$. Стальной фильтр толщиной 50 мм снижает скорость счета импульсов до 550 имп/мин. Какую толщину фильтра следует взять, чтобы интенсивность потока уменьшилась в 2 раза?

9 ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ. НЕЙТРОНЫ

9.1 Ядерные реакции. Энергетический порог реакции

Ядерные реакции записывают в виде:

$$A(a, bcd) B,$$

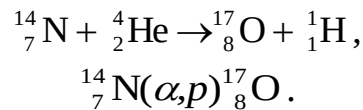
где A – ядро мишени;

a – бомбардирующая частица;

b, c, d – испускаемые частицы;

B – остаточное ядро.

В скобках записываются более лёгкие продукты реакции, вне – наиболее тяжёлые. Например:



Существует энергетический порог реакции $E_{\text{пор}}$ – минимальная кинетическая энергия частицы, обладая которой, она может вызвать реакцию.

В соответствии с **законом сохранения импульса** эта энергия расходуется не только на компенсацию отрицательного энергетического эффекта, но и на сохранения суммарного импульса системы частица – ядро.

Заметим, что $E_{\text{пор}}$ несколько больше энергии $|E|$, взятой по модулю, которая выделяется или поглощается при ядерной реакции, т.к. согласно **закону сохранения количества движения** центр массы системы реагирующих частиц сохраняет за все время реакции импульс, равный импульсу бомбардирующей частицы, и тем самым вся система в целом имеет поступательное движение с энергией:

$$E_{\text{ц.масс}} = E_{\text{част}} \cdot \frac{m}{m + M}. \quad (9.1)$$

m – масса бомбардирующей частицы;

M – масса бомбардируемого ядра.

Эту энергию общего поступательного движения система сохраняет и после реакции.

Таким образом, реакция начинается при кинетической энергии бомбардирующей частицы:

$$E_{\text{част}} = E_{\text{ц.масс}} + |E|, \quad (9.2)$$

$$E_{\text{част}} = E_{\text{част}} \cdot \frac{m}{m + M} + |E|, \quad (9.3)$$

где $|E|$ – энергия, которая выделяется или поглощается при ядерной реакции.
И, следовательно,

$$E_{\text{пор}} = E_{\text{част}} = |E| \cdot \left(1 + \frac{m}{M}\right). \quad (9.4)$$

Ясно, что первое слагаемое в правой части равенства представляет собой энергию, расходуемую на осуществление самой реакции, а второе есть энергия, затрачиваемая на сообщение системе продуктов реакции общего поступательного движения, необходимого для выполнения закона сохранения количества движения.

9.2 Выход и эффективное сечение ядерной реакции

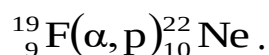
Для оценки возможностей протекания той или иной ядерной реакции необходимо знать вероятность протекания реакции в данных условиях, для ее оценки используется количественная характеристика ядерной реакции – **выход ядерной реакции** – доля бомбардирующих частиц $\Delta N/N_0$, вызывающих данную ядерную реакцию:

$$B = \frac{\Delta N}{N_0} = \frac{\Delta \Phi}{\Phi_0}, \quad (9.5)$$

где N_0 – число бомбардирующих частиц;
 Φ_0 – поток бомбардирующих частиц;
 $\Delta N, \Delta \Phi$ – число актов данной реакции.

Иначе можно сказать, что это есть вероятность для данной бомбардирующей частицы осуществить ядерную реакцию. Обычно выход ядерной реакции имеет очень небольшую величину, в пределах $10^{-3} - 10^{-8}$.

Так, например, при бомбардировке α -частицами с энергией 7,8 МэВ достаточно толстой мишени (толщина $\approx 0,5 - 1$ мм), состоящей из атомов ^{19}F на 5 млн. бомбардирующих частиц приходится одна реакция вида:



Следовательно, выход этой реакции в данном случае составит:

$$B = \frac{1}{5 \cdot 10^6} = 2 \cdot 10^{-7}.$$

Также для количественной характеристики ядерной реакции вводят другую величину, характеризующую вероятность протекания реакции и зависящую от характера ядерного превращения и энергии бомбардирующей частицы – **эффективное сечение ядерной реакции**.

Пусть, например, имеем тонкую мишень, толщиной h и площадью 1 см^2 . На неё падает поток частиц N_0 (част/см²), количество ядер в единице объема мишени n (яд/см³). При этом ΔN частиц осуществит ядерную реакцию:

$$\Delta N = B \cdot N_0 = \sigma \cdot N_0 \cdot n \cdot h, \quad (9.6)$$

$$\Delta \Phi = B \cdot \Phi_0 = \sigma \cdot \Phi_0 \cdot n \cdot h, \quad (9.7)$$

где σ – эффективное сечение ядерной реакции, см².

В случае толстой мишени за h принимается пробег частицы в веществе мишени.

Из приведенного выражения видно, что:

$$\sigma = \frac{B}{n \cdot h} \text{ см}^2, \quad (9.8)$$

т.е. σ – это есть выход ядерной реакции, отнесенный к одному атому мишени.

Физический смысл σ – это вероятность одной частицы, направленной на мишень площадью 1 см^2 вступить в реакцию с одним конкретным атомом.

Обычно эффективные ядерные сечения измеряют в единицах, называемых барнами: $1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2$.

Число ядер в 1 см^3 определяется выражением:

$$n = \frac{N_A}{A} \cdot \rho \text{ яд/см}^3, \quad (9.9)$$

где N_A – число Авогадро, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$;

ρ – плотность вещества, г/см³;

A – атомный вес.

В расчетах часто применяется **макроскопическое эффективное сечение ядерной реакции**:

$$\Sigma = \sigma \cdot n = \frac{B}{h} \text{ см}^{-1}. \quad (9.10)$$

Макроскопическое сечение характеризует вероятность ядерной реакции на ядрах в 1 см^3 вещества. Его иногда также называют **коэффициентом ослабления**.

9.3 Реакции радиационного захвата нейтронов

Радиационный захват нейтронов – ядерная реакция (n, γ) , в которой ядро-мишень захватывает нейтрон, а энергия возбуждения образующегося ядра излучается в виде γ -кванта. Как правило, при этом образуются радиоактивные ядра – **наведённая активность**.

Реакции радиационного захвата используются для получения радионуклидов за счет **накопления наведённой активности**.

Математически задачу о накоплении радиоактивных атомов в облучаемом образце можно рассмотреть следующим образом.

Пусть на мишень толщиной h (см), с плотностью ядер n (1/см³), падает пучок тепловых нейтронов с плотностью потока φ_0 (нейтр./см²·с). Тогда на единице площади мишени будут образовываться за время dt ядра радиоактивного нуклида в количестве:

$$N = \varphi_0 \cdot n \cdot h \cdot \sigma \cdot dt, \quad (9.11)$$

где σ – эффективное сечение данной ядерной реакции, см².

Наряду с процессом образования активных ядер идет процесс их распада. Если к моменту t было N активных ядер, то за время dt их распадается $N \cdot \lambda \cdot dt$, где λ – постоянная распада радиоактивного нуклида. Т.к. процесс накопления активных ядер и их распад идут одновременно, то дифференциальное уравнение для $N(t)$ имеет вид:

$$dN = G \cdot dt - N \cdot \lambda \cdot dt, \quad (9.12)$$

где $G = \varphi_0 \cdot n \cdot h \cdot \sigma$ – число образующихся за 1 секунду активных ядер.

Интегрируя уравнение при начальном условии $t = 0, N = 0$, получаем:

$$N = \frac{G}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}). \quad (9.13)$$

Отсюда следует, что при увеличении t число активных ядер, накопленных в образце, стремится к:

$$N_{\max} = \frac{G}{\lambda}. \quad (9.14)$$

Умножение обеих частей уравнения на λ дает нам уравнение накопления активности в облучаемом образце:

$$A = A_{\max} \cdot (1 - e^{-\lambda t}), \quad (9.15)$$

или

$$A = A_{\max} \cdot \left(1 - 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \right). \quad (9.16)$$

9.4 Защита от нейтронов

Для защиты от нейтронов выбирают материалы с малым Z .

Плотность потока за защитой убывает по экспоненте:

$$\varphi_n = \varphi_{0n} \cdot e^{-d/L}, \quad (9.17)$$

где d – толщина защиты,

L – длина релаксации, см:

$$L = \frac{1}{\Sigma} = \frac{1}{\sigma \cdot n}. \quad (9.18)$$

Кратность ослабления защитой:

$$K = \frac{\varphi_{0n}}{\varphi_n} = e^{d/L}. \quad (9.19)$$

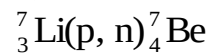
Иногда используют смешанную защиту для нейтронов и γ -излучения.

Примеры решения задач

Пример 9.1. Определить порог реакции ${}^7_3\text{Li}(p, n){}^7_4\text{Be}$.

Решение

Дано:



$E_{\text{пор}} - ?$

1. Определяют энергию ядерной реакции:

$$E = [m({}^7_3\text{Li}) + m({}^1_1\text{p}) - m({}^7_4\text{Be}) - m({}^1_0\text{n})] \cdot 931,5, \\ E = (7,01600 + 1,007276 - 7,01693 - 1,008665) \cdot 931,5 = \\ = -2,16 \text{ МэВ}.$$

2. Определяют порог реакции:

$$E_{\text{пор}} = |E| \cdot \left(1 + \frac{m}{M}\right), \\ E_{\text{пор}} = |-2,16| \cdot \left(1 + \frac{1,007276}{7,01600}\right) = 2,47 \text{ МэВ}.$$

Ответ: $E_{\text{пор}} = 2,47 \text{ МэВ}$.

Пример 9.2. Выход реакции (γ, n) при облучении алюминиевой пластинки ($\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$) толщиной 1 мм составляет $4 \cdot 10^{-4}$. Найти эффективное сечение данной реакции.

Решение

Дано:

$$B = 4 \cdot 10^{-4}$$

$$\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$$

1. Определяют число ядер в 1 см^3 :

$\frac{h = 1 \text{ мм}}{\sigma - ?}$

$$n = \frac{N_A}{A} \cdot \rho,$$

$$n = \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{27} \cdot 2,7 = 6,02 \cdot 10^{22} \text{ яд/см}^3.$$

2. Определяют эффективное сечение:

$$\sigma = \frac{B}{n \cdot h},$$

$$\sigma = \frac{4 \cdot 10^{-4}}{6,02 \cdot 10^{22} \cdot 0,1} = 6,64 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2.$$

Ответ: $\sigma = 6,64 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$.

Пример 9.3. Толстую бериллиевую мишень ($\rho = 1,85 \text{ г/см}^3$) бомбардируют альфа-частицами с энергией 7 МэВ. Определить эффективное сечение реакции (α, n), если известно, что ее выход составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$.

Решение

Дано: $\rho = 1,85 \text{ г/см}^3$ $E_\alpha = 7 \text{ МэВ}$ $B = 2,5 \cdot 10^{-4}$ $\sigma - ?$
--

1. Определяют пробег α -частиц в среде:

$$R_\alpha = \frac{10^{-4} \sqrt{A \cdot E_\alpha^3}}{\rho},$$

$$R_\alpha = \frac{10^{-4} \sqrt{9 \cdot 7^3}}{1,85} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ см}.$$

2. Определяют число ядер в 1 см^3 :

$$n = \frac{N_A}{A} \cdot \rho,$$

$$n = \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{9} \cdot 1,85 = 1,24 \cdot 10^{23} \text{ яд/см}^3.$$

3. Определяют эффективное сечение:

$$\sigma = \frac{B}{n \cdot R_\alpha},$$

$$\sigma = \frac{2,5 \cdot 10^{-4}}{1,24 \cdot 10^{23} \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 6,72 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2.$$

Ответ: $\sigma = 6,72 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$.

Пример 9.4. Пучок нейтронов падает на алюминиевую фольгу толщиной 1 мм. Определить, какая часть нейтронов пучка будет захвачена ядрами фольги, если эффективное сечение реакции захвата ядрами ^{27}Al нейтронов равно $2 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$. Плотность алюминия $2,7 \text{ г/см}^3$.

Решение

Дано:

$$d = 1 \text{ мм} = 0,1 \text{ см}$$

$$\sigma_{\text{захв}} = 2,5 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$$

$$\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$$

$$\frac{\varphi_n^{\text{погл}}}{\varphi_{0n}} - ?$$

1. Определяют число ядер в 1 см^3 :

$$n = \frac{N_A}{A} \cdot \rho,$$

$$n = \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{27} \cdot 2,7 = 6,02 \cdot 10^{22} \text{ яд/см}^3.$$

2. Определяют длину релаксации нейтронов:

$$L = \frac{1}{n\sigma},$$

$$L = \frac{1}{6,02 \cdot 10^{22} \cdot 2,5 \cdot 10^{-24}} = 6,64 \text{ см}.$$

3. Плотность потока нейтронов, прошедших сквозь вещество:

$$\varphi_n^{\text{прош}} = \varphi_{0n} \cdot e^{-d/L}.$$

4. Плотность потока нейтронов, поглощенных в веществе:

$$\varphi_n^{\text{погл}} = \varphi_{0n} - \varphi_n^{\text{прош}} = \varphi_{0n} - \varphi_{0n} \cdot e^{-d/L} = \varphi_{0n} \cdot (1 - e^{-d/L}).$$

5. Тогда, часть захваченных (поглощенных) нейтронов:

$$\frac{\varphi_n^{\text{погл}}}{\varphi_{0n}} = 1 - e^{-d/L}$$

$$\frac{\varphi_n^{\text{погл}}}{\varphi_{0n}} = 1 - e^{-0,1/6,64} = 0,015.$$

Ответ: $\frac{\varphi_n^{\text{погл}}}{\varphi_{0n}} = 0,015.$

Контрольные задания

1. Как изменится массовое число и заряд ядра при каждой из следующих реакций: (n, γ) ; $(n, 2n)$; (n, p) ; (n, α) ; (n, n) .

2. Как изменится заряд ядра и массовое число при каждой из следующих реакций: (p, γ) ; (p, α) ; (α, p) ; (γ, n) ; (γ, p) .
3. Определить энергию, освобождающуюся в реакции ${}^9\text{Be}(d, \alpha){}^7\text{Li}$.
4. Порог реакции фоторасщепления бериллия ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^24\text{He}$ равен 1,63 МэВ. Определить энергию реакции.
5. При облучении алюминиевой мишени нейтронами возможна реакция с вылетом альфа-частиц. Написать уравнение и определить энергетический эффект реакции.
6. Определить порог реакции ${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$.
7. Определить минимальную энергию нейтрона, при которой начинается реакция ${}^{27}\text{Al}(n, p){}^{27}\text{Mg}$.
8. Определить минимальное значение энергии гамма-кванта для осуществления фоторасщепления ядер лития по реакции ${}^7\text{Li}(\gamma, n){}^6\text{Li}$.
9. Определить минимальное значение энергии гамма-кванта для осуществления фоторасщепления ядер бериллия по реакции ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^24\text{He}$.
10. Какова минимальная энергия гамма-кванта для ядерного фотоэффекта, приводящего к вырыванию нейтрона из ядра ${}^{12}\text{C}$.
11. В камеру, наполненную воздухом впускают пучок альфа-частиц с энергией 7,8 МэВ. Длина камеры больше длины пробега альфа-частиц. Найти эффективное сечение эндотермической реакции (α, n) на ядрах азота ${}^{14}\text{N}$, если известно: энергия реакции ($-1,2$ МэВ), ее выход ($2 \cdot 10^{-6}$) и относительное содержание азота (78% по объему).
12. При облучении толстой алюминиевой мишени альфа-частицами с энергией 7,8 МэВ в результате ядерной реакции вылетают протоны в количестве 8 протонов на 10^6 альфа-частиц. Определить эффективное сечение процесса.
13. Толстую бериллиевую мишень бомбардируют альфа-частицами с энергией 7 МэВ. Определить эффективное сечение реакции (α, n) , если известно, что ее выход составляет $2,5 \cdot 10^{-4}$.
14. Толстая мишень ${}^7\text{Li}$ бомбардируется альфа-частицами с энергией 7 МэВ. Выход реакции (α, n) составляет при этом $2,8 \cdot 10^{-5}$. Найти ее эффективное сечение.
15. Выход реакции (γ, n) при облучении алюминиевой пластинки толщиной 1 мм составляет $4 \cdot 10^{-4}$. Найти эффективное сечение данной реакции.
16. Литиевая мишень толщиной 0,05 см бомбардируется пучком нейтронов. Определить выход реакции (n, α) , если известно, что ее эффективное сечение равно 71 барн.
17. Каков выход реакции ${}^{196}\text{Hg}(n, \gamma){}^{197}\text{Hg}$ если толщина мишени равна 0,1 см, а эффективное сечение $\sigma - 1$ барн.
18. Литиевая мишень толщиной 0,5 см бомбардируется пучком нейтронов. Определить выход реакции (n, α) , если известно, что ее эффективное сечение равно 71 барн.

19. При облучении дейтронами точкой мишени из льда тяжелой воды ($\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$) выход и эффективное сечение реакции ${}^2\text{H}(\text{d}, \text{n}){}^3\text{He}$ соответственно равны $8 \cdot 10^{-6}$ и 0,02 барн. Определить толщину мишени.

20. При облучении дейтронами точкой мишени из льда тяжелой воды ($\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$) выход и эффективное сечение реакции ${}^2\text{H}(\text{d}, \text{n}){}^3\text{He}$ соответственно равны $5 \cdot 10^{-6}$ и 0,04 барн. Определить толщину мишени.

21. Пучок нейтронов падает на медную пластину толщиной 1 см. Определить, какая часть нейтронов пучка будет захвачена ядрами пластины, если эффективное сечение реакции захвата ядрами ${}^{64}\text{Cu}$ нейтронов равно $2 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$. Плотность меди $8,92 \text{ г/см}^3$.

22. Пучок нейтронов падает на алюминиевую фольгу толщиной 3 мм. Определить, какая часть нейтронов пучка будет захвачена ядрами фольги, если эффективное сечение реакции захвата ядрами ${}^{27}\text{Al}$ нейтронов равно 10^{-25} см^2 . Плотность алюминия $2,7 \text{ г/см}^3$.

23. Пучок нейтронов падает на железную пластину толщиной 2 см. Определить, какая часть нейтронов пучка будет захвачена ядрами пластины, если эффективное сечение реакции захвата ядрами ${}^{56}\text{Fe}$ нейтронов равно $7 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$. Плотность железа $7,8 \text{ г/см}^3$.

24. Пучок нейтронов падает на медную пластину толщиной 1,5 см. Определить, какая часть нейтронов пучка будет захвачена ядрами пластины, если эффективное сечение реакции захвата ядрами ${}^{64}\text{Cu}$ нейтронов равно $2,8 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$. Плотность меди $8,92 \text{ г/см}^3$.

25. Пучок нейтронов падает на железную пластину толщиной 5 см. Определить, какая часть нейтронов пучка будет захвачена ядрами пластины, если эффективное сечение реакции захвата ядрами ${}^{56}\text{Fe}$ нейтронов равно $7 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$. Плотность железа $7,8 \text{ г/см}^3$.

10 РЕАКЦИИ ДЕЛЕНИЯ И СИНТЕЗА

10.1 Деление тяжёлых ядер

Мерой способности ядер к делению может служить отношение энергии кулоновского отталкивания протонов, стремящегося разорвать ядро, к энергии поверхностного натяжения:

$$\frac{E_{кул}}{E_{пов}} = \frac{0,71 \cdot Z^2 / A^{4/3}}{17,8 \cdot A^{-1/3}} = K \cdot \frac{Z^2}{A}. \quad (10.1)$$

Величину Z^2/A называют **параметром деления**. Чем больше этот параметр, тем легче делится ядро.

Для осуществления деления ядра необходимо сообщить ему дополнительную энергию, называемую **энергией активации ядра**. Эта энергия расходуется на первоначальное изменение формы ядра.

Величина энергии активации определяется формулой Бора-Френкеля:

$$E_{акт} = A^{2/3} \cdot \left(0,87 - 0,02 \cdot \frac{Z^2}{A} \right) \text{ МэВ}. \quad (10.2)$$

10.2 Синтез лёгких ядер

Синтез лёгких элементов приводит к большому выделению энергии, однако осуществить такой синтез очень трудно, т.к. при слиянии одноимённо заряженных ядер необходимо преодолеть силы кулоновского отталкивания, преодолеть потенциальный барьер ядра. Величина этого барьера определяется формулой:

$$E_{нб\bar{я}} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot |q_e|^2}{R_1 + R_2} = \frac{1,028 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}}, \quad (10.3)$$

где Z_1, Z_2, A_1, A_2 и R_1, R_2 – заряд, атомный вес и радиус двух сталкивающихся ядер;

$|q_e|$ – заряд электрона.

Для осуществления синтеза ядер они должны обладать определённой энергией, необходимой для преодоления потенциального барьера. Эту энергию так же, как и в случае реакции деления, называют **энергией активации**.

Энергию активации можно сообщать ядрам лёгких элементов различными путями. Самым рациональным путём является разогрев этих веществ до сверхвысоких температур.

Определить величину **температуры, необходимой для осуществления термоядерного синтеза**, можно исходя из условия, по которому энергия теплового движения ядер должна достичь энергии потенциального барьера:

$$E_{n\bar{b}я} \approx E_{нв} = kT, \quad (10.4)$$

где k – постоянная Больцмана ($k = 8,61 \cdot 10^{-5}$ эВ/°К).

Откуда:

$$T = \frac{E_{нв}}{k} = \frac{E_{n\bar{b}я}}{k} \text{ °К.} \quad (10.5)$$

Примеры решения задач

Пример 10.1. Определить значения энергии активации, необходимые для деления ядер ^{124}Sn и ^{235}U .

Решение

Дано: $^{124}\text{Sn}, ^{235}\text{U}$	Величина энергии активации определяется формулой Бора-Френкеля:
--	---

$E_{акт\text{ Sn}} - ?$

$E_{акт\text{ U}} - ?$

$$E_{акт} = A^{2/3} \cdot \left(0,87 - 0,02 \cdot \frac{Z^2}{A} \right),$$

$$E_{акт\text{ Sn}} = 124^{2/3} \cdot \left(0,87 - 0,02 \cdot \frac{50^2}{124} \right) = 11,61 \text{ МэВ},$$

$$E_{акт\text{ U}} = 235^{2/3} \cdot \left(0,87 - 0,02 \cdot \frac{92^2}{235} \right) = 5,7 \text{ МэВ},$$

Ответ: $E_{акт\text{ Sn}} = 11,61 \text{ МэВ}$; $E_{акт\text{ U}} = 5,7 \text{ МэВ}$.

Пример 10.2. Рассчитать температуру, соответствующую наиболее вероятной энергии при осуществлении синтеза между ядрами в плазме: $d + d \rightarrow t + n$.

Решение

Дано:	1. Определяют энергию потенциального барьера ядра:
-------	--

$Z_d = 1$

$A_d = 2$

$T - ?$

$$E_{n\bar{b}я} = \frac{1,028 \cdot Z_1 \cdot Z_2}{A_1^{1/3} + A_2^{1/3}},$$

$$E_{n\bar{b}я} = \frac{1,028 \cdot 1 \cdot 1}{2^{1/3} + 2^{1/3}} = 0,41 \text{ МэВ} = 4,1 \cdot 10^5 \text{ эВ}.$$

2. Определяют температуру, соответствующую наиболее вероятной энергии при осуществлении синтеза:

$$T = \frac{E_{нв}}{k} = \frac{E_{пб\bar{я}}}{k},$$

$$T = \frac{4,1 \cdot 10^5}{8,61 \cdot 10^{-5}} = 4,76 \cdot 10^9 \text{ К.}$$

Ответ: $T = 4,76 \cdot 10^9 \text{ К.}$

Пример 10.3. Рассчитать, какое количество энергии может быть получено в термоядерной установке из 1 г плазмы, если при КПД = 10 % в реакторе происходила реакции между ядрами: ${}^6\text{Li} + \text{d} \rightarrow 2{}^4\text{He}$ (массы исходных продуктов равные).

Решение

Дано:	1. Определяют общую энергию, выделяющаяся на один акт деления, из уравнения реакции:
$m = 1 \text{ г}$	
КПД = 10 %	
$E_{\text{прак}} - ?$	

$$\Delta E = (m({}^6\text{Li}) + m(\text{d}) - 2m({}^4\text{He})) \cdot 931,5,$$

$$\Delta E = (6,021512 + 2,01410 - 2 \cdot 4,00260) \cdot 931,5 = 22,375 \text{ МэВ},$$

2. Определяют теоретическую энергию, которая выделяется при синтезе 1 г плазмы с учетом, что массы исходных продуктов равные:

$$E_{\text{теор}} = \Delta E \cdot N = \Delta E \cdot \frac{m}{M} \cdot N_A,$$

$$E_{\text{теор}} = 22,375 \cdot \frac{1}{(6 \cdot 0,5 + 2 \cdot 0,5)} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 3,37 \cdot 10^{24} \text{ МэВ}$$

3. Определяют практическую энергию, которая выделяется при синтезе 1 г плазмы

$$\text{КПД} = \frac{E_{\text{прак}}}{E_{\text{теор}}} \cdot 100\%,$$

$$E_{\text{прак}} = \frac{E_{\text{теор}} \cdot \text{КПД}}{100\%},$$

$$E_{\text{прак}} = \frac{3,37 \cdot 10^{24} \cdot 10}{100} = 3,37 \cdot 10^{23} \text{ МэВ.}$$

Ответ: $E_{\text{прак}} = 3,37 \cdot 10^{23} \text{ МэВ.}$

Контрольные задания

1. Привести пример реакции деления ^{235}U с образованием пары конкретных осколочных изотопов и трёх нейтронов.
2. Привести пример реакции деления ^{233}U с образованием пары конкретных осколочных изотопов и трёх нейтронов.
3. Привести пример реакции деления ^{239}Pu с образованием пары конкретных осколочных изотопов и трёх нейтронов.
4. Привести пример реакции деления ^{232}Th с образованием пары конкретных осколочных изотопов и трёх нейтронов.
5. Привести пример реакции деления ^{240}Am с образованием пары конкретных осколочных изотопов и трёх нейтронов.
6. Определить значения энергии активации, необходимые для деления ядер ^{232}Th и ^{239}Pu .
7. Определить значения энергии активации, необходимые для деления ядер ^{151}Sm и ^{233}U .
8. Определить значения энергии активации, необходимые для деления ядер ^{208}Pb и ^{239}U .
9. Определить значения энергии активации, необходимые для деления ядер ^{210}Pb и ^{240}U .
10. Определить значения энергии активации, необходимые для деления ядер ^{150}Sm и ^{234}U .
11. Вычислить полную энергию (кВт·ч), выделяющуюся при делении 10 кг ^{235}U . В расчётах принять, что каждый акт деления сопровождается образованием пары осколочных элементов ^{95}Kr ($m = 94,9344$ аем) и ^{139}Ba ($m = 138,9335$ аем) и двух нейтронов.
12. Вычислить полную энергию (кВт·ч), выделяющуюся при делении 1 кг ^{239}Pu . В расчётах принять, что каждый акт деления сопровождается образованием пары осколочных элементов ^{95}Rb ($m = 94,9354$ аем) и ^{143}La ($m = 142,9335$ аем) и двух нейтронов.
13. Вычислить полную энергию (кВт·ч), выделяющуюся при делении 5 кг ^{235}U . В расчётах принять, что каждый акт деления сопровождается образованием пары осколочных элементов ^{95}Kr ($m = 94,9344$ аем) и ^{139}Ba ($m = 138,9335$ аем) и двух нейтронов.
14. Вычислить полную энергию (кВт·ч), выделяющуюся при делении 5 кг ^{239}Pu . В расчётах принять, что каждый акт деления сопровождается образованием пары осколочных элементов ^{95}Rb ($m = 94,9354$ аем) и ^{143}La ($m = 142,9335$ аем) и двух нейтронов.
15. Вычислить полную энергию (кВт·ч), выделяющуюся при делении 10 кг ^{239}Pu . В расчётах принять, что каждый акт деления сопровождается образованием пары осколочных элементов ^{95}Rb ($m = 94,9354$ аем) и ^{143}La ($m = 142,9335$ аем) и двух нейтронов.

16. Рассчитать энергетический выход реакции между ядрами в плазме:
 $p + p \rightarrow d + e^+$.

17. Рассчитать энергетический выход реакции между ядрами в плазме:
 $d + d \rightarrow t + n$.

18. Рассчитать энергетический выход реакции между ядрами в плазме:
 $d + t \rightarrow \alpha + n$.

19. Рассчитать энергетический выход реакции между ядрами в плазме:
 ${}^3\text{He} + d \rightarrow {}^4\text{He} + p$.

20. Рассчитать энергетический выход реакции между ядрами в плазме:
 ${}^6\text{Li} + d \rightarrow 2{}^4\text{He}$.

21. Рассчитать температуру, соответствующую наиболее вероятной энергии при осуществлении синтеза между ядрами в плазме: $d + t \rightarrow \alpha + n$.

22. Рассчитать температуру, соответствующую наиболее вероятной энергии при осуществлении синтеза между ядрами в плазме: $d + d \rightarrow t + p$.

23. Рассчитать температуру, соответствующую наиболее вероятной энергии при осуществлении синтеза между ядрами в плазме: $p + p \rightarrow d + e^+$.

24. Рассчитать температуру, соответствующую наиболее вероятной энергии при осуществлении синтеза между ядрами в плазме: ${}^6\text{Li} + d \rightarrow 2{}^4\text{He}$.

25. Рассчитать температуру, соответствующую наиболее вероятной энергии при осуществлении синтеза между ядрами в плазме: ${}^3\text{He} + d \rightarrow {}^4\text{He} + p$.

26. Рассчитать, какое количество энергии может быть получено в термоядерной установке из 5 г плазмы, если при КПД = 10 % в реакторе происходила реакции между ядрами: $d + d \rightarrow t + p$ (массы исходных продуктов равные).

27. Рассчитать, какое количество энергии может быть получено в термоядерной установке из 10 г плазмы, если при КПД = 20 % в реакторе происходила реакции между ядрами: ${}^3\text{He} + d \rightarrow {}^4\text{He} + p$ (массы исходных продуктов равные).

28. Рассчитать, какое количество энергии может быть получено в термоядерной установке из 8 г плазмы, если при КПД = 30 % в реакторе происходила реакции между ядрами: $d + d \rightarrow t + p$ (массы исходных продуктов равные).

29. Рассчитать, какое количество энергии может быть получено в термоядерной установке из 6 г плазмы, если при КПД = 15 % в реакторе происходила реакции между ядрами: $p + p \rightarrow d + e^+$ (массы исходных продуктов равные).

30. Рассчитать, какое количество энергии может быть получено в термоядерной установке из 1 г плазмы, если при КПД = 10 % в реакторе происходила реакции между ядрами: $d + t \rightarrow \alpha + n$ (массы исходных продуктов равные).

11 ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ

11.1 Величины, характеризующие источники излучений

Источник ионизирующего излучения – устройство или радиоактивное вещество, испускающее или способное испускать ионизирующее излучение.

Количество радиоактивного вещества измеряют, как правило, не по его массе, а по его активности.

Активность – количество радиоактивного вещества, определяемое по числу распадов в единицу времени.

Формулы для расчета активности и единицы ее измерения приведены в пункте 4.2 раздела 4 настоящего пособия.

Линейная передача энергии (ЛПЭ) L – отношение средней энергии $d\bar{\varepsilon}$, переданной веществу заряженной частицей при столкновении с электронами на элементарном пути, к длине этого пути dl :

$$D = \frac{d\bar{\varepsilon}}{dl} . \quad (11.1)$$

Единица ЛПЭ в системе СИ – **Дж/м**, внесистемная – **кэВ/мкм**:

$$\begin{aligned} 1 \text{ эВ} &= 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж.} \\ 1 \text{ кэВ/мкм} &= 1,602 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/м.} \end{aligned}$$

11.2 Величины, характеризующие поле излучений

11.2.1 Плотность потока частиц и энергии

Поле ионизирующих излучений – это пространственно-временное распределение ионизирующего излучения в рассматриваемой среде.

Чтобы описать поле, необходимо указать, сколько и каких частиц (квантов), с какой энергией и в каком направлении приходит в любую точку среды в каждый момент времени.

В дозиметрической практике в качестве величин, характеризующих поле излучения, используют **плотность потока частиц** и **плотность потока энергии**.

Определения и формулы для расчета этих величин приведены в пункте 8.1 раздела 8 настоящего пособия.

11.2.2 Поток и флюенс частиц и энергии

Поток частиц Φ_N (энергии Φ) – количество частиц (энергии) излучения, проходящего через все данное сечение за единицу времени:

$$\Phi_N = \frac{dN_N}{dt}, \quad (11.2)$$

$$\Phi = \frac{dE}{dt}, \quad (11.3)$$

Флюенс (перенос) частиц F_N (энергии F) – количество частиц (энергии) излучения, проходящего через единицу площади за все время облучения:

$$F_N = \frac{dN_N}{dS}, \quad (11.4)$$

$$F = \frac{dE}{dS}, \quad (11.5)$$

Очевидно, что при неизменном во времени и в пространстве поле имеют место соотношения:

$$\Phi_N = \varphi_N \cdot S, \quad (11.6)$$

$$\Phi = \varphi \cdot S, \quad (11.7)$$

$$F_N = \varphi_N \cdot t, \quad (11.8)$$

$$F = \varphi \cdot t. \quad (11.9)$$

Соотношения между единицами измерения характеристик поля излучений приведены в Приложении Ж.

11.3 Величины, характеризующие взаимодействие излучения со средой

11.3.1 Поглощенная доза и мощность поглощенной дозы излучения

Степень воздействия излучения на вещество и человека, прежде всего, характеризуется энергией излучения, переданной веществу (ткани человеческого организма).

Поглощенная доза излучения (или просто **доза**) – физическая величина, определяемая как энергия излучения, переданная единице массы вещества:

$$D = \frac{dE}{dm}. \quad (11.10)$$

Под поглощенной энергией здесь понимают разность между суммарной энергией всех частиц, входящих в заданный объем, и суммарной энергией всех частиц, покидающих объем.

Единицей поглощенной дозы в системе СИ является *грэй (Гр)* – такая доза, при которой происходит поглощение 1 Дж энергии любого вида излучения в 1 кг облученного вещества:

$$1 \text{ Гр} = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Внесистемная единица поглощенной дозы – *рад*, соответствующий энергии 0,01 Дж в 1 кг облученного вещества:

$$1 \text{ рад} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Гр}.$$

При оценке радиационной обстановки исходят из измеренного значения *мощности дозы излучения* – дозы, получаемой за единицу времени.

Мощность поглощенной дозы – это энергия излучения, поглощаемая в единице массы вещества в единицу времени:

$$P = \dot{D} = \frac{dD}{dt}, \quad (11.11)$$

Единицей мощности поглощенной дозы в системе СИ является *Гр/с*, внесистемной – *рад/с, рад/ч*.

11.3.2 Эквивалентная доза и мощность эквивалентной дозы излучения

Поглощенная доза хорошо описывает воздействие излучения на вещество. Однако, при одной и той же поглощенной дозе разных видов излучения на человека биологический эффект получается разным. Для оценки биологического эффекта воздействия излучения различного состава в задачах радиационной безопасности при облучении малыми дозами (не превышающими пяти предельно допустимых годовых доз) введено понятие *эквивалентная доза*.

Эквивалентная доза H – произведение поглощенной дозы D излучения на взвешивающий коэффициент вида этого излучения W_R :

$$H = D \cdot W_R. \quad (11.12)$$

Взвешивающий коэффициент вида излучения W_R определяет степень вредности того или иного вида излучения по отношению к гамма- и рентгеновскому излучению, для которых он равен $W_R = 1$ (табл. 11.1).

Единицей измерения эквивалентной дозы в системе СИ является *зиверт (Зв)* – единица эквивалентной дозы любого вида излучения, которая создает в биологической ткани такой же эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр гамма-излучения:

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}.$$

Таблица 11.1

Взвешивающий коэффициент вида излучения

Вид излучения	W_R	Вид излучения	W_R
Фотоны любых энергий	1	Нейтроны с энергией: • < 10 кэВ • 10 кэВ – 100 кэВ • > 100 кэВ – 2 МэВ • > 2 МэВ – 20 МэВ • > 20 МэВ	
Электроны и мюоны любых энергий	1		5
Протоны, с энергией > 2 МэВ, кроме протонов отдачи	5		10
Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра	20		20
			10
			5

Внесистемной единицей эквивалентной дозы является **бэр** – единица эквивалентной дозы любого вида излучения, которая создает в биологической ткани такой же эффект, как и поглощенная доза в 1 рад гамма-излучения:

$$1 \text{ бэр} = 0,01 \text{ Дж/кг} = 0,01 \text{ Зв.}$$

Мощность эквивалентной дозы:

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt}, \quad (11.13)$$

Единицей мощности эквивалентной дозы в системе СИ является **Зв/с**, внесистемной – **бэр/с**, **бэр/ч**.

Ожидаемая эквивалентная доза при внутреннем облучении в органе или ткани:

$$H_i(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_i(\tau) dt, \quad (11.14)$$

где $\dot{H}_i(\tau)$ – мощность эквивалентной дозы в органе или ткани моменту времени τ ;

t_0 – момент поступления радиоактивного вещества в организм;

τ – время, прошедшее после поступления радиоактивного вещества в организм.

Значение τ соответствует ожидаемой оставшейся продолжительности жизни человека. Принято, что $\tau = 50$ лет для взрослых лиц старше 20 лет и $\tau = (70 - t_0)$ лет – для детей и лиц моложе 20 лет.

В системе СИ единицей ожидаемой эквивалентной дозы является **Зв**, внесистемной – **бэр**.

11.3.3 Эффективная эквивалентная доза излучения

В практике обеспечения радиационной безопасности часто бывает так, что *облучается не все тело, а один из органов*. Например, при загрязнении бета-излучающими радионуклидами кожи, при накоплении йода в щитовой железе, при вдыхании радиоактивных газов и т.п.

Чтобы оценивать вред, наносимый всему организму, введено понятие *эффективной эквивалентной дозы E* , которая равна эквивалентной дозе H , полученной данным органом, умноженной на взвешивающий тканевый коэффициент W_{TK} (табл. 11.2).

$$E = \sum_i H_i W_{TKi}, \quad (11.15)$$

где H_i – эквивалентная доза, полученная данным органом;

W_{TKi} – взвешивающий тканевой коэффициент данного органа.

Таблица 11.2

Взвешивающий тканевой коэффициент данного органа

Ткань или орган	W_{TKi}	Ткань или орган	W_{TKi}
Гонады (половые железы)	0,2	Щитовидная железа	0,05
Красный костный мозг	0,12	Молочные железы	0,05
Легкие	0,12	Мочевой пузырь	0,05
Желудок, толстый кишечник	0,12	Кожа, клетки костных поверхностей	0,01
Пищевод	0,05	Остальные органы	0,05
Печень	0,05	Все тело	1

Таким образом, при равномерном облучении всего тела эффективная эквивалентная доза равна эквивалентной. Единицы измерения у них одинаковые, т.е. *Зв* и *бэр*.

Таким образом можно дать следующее определение:

Эффективная эквивалентная доза – это доза, которая оказывает то же воздействие на организм при равномерном облучении всего тела, как и данные эквивалентные дозы при неравномерном облучении всего тела.

Мощность эффективной дозы:

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt}, \quad (11.16)$$

Единицы мощности эффективной дозы аналогичны единицам мощности эквивалентной дозы, т.е. *Зв/с* и *бэр/с*, *бэр/ч*.

Ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения человека:

$$E(\tau) = \sum_i H_i(\tau) \cdot W_{TKi}, \quad (11.17)$$

где $H_i(\tau)$ – ожидаемая эквивалентная доза в органе или ткани.

Как и эффективная доза измеряется в **Зв** и **бэр**.

На практике для упрощения расчета эффективной дозы используют следующие соотношения:

$$E^{внеш} = \sum_R \Phi(\varepsilon)_R \cdot e(\varepsilon)_R^{внеш}, \quad (11.18)$$

где $\Phi(\varepsilon)_R$ – флюенс излучения R с энергией ε , част/см²;

$e(\varepsilon)_R^{внеш}$ – дозовый коэффициент излучения R , равный эффективной дозе при облучении тела человека потоком излучения R с единичным флюенсом и энергией ε , Зв/(част/см²).

$$E(\tau) = \sum_{U,G} P_{U,G} \cdot e(\tau)_{U,G}^{внут}, \quad (11.19)$$

где $P_{U,G}$ – активность радионуклида U , поступившего в организм (обычно это пероральное или ингаляционное поступление) в виде соединения типа G , Бк;

$e(\tau)_{U,G}^{внут}$ – дозовый коэффициент радионуклида U , равный ожидаемой эффективной дозе при поступлении в организм 1 Бк радионуклида U в виде соединения типа G , Зв/Бк.

Величины $e(\varepsilon)_R^{внеш}$ и $e(\tau)_{U,G}^{внут}$ приведены в НРБ-99/2009 (табл. 8.5 и 8.8; приложения П-1 и П-2).

Эффективная доза внутреннего облучения как правило обусловлена поступлением в организм аэрозолей, состав которых на практике бывает неизвестен. Поэтому используют рассчитанные для данной ситуации (данной конкретной АЭС) значение допустимой концентрации аэрозолей, которая создаёт допустимый уровень (ДУ) эффективной дозы – 12 мкЗв/ч. Тогда формула для эффективной доза внутреннего облучения $E(\tau)$ будет иметь вид:

$$E(\tau) = \frac{C_{\Sigma}}{ДК} \cdot ДУ \cdot t \text{ мкЗв}, \quad (11.20)$$

где C_{Σ} – концентрация аэрозолей, Бк/м³;

$ДК$ – допустимая концентрация аэрозолей, Бк/м³ (390 Бк/м³);

$ДУ$ – допустимый уровень эффективной дозы, мкЗв/ч (12 мкЗв/ч);

t – время работы, ч.

Индивидуальная эффективная доза E_i – сумма эффективной дозы внешнего облучения и ожидаемой эффективной дозы внутреннего облучения человека:

$$E_i = E^{внеш} + E(\tau). \quad (11.21)$$

Единица индивидуальной эффективной дозы – **Зв**.

Годовая эффективная (эквивалентная) доза – сумма эффективной (эквивалентной) дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой эффективной (эквивалентной) дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением в организм радионуклидов за этот же год.

Единица годовой эффективной (эквивалентной) дозы – **Зв**.

Коллективная эффективная доза – сумма индивидуальных эффективных доз:

$$S = \sum_i E_i \quad (11.22)$$

Коллективная эффективная доза является мерой коллективного риска возникновения радиационных эффектов облучения. Единица коллективной эффективной дозы – **чел.-Зв**.

11.3.4 Эквивалент дозы

Так как невозможно непосредственно определить величину энергии, поглощенной от каждого вида излучения в каждом органе, то величины эквивалентной и эффективной доз практически невозможно измерить. Чтобы преодолеть эту трудность, Отчет МКРЕ 47 рекомендует для зонного мониторинга следующие операционные величины: **амбиентный эквивалент дозы** и **направленный эквивалент дозы**, а для индивидуального мониторинга рекомендует: **индивидуальный эквивалент дозы**. Эти величины предназначены для оценки эквивалентной и эффективной доз без их существенной недооценки или чрезмерной переоценки.

Амбиентный эквивалент дозы (амбиентная доза) $H^*(d)$ – эквивалент дозы, который был бы создан в шаровом фантоме МКРЕ на глубине d (мм) от поверхности (рис. 11.1).

Шаровой фантом МКРЕ – это шар диаметром 30 см из тканеэквивалентного материала, имеющего следующий массовый химический состав: 76,2 % – кислород, 11,1 % – углерод, 10,1 % – водород и 2,6 % – азот, плотность – 1 г/см³ и эффективный атомный номер $Z_{эфф} = 6,5$.

Единица ambiентного эквивалента дозы – **Зв**.

Направленный эквивалент дозы $H'(d)$ – эквивалент дозы в некоторой точке поля излучения, который создается соответствующим полем в шаровом фантоме МКРЕ на глубине d (мм) в определенном направлении.

Эта величина подходит для зонного мониторинга полей в окружающей среде, включая слабопроникающие излучения, в этом случае берется глубина d 0,07 мм (для кожи) или 3 мм (для глаз). Приборы, откалиброванные по этой величине, дают показания для оценки величины эквивалентной дозы в определенном органе или ткани.

Индивидуальный эквивалент дозы $H^p(d)$ – эквивалент дозы в мягкой биологической ткани, определяемый на глубине d (мм) под рассматриваемой точкой на теле, которой обычно является место ношения индивидуального дозиметра (рис. 11.1).

Единица индивидуального эквивалента дозы – Зв.

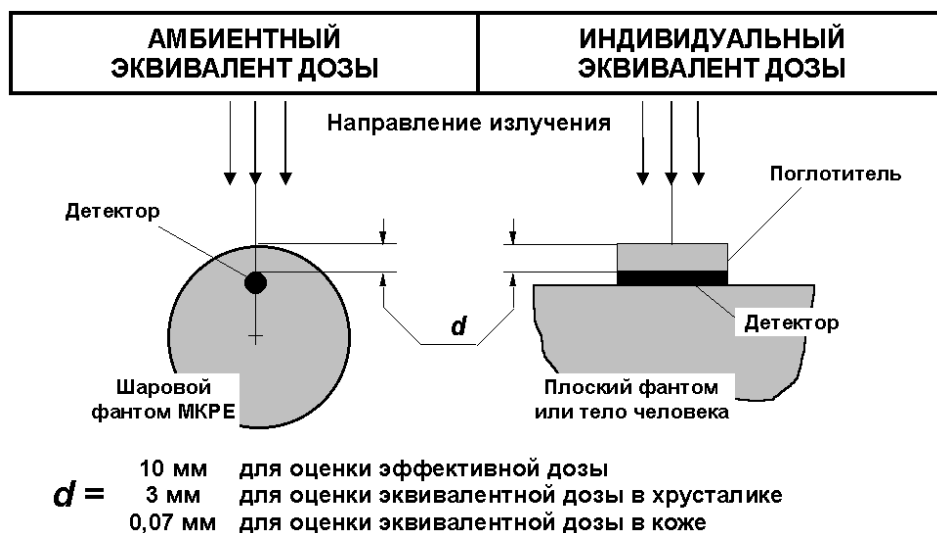


Рис. 11.1. Эквиваленты дозы

В большинстве ситуаций профессионального облучения **эффективная доза E может быть получена** согласно следующей формуле:

$$E \approx H_p(10) + E(50), \quad (11.23)$$

где $H_p(10)$ – индивидуальный эквивалент дозы внешнего облучения, Зв;

$E(50)$ – ожидаемая эффективная доза внутреннего облучения, Зв.

11.3.5 Экспозиционная доза излучения

Исторически сложилось, что для гамма-излучения был введен еще один вид дозы – **экспозиционная доза**. Дело в том, что в одном и том же поле в разных веществах поглощается разное количество энергии, т.е. разные вещества получают разные поглощенные дозы. Чтобы получить объек-

тивную характеристику поля по результатам измерений выбрали образцовое вещество – воздух, а, измерение поглощенной энергии осуществили по измеренной ионизации.

Экспозиционная доза – это доза гамма-излучения, определяемая по ионизации воздуха, и численно равная заряду ионов одного знака, приходящемуся на единицу массы воздуха:

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (11.24)$$

Единица измерения в системе СИ – **кулон на килограмм (Кл/кг)**.

Внесистемная единица экспозиционной дозы – **рентген (Р)**. Вначале она определялась как доза от 1 г радия на расстоянии 1 м за 1 ч. В настоящее время принято более точное определение: **1 рентген** – такая доза гамма-излучения, которая образует заряд $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл в 1 кг воздуха.

Экспозиционная доза в 1 Р соответствует поглощенной дозе в воздухе – 0,88 рад, а в ткани человеческого организма – 0,93 рад.

В последние годы величина экспозиционной дозы является нерекомендуемой, хотя все страны сохраняют эталон рентгена, как основу для всех прочих эталонов.

Мощность экспозиционной дозы – это заряд, образуемый единицей массы воздуха за единицу времени:

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (11.25)$$

Единицей мощности экспозиционной дозы в системе СИ является **А/кг**, внесистемной – **Р/с, Р/ч**.

11.3.6 Керма

Для объективной оценки поля излучения можно было бы использовать поглощенную дозу в воздухе или в ткани. Однако она зависит от условий облучения и, в частности, от размеров объема облучаемого вещества. Могут возникнуть погрешности, если количество вторичных электронов, возникающих в данном объеме и вылетающих из него и количество электронов, влетающих в него, будут не равны. В этой ситуации говорят об отсутствии электронного равновесия. Поэтому для объективной оценки поля излучения ввели понятие – **керма**.

Керма – отношение суммы первоначальных кинетических энергий dE_N всех заряженных частиц, появившихся под действием ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе dm вещества в этом объеме:

$$K = \frac{dE_N}{dm} . \quad (11.26)$$

В условиях электронного равновесия керма и поглощенная доза равны между собой. Единицы измерения кермы и поглощенной дозы одинаковые – в системе СИ – *Гр*, внесистемная – *рад*.

Мощность кермы:

$$\dot{K} = \frac{dK}{dt} . \quad (11.27)$$

Единицей мощности кермы, аналогичны единицам мощности поглощенной дозы, т.е. *Гр/с* и *рад/с, рад/ч*.

Основные, встречающиеся в практике единицы, приведены в Приложении 3, соотношения между ними в Приложении И.

11.4 Связь между величинами

11.4.1 Связь между плотность потока и мощностью дозы

Связи между величинами, характеризующими поле излучения (**плотность потока энергии φ или частиц φ_n**) и величинами, характеризующими взаимодействие излучения со средой (**доза, мощность дозы**) можно установить, введя понятие **массового коэффициента передачи энергии μ_{nm}** – доли энергии излучения, переданной веществу при прохождении защиты единичной массовой толщины (1 г/см^2 или 1 кг/м^2). В том случае, если на защиту падает излучение с плотностью потока энергии φ , произведение $\varphi \cdot \mu_{nm}$ даст энергию, переданную единице массы вещества в единицу времени, что есть ничто иное как **мощность поглощенной дозы**:

$$P = \varphi \cdot \mu_n, \quad (11.28)$$

$$P_\gamma = \varphi_\gamma \cdot E_\gamma \cdot \mu_n. \quad (11.29)$$

Чтобы перейти к **мощности экспозиционной дозы**, которая равна заряду, образованному гамма-излучением в единице массы воздуха за единицу времени, необходимо мощность поглощённой дозы разделить на среднюю энергию образования одной пары ионов в воздухе ϖ_e и умножить на заряд одного иона, равный заряду электрона q_e . При этом необходимо использовать массовый коэффициент передачи энергии для воздуха:

$$\dot{X} = \varphi_\gamma \cdot E_\gamma \cdot \mu_{n\text{в}} \cdot \frac{q_e}{\varpi_e} . \quad (11.30)$$

где φ_γ – плотность потока гамма-квантов, квант/(с·м²);

E_γ – энергия гамма-излучения; Дж;

μ_{nv} – массовый коэффициент передачи энергии в воздухе, м²/кг;

q_e – заряд электрона, Кл ($q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл);

ω_v – средняя энергия ионообразования в воздухе, Дж (постоянная величина, равная 34 эВ ($5,44 \cdot 10^{-18}$ Дж)).

5.2 Связь между мощностью экспозиционной дозы и активностью

Зная связь между плотностью потока гамма-излучения и мощностью экспозиционной дозы, можно рассчитать последнюю от точечного источника известной активности.

Зная активность A и число фотонов на 1 акт распада n_i , получаем, что в единицу времени источник испускает ($n_i \cdot A$) фотонов в угле 4π (рис. 11.2).

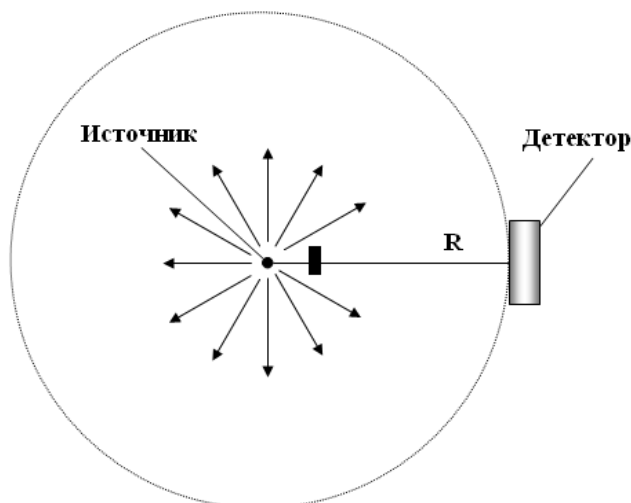


Рис. 11.2. Точечный источник

Чтобы получить **плотность потока на расстоянии R от источника**, необходимо разделить общее число частиц на площадь сферы радиуса R :

$$\varphi_\gamma = \frac{n_i \cdot A}{4\pi \cdot R^2}. \quad (11.31)$$

Тогда **мощность экспозиционной дозы**:

$$\dot{X} = \frac{n_i \cdot A}{4\pi \cdot R^2} \cdot E_\gamma \cdot \mu_{nv} \cdot \frac{q_e}{\omega_v}. \quad (11.32)$$

Сведем величины, определяемые по справочным данным для данного радионуклида в один коэффициент Γ_X – гамма-постоянную по мощности экспозиционной дозы:

$$\Gamma_X = \frac{n_i \cdot \mu_{nm\theta} \cdot q_e}{4\pi \cdot \varpi_\theta}. \quad (11.33)$$

В итоге получаем расчетную формулу **мощности экспозиционной дозы**:

$$\dot{X} = \Gamma_X \cdot \frac{A}{R^2}, \quad (11.34)$$

$$X = \Gamma_X \cdot \frac{A}{R^2} \cdot t. \quad (11.35)$$

При расчете величины имеют следующие размерности:

– во внесистемных единицах: X – Р, $\dot{X}$ – Р/ч, A – мКи, R – см, t – ч, Γ_X – (Р·см²)/(мКи·ч);

– в системе СИ: X – Гр, $\dot{X}$ – Гр/с, A – Бк, R – м, t – с, Γ_X – (Гр·м²)/(Бк·с).

Соотношение между единицами гамма-постоянной:

$$1 \text{ (Гр·м}^2\text{)/(Бк·с)} = 6,555 \text{ (Р·см}^2\text{)/(мКи·ч)}.$$

Следует отметить, что формулы для мощности других дозовых величин (поглощенной дозы, эквивалентной дозы, кермы) будут иметь аналогичный вид:

$$\dot{D} = \Gamma_D \cdot \frac{A}{R^2}, \quad (11.36)$$

$$\dot{H} = \Gamma_H \cdot \frac{A}{R^2}, \quad (11.37)$$

$$\dot{K} = \Gamma_K \cdot \frac{A}{R^2}. \quad (11.38)$$

Значения соответствующих постоянных в разных единицах измерения приведены в Приложении К. От их размерности зависят единицы измерения остальных величин.

Если **источник находится за защитой**, то:

$$\dot{X} = \dot{X}_0 \cdot e^{-\mu d} = \Gamma_X \cdot \frac{A}{R^2} \cdot e^{-\mu d} = \dot{X}_0 \cdot 2^{-\frac{d}{\Delta_{1/2}}} = \Gamma_X \cdot \frac{A}{R^2} \cdot 2^{-\frac{d}{\Delta_{1/2}}}, \quad (11.39)$$

где $\dot{X}_0$ – мощность дозы без защиты;

d – толщина слоя ослабления, см;

μ – линейный коэффициент ослабления излучения – доля гамма-квантов, провзаимодействовавших на единице длины пути, см⁻¹;

$\Delta_{1/2}$ – слой половинного ослабления γ -излучения, см.

Для ^{60}Co и других γ -излучателей значения $\Delta_{1/2}$ будут равны: для свинца – 1,3 см, для железа – 2,4 см, для бетона – 6,4 см.

Толщина защиты в этом случае будет:

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n \text{ см}, \quad (11.40)$$

где n – число слоев половинного ослабления.

Кратность ослабления γ -излучения определяют по формулам:

$$k = \frac{\dot{X}_0}{\dot{X}} = \frac{X_0}{X} = \frac{\dot{X}_0}{\dot{X}_{\text{дон}}} = \frac{X_0}{X_{\text{дон}}} = e^{\mu \cdot d} = 2^n = 2^{\frac{d}{\Delta_{1/2}}}. \quad (11.41)$$

5.3 Связь между мощностью экспозиционной дозы и гамма-эквивалентом

Приведенные соотношения между единицами активности и мощности дозы позволили для гамма-излучателей ввести такие единицы активности как **керма-эквивалент** и **радиевый гамма-эквивалент**.

Керма-эквивалент – это такое количество радиоактивного вещества, которое на расстоянии 1 м создает мощность кермы в воздухе 1 нГр/с. Единица измерения керма-эквивалента 1 нГр·м²/с.

Используя соотношение, по которому в воздухе 1 Гр = 88 Р, можно записать 1 нГр·м²/с = 0,316 мР·м²/ч. Таким образом керма-эквивалент 1 нГр·м²/с создает на расстоянии 1 м мощность экспозиционной дозы 0,316 мР/ч.

В качестве единицы **радиевого гамма-эквивалента** используется такое количество активности, которая создает ту же мощность дозы гамма-излучения, что и 1 мг радия. Поскольку, гамма-постоянная радия 8,4 (Р·см²)/(мКи·ч), то 1 мг-экв Ra создает на расстоянии 1 м мощность дозы 0,84 мР/ч.

Между гамма-эквивалентом нуклида M (мг-экв Ra) и его активностью A (мКи) имеется связь, которая выражается формулой:

$$M = \frac{A \cdot \Gamma_x}{8,4}. \quad (11.42)$$

Соотношение единиц керма-эквивалента с радиевым гамма-эквивалентом:

$$1 \text{ нГр} \cdot \text{м}^2/\text{с} = 2,66 \text{ мг-экв радия}.$$

Следует отметить также, что переход от экспозиционной дозы к эквивалентной дозе и затем к эффективной дозе гамма-излучения при внешнем

облучении достаточно труден, т.к. на этот переход влияет то обстоятельство, что жизненно-важные органы при внешнем облучении экранируются другими частями тела. Это степень экранирования зависит как от энергии излучения, так и его геометрии – с какой стороны облучается организм – спереди, сзади, сбоку или изотропно.

Мощность экспозиционной дозы и экспозиционная доза на расстоянии R (см) от точечного источника за время t (ч) в отсутствие защитного экрана можно вычислить по формуле:

$$\dot{X} = \frac{8,4 \cdot M}{R^2} \text{ Р/ч}, \quad (11.43)$$

$$X = \frac{8,4 \cdot M}{R^2} \cdot t \text{ Р}. \quad (11.44)$$

Для определения M удобно пользоваться номограммой, приведенной в Приложении Л.

В отдельные годы, в качестве предела дозы облучения персонала допускается использовать 5 бэр/год (но не более 10 бэр за 5 лет). Для этого случая допустимая недельная доза 100 мбэр (100 мР), что соответствует допустимой мощности дозы:

$$\dot{X}_{\text{дон}} = \frac{X_{\text{дон}}}{t} = \frac{100}{t} \text{ мбэр/ч}, \quad (11.45)$$

где t – количество часов работы персонала в неделю, ч.

Допустимое расстояние от точечного источника γ -излучения, на котором может работать персонал:

$$R = \sqrt{\frac{A \cdot \Gamma_{\gamma}}{\dot{X}_{\text{дон}}}} = \sqrt{\frac{8,4 \cdot M}{\dot{X}_{\text{дон}}}} \text{ см}. \quad (11.46)$$

Если персонал будет работать на определенном расстоянии от источника γ -излучения с определенной его активностью, то допустимое время работы:

$$t_{\text{доп}} = \frac{X_{\text{дон}} \cdot R^2}{A \cdot \Gamma_{\gamma}} = \frac{X_{\text{дон}} \cdot R^2}{8,4 \cdot M} \text{ ч/нед}. \quad (11.47)$$

В практике работы дозиметрических служб встречаются случаи, когда по измеренной дозиметрическими приборами мощности дозы необходимо ограничить время работы персонала. В этом случае пользуются формулой:

$$t_{\text{дв}} = \frac{100}{\dot{X}_{\text{изм}}} \text{ ч/нед.}, \quad (11.48)$$

где $\dot{X}_{\text{изм}}$ – измеренная приборами мощность экспозиционной дозы, мР/ч.

Погрешность прибора определяют по формуле:

$$\delta = \frac{\dot{X}_{\text{изм}} - \dot{X}_{\text{расч}}}{\dot{X}_{\text{расч}}} \cdot 100\%. \quad (11.49)$$

Примеры решения задач

Пример 11.1. Какую дозу получит оператор при работе в течении 12 ч с источником ^{60}Co активностью 100 мКи на расстоянии 1 м. Источник лежит в свинцовом контейнере толщиной 10 см.

Решение

Дано:

$t = 12 \text{ ч}$

$R = 1 \text{ м}$

$d = 10 \text{ см}$

$A = 100 \text{ мКи}$

$X - ?$

1. Определяют дозу без учета защиты:

$$X_0 = \frac{A \cdot \Gamma_X \cdot t}{R^2},$$

$$X_0 = \frac{100 \cdot 13 \cdot 12}{100^2} = 1,56 \text{ Р.}$$

2. Определяют число слоев половинного ослабления:

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$n = \frac{d}{\Delta_{1/2}},$$

$$n = \frac{10}{1,3} = 7,7.$$

3. Определяют кратность ослабления:

$$k = 2^n,$$

$$k = 2^{7,7} = 208.$$

4. Определяют дозу с учетом защиты:

$$k = \frac{X_0}{X},$$

$$X = \frac{X_0}{k},$$

$$X = \frac{1,56}{208} = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ Р} = 7,5 \text{ мР}.$$

Ответ: $X = 7,5 \text{ мР}$.

Пример 11.2. Определить допустимое время работы с ^{137}Cs активностью 500 мКи, находящемся в свинцовом домике с толщиной стенки 2,6 см. Расстояние до источника 50 см, допустимая доза 50 мР.

Решение

Дано:

$A = 500 \text{ мКи}$

$d = 2,6 \text{ см}$

$R = 50 \text{ см}$

ПД = 50 мР

$t_{\text{дог}} - ?$

1. Определяют число слоев половинного ослабления:

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$n = \frac{d}{\Delta_{1/2}},$$

$$n = \frac{2,6}{1,3} = 2.$$

2. Определяют кратность ослабления:

$$k = 2^n,$$

$$k = 2^2 = 4.$$

3. Определяют дозу без защиты:

$$k = \frac{X}{X_{\text{дог}}},$$

$$X = k \cdot X_{\text{дог}},$$

$$X = 4 \cdot 50 = 200 \text{ мР} = 0,2 \text{ Р}.$$

4. Определяют допустимое время:

$$X = \frac{A \cdot \Gamma_X \cdot t}{R^2},$$

$$t_{\text{дог}} = \frac{X \cdot R^2}{A \cdot \Gamma_X},$$

$$t_{\text{дог}} = \frac{0,2 \cdot 50^2}{500 \cdot 3,1} = 0,32 \text{ ч/нед}$$

Ответ: $t_{\text{дог}} = 0,32 \text{ ч/нед}$.

Пример 11.3. Рассчитать экспозиционную дозу и мощность дозы, получаемую персоналом при работе в течение 9 ч /нед с источником γ -излучения, находящимся на расстоянии 2 см.

Решение

Дано: $t = 9$ ч/нед $R = 2$ см $X - ?$ $\dot{X} - ?$	1. Определяют по номограмме из Приложения Л гамма-эквивалент источника при $t = 9$ ч/нед и $R = 2$ см: $M = 0,8$ мг-экв Ra. 2. Определяют мощность экспозиционной дозы:
--	---

$$\dot{X} = \frac{8,4 \cdot M}{R^2},$$
$$\dot{X} = \frac{8,4 \cdot 0,8}{2^2} = 1,68 \text{ Р/ч.}$$

3. Определяют экспозиционную дозу:

$$X = \dot{X} \cdot t$$
$$X = 1,68 \cdot 9 = 15,12 \text{ Р.}$$

Ответ: $X = 15,12$ Р; $\dot{X} = 1,68$ Р/ч.

Пример 11.4. Определить гамму постоянную нуклида, находящегося на расстоянии 0,4 см и воздействующего в течение 20 ч. Активность нуклида в источнике 5 мКи.

Решение

Дано: $R = 0,4$ см $t = 20$ ч $A = 5$ мКи $\Gamma_\gamma - ?$	1. Выражают гамма постоянную из формулы связи гамма-эквивалента и гамма постоянной: $M = \frac{A \cdot \Gamma_\gamma}{8,4},$ $\Gamma_\gamma = \frac{8,4 \cdot M}{A}.$
---	--

2. Определяют по номограмме из Приложения Л гамма-эквивалент источника при $t = 20$ ч и $R = 0,4$ см:

$$M = 1,5 \text{ мг-экв Ra.}$$

3. Определяют гамма-постоянную:

$$\Gamma_\gamma = \frac{8,4 \cdot 1,5}{5} = 2,52 \text{ (Р} \cdot \text{см}^2 \text{)/(ч} \cdot \text{мКи)}$$

Ответ: $\Gamma_\gamma = 2,52$ (Р·см²)/(ч·мКи)

Пример 11.5. Мощность экспозиционной дозы без защиты на рабочем месте равна 280 мР/ч. Найти толщину защиты из железа, если источником является ^{137}Cs , а время работы 25 ч/нед.

Решение

Дано:
$\dot{X}_0 = 280 \text{ мР/ч}$
$t = 25 \text{ ч/нед}$
$d - ?$

1. Определяют допустимую мощность дозы:

$$\dot{X}_{\text{дон}} = \frac{X_{\text{дон}}}{t} = \frac{100}{t},$$

$$\dot{X}_{\text{дон}} = \frac{100}{25} = 4 \text{ мР/ч.}$$

2. Определяют кратность ослабления:

$$k = \frac{\dot{X}_0}{\dot{X}_{\text{дон}}},$$

$$k = \frac{280}{4} = 70.$$

3. Определяют число слоев половинного ослабления:

$$k = 2^n,$$

$$n = \frac{\lg k}{\lg 2},$$

$$n = \frac{\lg 70}{\lg 2} = 6,13.$$

4. Определяют толщину защиты:

$$d = \Delta_{1/2} \cdot n,$$

$$d = 2,4 \cdot 6,13 = 14,7 \text{ см.}$$

Ответ: $d = 14,7 \text{ см.}$

Пример 11.6. Мощность экспозиционной дозы на рабочем месте составляет 25 мР/ч. Как необходимо ограничить время работы персонала?

Решение

Дано:
$\dot{X} = 25 \text{ мР/ч}$
$t_{\text{дог}} - ?$

$$t_{\text{дог}} = \frac{100}{\dot{X}},$$

$$t_{\text{дог}} = \frac{100}{25} = 4 \text{ ч/нед}$$

Ответ: $t_{\text{дог}} = 4 \text{ ч/нед.}$

Контрольные задания

1. Рассчитать мощность эквивалентной дозы на расстоянии 1 м от источника ^{137}Cs , активность которого на октябрь 1995 г. была 1000 МБк.
2. Определить мощность эквивалентной дозы от источника ^{60}Co активностью 100 МБк на расстоянии 30 см от него.
3. Рассчитать мощность дозы на расстоянии 0,5 м от источника 1000 г KCl (активность одного грамма 14,3 Бк), если гамма-постоянная ^{40}K 0,74 (мкЗв·м²)/(МКи·ч).
4. Во сколько раз снизит мощность дозы гамма-излучения кирпичная стена толщиной 10 см, если слой половинного ослабления кирпича – 2,5 см.
5. Определить необходимую кратность ослабления защитной γ -излучения от источника ^{60}Co активностью 50 ГБк, если расстояние до него 3 м, а допустимая доза за день (6 ч) – 10 мкЗв.
6. Определить мощность дозы гамма-излучения на расстоянии 40 см от источника, который на расстоянии 1 м создает мощность эквивалентной дозы 20 мкЗв/ч.
7. Какую дозу за время лабораторной работы получит студент если он будет работать в течение 30 минут с источником ^{60}Co активностью 1 ГБк на расстоянии 80 см. Источник лежит в контейнере из свинца с толщиной стенки 2,6 см.
8. Какую дозу за время лабораторной работы получит студент, если он будет работать в течение 45 минут с источником ^{137}Cs , активность которого 0,5 ГБк на январь 2000 г., расстояние до источника 0,5 м.
9. Какую дозу получит оператор при работе в течение 45 минут с источником ^{135}Cs активностью 10 ГБк на январь 1990 г, расстояние – 80 см.
10. Какую дозу получит оператор за 4 ч от источника ^{60}Co активностью 0,74 ГБк при расстоянии 90 см от него?
11. Какую дозу получит студент во время лабораторной работы за 30 минут, если он работает с источником активностью 50 МБк при расстоянии 1 м от него?
12. Какую дозу получит студент во время лабораторной работы за 1 ч, если он работает с источником активностью 20 МБк при расстоянии 50 см от него?
13. Рассчитать расстояние, на которое нужно установить источник ^{137}Cs активностью 10 ГБк, чтобы создать мощность дозы 50 мкЗв/ч.
14. На какое расстояние от прибора необходимо установить источник ^{60}Co активностью 37 МБк, чтобы прибор показал 10 мкЗв/ч?
15. Определить расстояние, на которое нужно установить источник ^{60}Co активностью 10 МБк, чтобы создать в блоке детектирования мощность дозы 10 мкЗв/ч.

16. При проверке работоспособности прибора необходимо с помощью источника ^{137}Cs активностью 2 ГБк на сентябрь 1990 г. создать мощность дозы 100 мЗв/ч. Определить необходимое расстояние между источником и детектором.

17. На какое расстояние от прибора необходимо установить источник ^{60}Co , чтобы создать мощность дозы 500 мкЗв/ч, если его активность на август 1999 г. равна 1 ГБк?

18. При проверке работоспособности прибора МКС-У необходимо создать мощность эквивалентной дозы 5 мЗв/ч. На какое расстояние от источника ^{60}Co необходимо установить его детектор, если активность источника 10 ГБк на март 2000 г.

19. Рассчитать допустимое время работы с источником ^{137}Cs , активностью 0,4 ГБк на расстоянии 80 см, если допустимая доза 10 мкЗв.

20. Рассчитать допустимое время работы с источником ^{60}Co активностью 10^8 Бк на расстоянии 0,3 м, если допустимая доза 10 мкЗв.

21. Определить допустимое время работы с источником ^{137}Cs активностью 1 ГБк при расстоянии 0,5 м до него, если допустимая доза 1 мЗв.

22. Определить допустимое время работы с источником ^{137}Cs активностью 10 ГБк, находящемся в свинцовом контейнере с толщиной стенок 2,6 см на расстоянии 70 см, допустимая доза 5 мкЗв.

23. Определить допустимое время работы с источником ^{60}Co активностью 2 ГБк, находящемся в свинцовом контейнере с толщиной стенок 2,6 см на расстоянии 60 см, допустимая доза 5 мкЗв.

24. Определить допустимое время работы с источником ^{137}Cs активностью 5 ГБк, находящимся в свинцовом домике с толщиной стенки 2,6 см. Расстояние до источника 80 см, допустимая доза 5 мкЗв.

25. Какую погрешность имеет прибор, если он на расстоянии 0,8 м от источника ^{60}Co активностью $3,7 \cdot 10^8$ Бк показывает мощность дозы 100 мкЗв/ч.

26. Дозиметр Д-2, поставленный на 20 ч на расстояние 1,5 м от источника ^{60}Co активностью 300 МБк показал дозу 1 мЗв. Определить погрешность прибора?

27. Прибор МКС-У показал мощность дозы 150 мкЗв/ч при измерении на расстоянии 1 м от источника ^{137}Cs активностью 0,74 ГБк. Определить погрешность прибора?

28. Мощность экспозиционной дозы без защиты на рабочем месте равна 250 мР/ч. Найти толщину защиты из бетона, если источником является ^{137}Cs , а время работы 30 ч/нед.

29. Мощность экспозиционной дозы без защиты на рабочем месте равна 300 мР/ч. Найти толщину защиты из свинца, если источником является ^{60}Co , а время работы 20 ч/нед.

30. Мощность экспозиционной дозы без защиты на рабочем месте равна 350 мР/ч. Найти толщину защиты из железа, если источником является ^{60}Co , а время работы 22 ч/нед.

31. Мощность экспозиционной дозы на рабочем месте составляет 20 мР/ч. Как необходимо ограничить время работы персонала?

32. Мощность экспозиционной дозы на рабочем месте составляет 33 мР/ч. Как необходимо ограничить время работы персонала?

33. На какое расстояние нужно установить источник излучения чтобы создать мощность дозы 50 мкЗв/ч, если на расстоянии 1 м он создает мощность дозы 75 мкЗв/ч?

34. Какова активность источника ^{137}Cs в настоящее время, если его активность на сентябрь 1998 г. была 10 ГБк?

35. Какова доля ^{90}Sr (в %) осталась после выброса при аварии ЧАЭС 26.04.86, если его период полураспада 27,8 лет.

36. Какая доля ^{131}I (в %) остается нераспавшейся через 2 месяца после аварийного выброса, если его период полураспада 8,02 дня.

37. Рассчитать дозу и мощность дозы, получаемую оператором при работе в течение 24 ч/нед с источником гамма-излучения, находящимся на расстоянии 20 см.

38. Определить время работы с источником гамма-излучения, находящимся на расстоянии 0,75 м, если $M = 150$ мг-экв Ra.

39. Определить расстояние, на котором облучение соответствует предельно допустимому ($D = 100$ мР), если $M = 150$ мг-экв Ra, $t = 15$ ч/нед.

40. Рассчитать дозу и мощность дозы, получаемую оператором при работе в течение 20 ч/нед с источником гамма-излучения, находящимся на расстоянии 1 см.

12 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНИЗАЦИОННОЙ КАМЕРЫ

12.1 Принцип работы ионизационной камеры

Ионизационная камера (ИК) представляет собой газонаполненный ионизационный детектор ионизирующего излучения, в котором электрическое поле используется для собирания без газового усиления зарядов, возникающих в чувствительном объеме под действием излучения.

Под действием излучения в объеме ИК образуются ионы (n). Если нет напряжения, то они рекомбинируют (n_p):

$$n_p = \alpha \cdot C_+ \cdot C_- \text{ ион}/(\text{см}^3 \cdot \text{с}), \quad (12.1)$$

где α – коэффициент рекомбинации, $\text{см}^2/\text{с}$;

C_+ – концентрация положительных ионов;

C_- – концентрация отрицательных ионов.

Если приложить напряжение, то часть ионов будет уходить на электроны (n_e):

$$n_e = n - n_p \text{ ион}/(\text{см}^3 \cdot \text{с}), \quad (12.2)$$

Во внешней цепи пойдёт ток:

$$I = q_e \cdot (n - n_p) \cdot V \text{ А}, \quad (12.3)$$

где V – объём камеры, см^3 ;

q_e – заряд электрона, Кл.

Чем выше напряжение, тем меньше n_p и в конце концов, почти все ($\approx 95\%$) образующиеся ионы попадают на электроды. Тогда ток насыщения:

$$I = q_e \cdot n \cdot V \text{ А}, \quad (12.4)$$

При мощности дозы 1 Р/ч заряд будет:

$$q_e = 2,58 \cdot 10^{-14} \frac{\text{Кл}}{\text{кг} \cdot \text{ч}} = \frac{2,58 \cdot 10^{-7}}{3600} \frac{\text{Кл}}{\text{г} \cdot \text{с}} \cdot 1,29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{г}}{\text{см}^3} = 0,924 \cdot 10^{-13} \frac{\text{А}}{\text{см}^3}.$$

Если имеется мощность дозы в Р/ч, то ток будет равен:

$$I = 0,924 \cdot 10^{-13} \cdot V \cdot \dot{X} \text{ А}, \quad (12.5)$$

где $\dot{X}$ – мощность дозы, Р/ч.

Исходя из соотношения 1 Зв = 100 Р, получим формулу для мощности эффективной дозы:

$$I = 0,924 \cdot 10^{-17} \cdot V \cdot \dot{E} \text{ А}, \quad (12.6)$$

где $\dot{E}$ – мощность эффективной дозы, мкЗв/ч.

12.2 Вольтамперная характеристика ионизационной камеры

ВАХ – это зависимость ионизационного тока камеры от напряжения, приложенного к ее электродам при постоянной мощности дозы излучения. Типичная вольтамперная характеристика приведена на рис. 12.1.

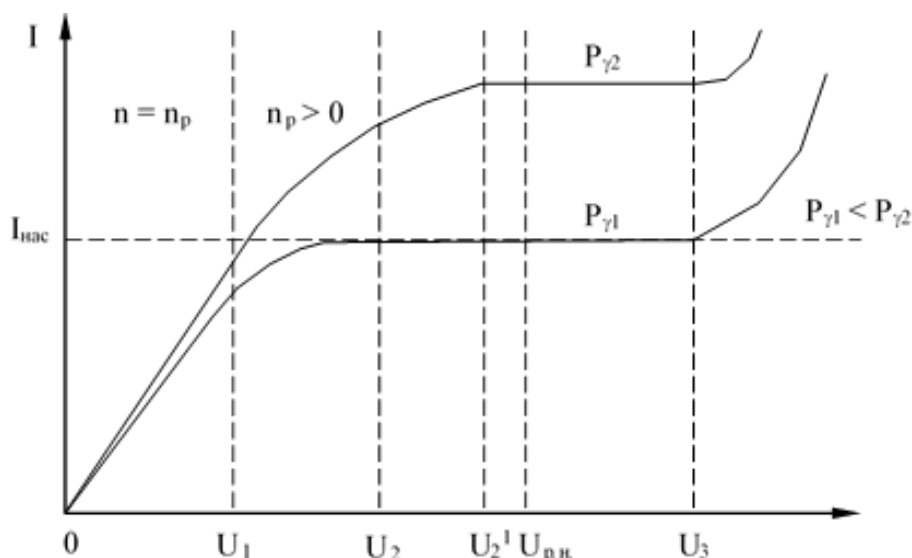


Рис. 12.1. Вольтамперные характеристики ионизационной камеры.
Области: $0 - U_1$ – область закона Ома; $U_1 - U_2$ – область ограничения закона Ома (область рекомбинации); $U_2 - U_3$ – область насыщения (рабочая область); $> U_3$ – область ударной ионизации.

В интервале напряжений от U_2 до U_3 в ИК наступает состояние насыщения. Этот интервал является рабочим участком вольтамперной характеристики ионизационной камеры. В этом интервале выбирают напряжение питания камеры, при этом оно выбирается правее начала плато для максимальной мощности дозы, что позволяет получить наибольший ионизационный ток при определенной мощности дозы излучения.

ВАХ снимается для определения рабочего напряжения камеры:

$$U_{нас} = 1,1 \cdot h^2 \cdot \sqrt{P_\gamma} \text{ В}, \quad (12.7)$$

где h – расстояние между электродами, см;

P_γ – мощность дозы, Р/ч.

Как правило при расчёте камеры задаются напряжением питания, диапазоном измерения (P_{max} , P_{min}) и минимально измеряемым током:

$$I_{\min} = 0,924 \cdot 10^{-13} \cdot V \cdot P_{\gamma \min}, \quad (12.8)$$

$$V = \frac{I_{\min}}{0,924 \cdot 10^{-13} \cdot P_{\gamma \min}}, \quad (12.9)$$

$$U_{\text{раб}} = U_{\max} = 1,1 \cdot h^2 \cdot \sqrt{P_{\gamma \max}}. \quad (12.10)$$

Толщину стенок камеры выбирают равной максимальному пробегу вторичного электрона:

$$E_{\bar{e} \max} = \frac{E_{\gamma}^2}{E_{\gamma} + 0,255}. \quad (12.11)$$

12.3 Нагрузочная характеристика ионизационной камеры

Это зависимость тока камеры от мощности дозы при постоянном напряжении. Снимается экспериментально с целью определения чувствительности камеры и диапазона измерения (рис. 12.2).

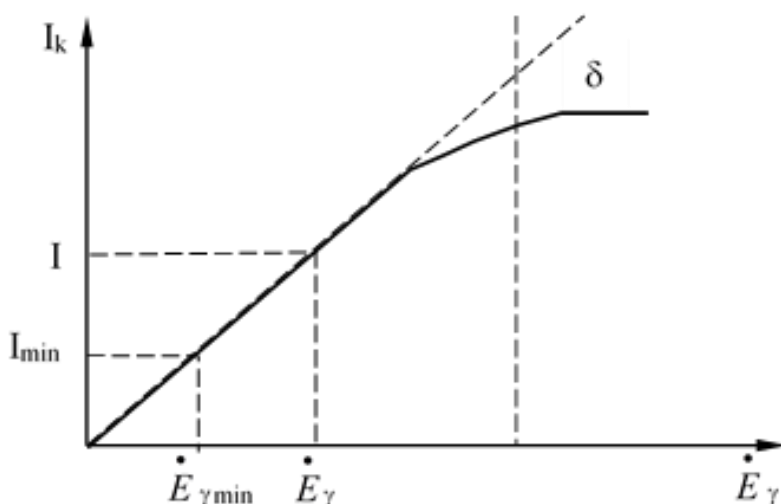


Рис. 12.2. Нагрузочная характеристика ионизационной камеры

Отклонение характеристики от прямой объясняется тем, что при больших мощностях доз начинается рекомбинация ионов. Чувствительность определяют на линейном участке. Нижнюю границу диапазона измерения $P_{\gamma \min}$ определяют по нижней границе измерения тока, измерением прибора. Верхняя граница $P_{\gamma \max}$ определяется величиной допустимой погрешности.

При погрешности $\pm 5\%$ работает формула:

$$U_{\text{нас}} = U_{\text{ном}} = 110 \cdot h^2 \cdot \sqrt{E_{\gamma \max}}. \quad (12.12)$$

12.4 Зависимость тока камеры от мощности дозы в стеночных ионизационных камерах.

В условиях насыщения ток ИК:

$$I_n = q_e \cdot n \cdot V, \quad (12.13)$$

где n – число пар ионов, образующихся в единице объёма;

q_e – заряд электрона, Кл;

V – рабочий объем ионизационной камеры, см³.

Поскольку имеем газовую полость, то по уравнению Брегга-Грея:

$$\Delta E = \frac{S_z}{S_\epsilon} \cdot \omega_\epsilon \cdot n, \quad (12.14)$$

где S_ϵ^*/S_z^* – относительная тормозная способность материала стенки камеры;
 ω_ϵ – средняя энергия ионообразования в воздухе, Дж (постоянная величина, равная 34 эВ ($5,44 \cdot 10^{-18}$ Дж)).

$$n = \Delta E \cdot \frac{S_\epsilon}{S_z} \cdot \frac{1}{\omega_\epsilon}. \quad (12.15)$$

Чтобы определить, какая энергия излучения будет поглощена в единице объема эффективного слоя (ΔE), нужно проинтегрировать по x плотность потока энергии во всем эффективном слое, умножить его на коэффициент передачи энергии в этом веществе (μ_{nz} , см²/электрон) и отнести к толщине эффективного слоя (R , см):

$$\Delta E = \frac{1}{R} \cdot \int_0^R \varphi_{\gamma 0} \cdot E_\gamma \cdot e^{-\mu_z \cdot (H-R)} \cdot e^{-\mu_z x} \cdot \mu_{nz} dx, \quad (12.16)$$

где $\varphi_{\gamma 0}$ – интенсивность на наружной границе стенки, Вт/(см²/с);

μ_z – линейный коэффициент ослабления гамма-излучения в материале стенки (с атомным номером Z), см⁻¹.

Некоторые сомножители, стоящие под знаком интеграла, не зависят от x , их можно вынести за скобки:

$$\Delta E = \frac{1}{R} \cdot \varphi_{\gamma 0} \cdot E_\gamma \cdot \mu_{nz} \cdot e^{-\mu_z \cdot (H-R)} \int_0^R e^{-\mu_z x} dx. \quad (12.17)$$

Для удобства преобразования этого выражения умножим и разделим его на коэффициент ослабления в веществе Z , взятый с обратным знаком ($-\mu_z$):

$$\Delta E = \frac{1}{-\mu_z R} \cdot \varphi_{\gamma 0} \cdot E_{\gamma} \cdot \mu_{nz} \cdot e^{-\mu_z \cdot (H-R)} \int_0^R e^{-\mu_z x} d(-\mu_z x). \quad (12.18)$$

После интегрирования формула примет вид:

$$\Delta E = \varphi_{\gamma 0} \cdot E_{\gamma} \cdot \mu_{nz} \cdot e^{-\mu_z \cdot (H-R)} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z R}}{\mu_z \cdot R}. \quad (12.19)$$

Из формулы (11.30) получим:

$$\Delta E_z = \frac{P_{\gamma}}{\mu_{ng}} \cdot \frac{\bar{\omega}_e}{q_e} \cdot \mu_{nz} \cdot e^{-\mu_z \cdot (H-R)} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z R}}{\mu_z \cdot R}, \quad (12.20)$$

где μ_{ng} – электронный коэффициент передачи энергии в воздухе, см²/электрон.

Отсюда ток насыщения ИК:

$$I_k = \frac{S_{mg}}{S_{mz}} \cdot \frac{\mu_{nz}}{\mu_{ng}} \cdot \rho_e \cdot e^{-\mu_z \cdot (H-R)} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z R}}{\mu_z \cdot R} \cdot V \cdot P_{\gamma} \text{ А.} \quad (12.21)$$

Здесь от энергии γ излучения зависит 1, 2 и 3 члены.

2^й член – ослабления γ -излучения в неэффективном слое.

3^й член – ослабления γ -излучения в эффективном слое.

Если выбрать толщину стенки $H = R$ то 2^й член будет равен 1. Если материал сделать эквивалентным воздуху, то 1^й член будет равен 1. Если стенка будет тонкая, то для трёх случаев:

$$I_k = \rho_e \cdot P_{\gamma} \cdot V \text{ А.} \quad (12.22)$$

В СИ:

$$I_k = 1,29 \cdot P_{\gamma} \cdot V \text{ А,} \quad (12.23)$$

где V – рабочий объем ИК, м³;

P_{γ} – мощность экспозиционной дозы, А/кг.

$$1 \text{ А/кг} = 1,4 \cdot 10^7 \text{ Р/ч; } 1 \text{ м}^3 = 10^6 \text{ см}^3.$$

Внесистемная единица:

$$I_k = 0,924 \cdot 10^{-13} \cdot P_{\gamma} \cdot V \text{ А,} \quad (12.24)$$

где V – рабочий объем ИК, см³,

P_{γ} – мощность экспозиционной дозы, Р/ч.

12.5 Зависимость чувствительности ионизационной камеры от энергии γ -излучения (ЭЗЧ)

Чувствительность – это отношение входного сигнала (тока детектора) к мощности γ -излучения (к выходному).

$$\eta = \frac{I_k}{P_\gamma}. \quad (12.25)$$

Камеру проектируют и испытывают для одной образцовой энергии и при этом определяют её чувствительность. Для других энергий чувствительность будет другая.

При проектировании и при поверке приборов в метрологических лабораториях чувствительность определяют для некоторой образцовой энергии $E_{\gamma \text{обр}}$. Как правило, это либо энергия ^{137}Cs (0,662 МэВ), либо ^{60}Co (1,25 МэВ). При измерении же при других энергиях, чувствительность детектора прибора изменяется, что вносит дополнительную погрешность.

ЭЗЧ – это отношение чувствительности при некоторой энергии X и чувствительности при образцовой энергии, которые в свою очередь зависят от энергии гамма-излучения:

$$\text{ЭЗЧ}(E_\gamma) = \frac{\eta_X(E_\gamma)}{\eta_{\text{обр}}(E_{\gamma \text{обр}})} = \frac{\left(\frac{I}{P_\gamma}\right)_X}{\left(\frac{I}{P_\gamma}\right)_{\text{обр}}}. \quad (12.26)$$

Знание значения ЭЗЧ очень важно в связи с тем, что оно определяет относительную погрешность прибора δ , если из значения ЭЗЧ вычесть 1:

$$\delta = \text{ЭЗЧ} - 1 = \frac{\left(\frac{I}{P_\gamma}\right)_X}{\left(\frac{I}{P_\gamma}\right)_{\text{обр}}} - 1 = \frac{\left(\frac{I}{P_\gamma}\right)_X - \left(\frac{I}{P_\gamma}\right)_{\text{обр}}}{\left(\frac{I}{P_\gamma}\right)_{\text{обр}}}. \quad (12.27)$$

Эта погрешность может достигать величин в сотни процентов. Она определяет энергетический диапазон дозиметрических приборов. Их можно использовать только при энергиях, при которых суммарная погрешность (основная и дополнительная) не превышает заданной величины. Для большинства рабочих приборов это значение составляет $\pm 30\%$.

ЭЗЧ имеет вид, представленный на рис. 12.3.

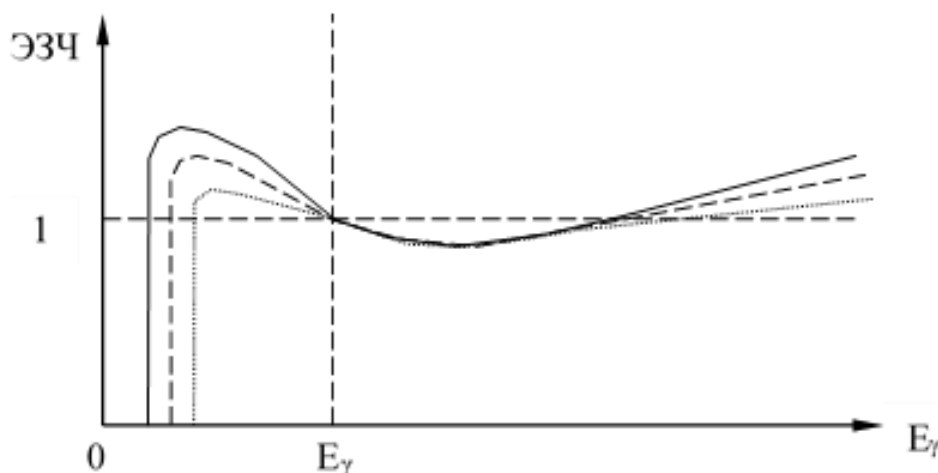


Рис. 12.3. ЭЗЧ

Резкий спад влево объясняется поглощением излучения в стенки. Затем большое нарастание объясняется фотоэффектом. При Комптон-эффекте $\text{ЭЗЧ} = 1$ и новое возрастание – эффект образования пар.

Как видно из графика наибольшую ЭЗЧ, а, следовательно, и наибольшую погрешность детекторы имеют при малых энергиях гамма-излучения. Поэтому проектанты детекторов вводят дополнительные компенсирующие фильтры из тяжёлых металлов (из вещества с большим Z). Они сильнее ослабляют мягкое излучение, чем жесткое, и уменьшают погрешность, расширяя тем самым энергетический диапазон прибора. Расчет характеристик ЭЗЧ выполняется при проектировании прибора.

ЭЗЧ ионизационной камеры без фильтра (ЭЗЧ «голового» детектора):

$$\text{ЭЗЧ}_0 = \frac{\mu_{nzx} \cdot \mu_{ng} \cdot e^{-\mu_{zx}(H-R_x)} \cdot (1 - e^{-\mu_{zx}R_x}) \cdot \mu_{z\gamma} R_{\gamma m}}{\mu_{ngx} \cdot \mu_{nz\gamma m} \cdot e^{-\mu_{z\gamma}(H-R_{\gamma m})} \cdot (1 - e^{-\mu_{z\gamma}R_{\gamma m}}) \cdot \mu_{zx} R_x}, \quad (12.28)$$

где H – толщина стенки камеры, см;

R – толщина эффективного слоя стенки (длина пробега вторичного электрона), см;

μ_z – линейный коэффициент ослабления для материала стенки, см^{-1} ;

μ_{nz} – коэффициент передачи энергии в материале стенки, $\text{см}^2/\text{г}$;

μ_{ng} – коэффициент передачи энергии в воздухе, $\text{см}^2/\text{г}$;

V – рабочий объем ионизационной камеры, см^3 .

ЭЗЧ ионизационной камеры с фильтром:

$$\text{ЭЗЧ}_\phi = \text{ЭЗЧ}_0 \cdot \frac{e^{-\mu_{\phi x} d_\phi}}{e^{-\mu_{\phi, \gamma m} d_\phi}}. \quad (12.29)$$

ЭЗЧ ионизационной камеры с фильтром с отверстиями:

$$\mathcal{E}Z\mathcal{C}_{\phi,om\epsilon} = \mathcal{E}Z\mathcal{C}_0 \cdot \frac{\frac{S_{om\epsilon}}{S_{\phi}} + \left(1 - \frac{S_{om\epsilon}}{S_{\phi}}\right) \cdot e^{-\mu_{\phi x} d_{\phi}}}{\frac{S_{om\epsilon}}{S_{\phi}} + \left(1 - \frac{S_{om\epsilon}}{S_{\phi}}\right) \cdot e^{-\mu_{\phi, \epsilon m} d_{\phi}}} . \quad (12.30)$$

12.6 Измерение дозы излучения конденсаторной камерой

Наиболее простым способом применения ионизационных камер для измерения дозы ионизирующего излучения является режим конденсаторной камеры.

Изменение заряда равно:

$$\Delta Q = I_k \cdot t = 0,924 \cdot 10^{-13} \cdot P_{\gamma} \cdot V \cdot t \cdot 3600 \text{ Кл}, \quad (12.31)$$

где V – рабочий объем камеры, см³;

P_{γ} – мощность дозы, Р/ч:

$$P_{\gamma} \cdot t = D_{\gamma} \text{ Р}, \quad (12.32)$$

где D_{γ} – экспозиционная доза излучения, Р.

$$\Delta Q = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot D_{\gamma} \cdot V \text{ Кл}. \quad (12.33)$$

Соответственно на электродах камеры уменьшится напряжение:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C} \cdot D_{\gamma} = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot V \cdot R \cdot P_{\gamma} \text{ В}, \quad (12.34)$$

где C – электрическая емкость камеры, Ф.

Так как величины V и C являются для каждой конкретной камеры постоянными, то изменение напряжения на электродах камеры будет пропорционально дозе ионизирующего излучения. Т.е. измеряя изменение напряжения, измеряют дозу.

Иногда для расширения диапазона измерения доз емкость камеры искусственно увеличивают. Конструктивно эта задача решается за счет использования конденсатора.

Чтобы измерять большие дозы в дозиметр вставляют большие конденсаторы, подключая их параллельно электродам ионизационной камеры, и тогда:

$$\Delta U = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C_{ук} + C_{дон}} \cdot D \text{ В}, \quad (12.35)$$

где $C_{ик}$ – емкостью камер, Ф;

$C_{нар}$ – емкостью конденсатора, Ф.

Чувствительность конденсаторной камеры представляет собой отношение изменения напряжения на камере к дозе, вызвавшей это изменение:

$$\frac{\Delta U}{D_\gamma} = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C}. \quad (12.36)$$

12.7 Измерение дозы ИК по принципу «заряд – разряд»

Одним из главных недостатков конденсаторной ионизационной камеры является значительный саморазряд и, как следствие, невысокая точность измерения за большой временной интервал.

Одним из способов снижения погрешности измерения за счет саморазряда является перевод процесса регистрации доз за большой промежуток времени к измерению доз за малые промежутки с подсчетом числа этих промежутков.

Первоначально камера заряжена до $U_{пит}$ и переключатель разомкнут. При облучении напряжение на камере падает и когда достигает $U_{порог}$, срабатывает пороговое устройство. Оно замыкает переключатель, заряжает камеру и размыкает переключатель. Дает счётный импульс на выход. Процесс изменения напряжения во времени отражен на графике (рис. 12.4).

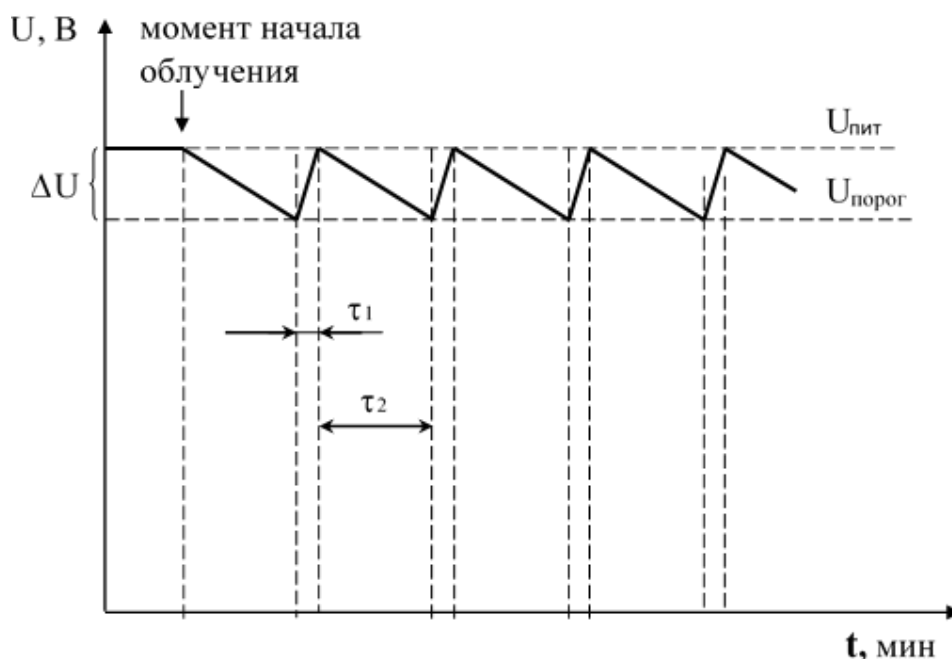


Рис. 12.4. Изменение напряжения на электродах камеры в режиме "заряд-разряд":

τ_1 – время заряда; τ_2 – время разряда.

Полное время цикла «заряд – разряд» складывается из времени заряда камеры (τ_1) и времени разряда ее под действием излучения (τ_2).

$$t = \tau_1 + \tau_2. \quad (12.37)$$

При этом условия заряда выбираются такими, чтобы $\tau_1 \ll \tau_2$, т.е. время всего цикла t почти полностью занято временем разряда камеры.

Тогда частота следования циклов «заряд – разряд»:

$$N = \frac{1}{t} = \frac{1}{\tau_2}. \quad (12.38)$$

Изменение напряжения камеры:

$$\Delta U = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C} \cdot P_\gamma \cdot \tau_2. \quad (12.39)$$

где P_γ – мощность экспозиционной дозы, Р/ч.

Доза, измеренная за один цикл «заряд – разряд»:

$$D = P_\gamma \cdot \tau_2. \quad (12.40)$$

Тогда частота следования циклов:

$$N = \frac{1}{\tau_2} = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{\Delta U \cdot C} \cdot P_\gamma. \quad (12.41)$$

Отсюда видно, что частота срабатывания пропорциональна мощности дозы.

Количество импульсов пропорционально дозе:

$$Z = N \cdot t, \quad (12.42)$$

$$Z = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{\Delta U \cdot C} \cdot D. \quad (12.43)$$

12.8 Измерение дозы ИК методом перераспределения зарядов

В этих дозиметрах имеется два конденсатора: зарядный и измерительный:

$$C_{зар} \gg C_{изм} \gg C_{ИК}. \quad (12.44)$$

Перед выдачей дозиметр вставляется в гнездо «заряд», затем в гнездо «разряд» (закорачивается $C_{изм}$):

$$U_{зар} = U_{ИК} + U_{изм}. \quad (12.45)$$

При облучении в ионизационной камере идёт ток, который заряжает $C_{изм}$. В результате этого процесса напряжение на электродах камеры упадет на величину $\Delta U_{ик}$:

$$\Delta U_{ик} = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C} \cdot D. \quad (12.46)$$

где C – суммарная емкость системы «ионизационная камера – конденсаторы».

При таком (последовательно-параллельном) включении элементов суммарная емкость системы равна:

$$C = C_{изм} + \frac{C_{изм} \cdot C_{зар}}{C_{изм} + C_{зар}} \approx C_{изм}. \quad (12.47)$$

Поскольку $C_{изм}$ значительно меньше $C_{зар}$ им можно пренебречь:

$$\Delta U_{ик} = \Delta U_{зар} - \Delta U_{изм} \approx \Delta U_{изм}, \quad (12.48)$$

$$\Delta U_{изм} = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C_{изм}} \cdot D. \quad (12.49)$$

Пример решения задач

Пример 12.1. Рассчитать величину сопротивления нагрузки в цепи ИК объемом 500 см^3 чтобы при мощности дозы $0,1 \text{ Р/ч}$ падение напряжения на нагрузке составило 1 В .

Решение

Дано:	На электродах камеры уменьшится напряжение определяют по формуле:
$P = 0,1 \text{ Р/ч}$	
$\Delta U = 1 \text{ В}$	
$V = 500 \text{ см}^3$	
$R = ?$	
	Отсюда

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C} \cdot D_{\gamma} = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot V \cdot R \cdot P_{\gamma} \text{ В.}$$

$$R = \frac{\Delta U}{3,328 \cdot 10^{-10} \cdot V \cdot P_{\gamma}},$$

$$R = \frac{1}{3,328 \cdot 10^{-10} \cdot 500 \cdot 0,1} = 6 \cdot 10^7 \text{ Ом} = 60 \text{ МОм.}$$

Ответ: $R = 60 \text{ МОм}$.

Пример 12.2. Рассчитать объем ИК дозиметра, работающего по принципу перераспределения зарядов, если при получении дозы в 1 Р напряжение на измерительном конденсаторе емкостью 50 пФ составляет 30 В.

Решение

Дано:
 $D = 1 \text{ Р}$
 $\Delta U_{изм} = 30 \text{ В}$
 $C_{изм} = 50 \text{ пФ} = 50 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$
 $V - ?$

Измеренное изменение напряжения ИК дозиметра, работающего по принципу перераспределения зарядов, определяют по формуле:

$$\Delta U_{изм} = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C_{изм}} \cdot D,$$

Отсюда

$$V = \frac{\Delta U_{изм} \cdot C_{изм}}{3,328 \cdot 10^{-10} \cdot D},$$

$$V = \frac{30 \cdot 50 \cdot 10^{-12}}{3,328 \cdot 10^{-10} \cdot 1} = 4,51 \text{ см}^3.$$

Ответ: $V = 4,51 \text{ см}^3$.

Пример 12.3. Определить величину добавочной емкости конденсатора, который необходимо подключить параллельно ИК дозиметра, чтобы при том же изменении напряжения можно было измерить дозу в 5 раз большую. Емкость камеры 6 пФ.

Решение

Дано:
 $D_2 = 5D_1$
 $\Delta U_1 = \Delta U_2$
 $C_{ИК} = 6 \text{ пФ}$
 $C_{доб} - ?$

Изменение напряжения дозиметра без добавочного конденсатора:

$$\Delta U_1 = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C_{ик}} \cdot D_1.$$

Изменение напряжения дозиметра с добавочным конденсатором:

$$\Delta U_2 = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C_{ик} + C_{дон}} \cdot D_2.$$

Т.к. по условию $\Delta U_1 = \Delta U_2$ и $D_2 = 5D_1$, то:

$$3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C_{ик}} \cdot D_1 = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C_{ик} + C_{дон}} \cdot D_2,$$

$$3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C_{ик}} \cdot D_1 = 3,328 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{V}{C_{ик} + C_{дон}} \cdot 5D_1,$$

$$\frac{1}{C_{ик}} = \frac{5}{C_{ик} + C_{доб}},$$

$$C_{ик} + C_{доб} = 5C_{ик},$$

$$C_{доб} = 4C_{ик},$$

$$C_{доб} = 4 \cdot 6 = 24 \text{ пФ}.$$

Ответ: $C_{доб} = 24 \text{ пФ}$.

Контрольные задания

1. Рассчитать величину напряжения на измерительном конденсаторе дозиметра, работающего по принципу перераспределения зарядов, если объем ионизационной камеры $0,7 \text{ см}^3$, доза облучения 50 Р , емкость измерительного конденсатора 5000 пФ .

2. Рассчитать величину напряжения на измерительном конденсаторе дозиметра, работающего по принципу перераспределения зарядов, если объем ИК $4,5 \text{ см}^3$, доза $0,4 \text{ Р}$, емкость измерительного конденсатора 45 пФ .

3. Рассчитать величину напряжения на измерительном конденсаторе дозиметра, работающего по принципу перераспределения зарядов, если объем ИК $0,7 \text{ см}^3$, доза облучения 300 Р , емкость измерительного конденсатора 5000 пФ .

4. Рассчитать величину уменьшения напряжения на электродах конденсаторной ИК объемом $3,2 \text{ см}^3$ после облучения дозой $0,3 \text{ Р}$, если емкость камеры 8 пФ .

5. Рассчитать уменьшение напряжения на электродах конденсаторной камеры объемом 2 см^3 при дозе 5 Р , если емкость конденсатора, подключенного параллельно электродам камеры равна 500 пФ .

6. Определить величину зарядного напряжения конденсаторной камеры дозиметра объемом 5 см^3 и емкостью $4,5 \text{ пФ}$, если напряжение насыщения равно 25 В . Необходимо измерить дозу $0,2 \text{ Р}$.

7. Рассчитать величину сопротивления нагрузки в цепи ИК объемом 200 см^3 , чтобы при мощности дозы 20 мР/ч падение напряжения на нагрузке составило 1 В .

8. Рассчитать сопротивление нагрузки в цепи ИК объемом 100 см^3 , чтобы при мощности дозы 4 Р/ч падение напряжения на нагрузке составило 1 В .

9. Рассчитать оптимальную толщину стенки ИК из алюминия при данной энергии гамма-квантов $0,8 \text{ МэВ}$.

10. Рассчитать оптимальную толщину стенок камеры из алюминия при энергии гамма-квантов $1,25 \text{ МэВ}$.

11. Рассчитать оптимальную толщину стенок камеры из алюминия при энергии гамма-квантов $0,3 \text{ МэВ}$.

12. Рассчитать оптимальную толщину стенки камеры из алюминия при энергии гамма-квантов 2 МэВ.

13. Рассчитать напряжение насыщения для плоской ИК, работающей в диапазоне мощностей доз гамма-излучения от 0,2 до 200 Р/ч, если расстояние между электродами 3 см.

14. Рассчитать напряжение насыщения для ИК, работающей в диапазоне мощностей доз от 0,2 до 200 Р/ч, если расстояние между электродами 3 см.

15. Рассчитать напряжение насыщения для ИК, работающей в диапазоне мощностей доз от 0,2 до 200 Р/ч, если расстояние между электродами 2,5 см.

16. Рассчитать величину дозы, которую можно измерить дозиметром, работающим по принципу перераспределения зарядов, если объем его ИК $0,8 \text{ см}^3$, емкость измерительного конденсатора 440 пФ, начальное напряжение на зарядном конденсаторе и камере 220 В, а минимальное напряжение насыщения камеры 60 В.

17. Рассчитать величину дозы, которую можно измерить дозиметром, работающим по принципу перераспределения зарядов, если объем его ИК $1,2 \text{ см}^3$, емкость измерительного конденсатора 360 пФ, начальное напряжение на зарядном конденсаторе 280 В, а минимальное напряжение насыщения 60 В.

18. Рассчитать величину дозы, которую можно измерить дозиметром, работающим по принципу перераспределения зарядов, если объем его ИК $1,3 \text{ см}^3$, емкость измерительного конденсатора 480 пФ, начальное напряжение на зарядном конденсаторе 390 В, а минимальное напряжение насыщения 60 В.

19. Определить емкость измерительного конденсатора дозиметра, работающего по принципу перераспределения зарядов, если при объеме ИК 5 см^3 и дозе 50 мР напряжения на нем составляет 16,5 В.

20. Рассчитать величину тока насыщения ИК объемом 250 см^3 при облучении мощностью дозы 1,5 Р/ч.

21. Рассчитать величину тока насыщения ИК при мощности дозы 10 мР/ч, если объем ее 5 л.

22. Рассчитать величину тока насыщения воздухоэквивалентной камеры объемом 4 л при облучении мощностью дозы 100 мР/ч.

23. Рассчитать величину тока насыщения ИК при мощности дозы 20 мР/ч, если её объем 5 л.

24. Рассчитать величину тока насыщения воздухоэквивалентной камеры объемом 2,6 л при облучении мощностью дозы гамма-излучения 10 мР/ч.

25. Рассчитать объем ИК, работающей в режиме «заряд-разряд», чтобы при мощности дозы 0,8 Р/ч скорость счета импульсов напряжения амплитудой 1 В на электродах камеры составляла 0,4 имп/с при емкости камеры 16 пФ.

26. Рассчитать объем ИК, работающей в режиме «заряд-разряд», чтобы при мощности дозы 0,8 Р/ч скорость счета импульсов напряжения амплитудой 1 В составляла 0,5 имп/с при емкости камеры 8 пФ.

27. Рассчитать объем ИК, работающей в режиме «заряд-разряд», чтобы при мощности дозы 0,3 Р/ч скорость счета импульсов напряжения амплитудой 1 В на электродах камеры n составляла 1,5 имп/с при емкости камеры 15 пФ.

28. Рассчитать объем ИК дозиметра, работающего по принципу перераспределения зарядов, если при получении дозы в 1,5 Р напряжение на измерительном конденсаторе емкостью 40 пФ составляет 70 В.

29. Рассчитать объем конденсаторной ИК, если при дозе 2 Р уменьшение напряжения на ней составляет 82 В, емкость камеры 8 пФ.

30. Определить величину добавочной емкости конденсатора, который необходимо подключить параллельно электродам ИК дозиметра, чтобы при том же изменении напряжения на электродах камеры можно было измерить дозу в 4 раза большую. Емкость камеры 6 пФ.

31. Определить величину добавочной емкости конденсатора, которую необходимо подключить параллельно электродам конденсаторной камеры дозиметра, чтобы при этом же изменении напряжения на электродах камеры можно было измерить дозу в 3 раза большую. Емкость камеры 5 пФ.

32. Рассчитать емкость конденсатора, который необходимо подключить параллельно электродам ИК объемом 200 см³, чтобы в режиме «заряд-разряд» амплитуда импульсов напряжения на электродах составила 1 В при дозе 1 Р.

33. Рассчитать минимальную величину мощности дозы, которую можно измерить ИК, если порог чувствительности лампового электрометра 10⁻¹³ А. Объем камеры 20 см³.

34. Рассчитать минимальную величину мощности дозы гамма-излучения, которую можно измерить воздухоэквивалентной ИК, если порог чувствительности лампового вольтметра 10⁻¹³ А. Объем камеры 400 см³.

35. Рассчитать минимальную величину мощности дозы гамма-излучения, которую можно измерить ИК с воздухоэквивалентными стенками, если порог чувствительности лампового электрометра 10⁻¹³ А. Объем камеры 50 см³.

36. Рассчитать минимальную величину мощности дозы гамма-излучения, которую можно измерить ИК воздухоэквивалентными стенками, если порог чувствительности лампового электрометра 10⁻¹³ А, объем камеры 360 см³.

13 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ГАЗОРАЗРЯДНОГО СЧЕТЧИКА

13.1 Устройство газоразрядных счетчиков

Конструктивно газоразрядный счетчик обычно выполнен в виде полого металлического или стеклянного цилиндра, представляющего собой внешний электрод (катод), по оси которого натянута тонкая металлическая нить – внутренний электрод (анод) – закрепленная на изоляторах (рис. 13.1).

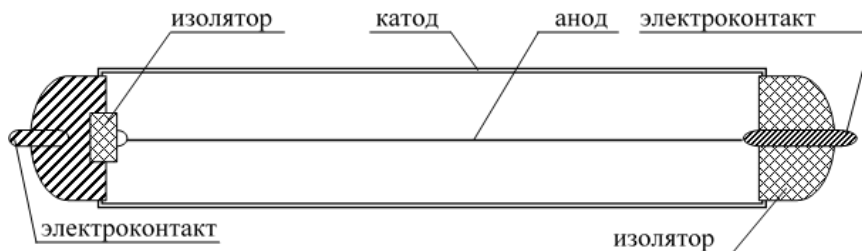


Рис. 13.1. Конструкция газоразрядного счетчика

В газоразрядных счетчиках (в противоположность ионизационным камерам) внутренний электрод (нить) является анодом. Это объясняется тем, что возле внутреннего электрода наблюдается максимальная напряженность электрического поля. Следовательно, свободные электроны в этой области будут приобретать большие скорости. В ионизационной камере стремятся избежать ударной ионизации. Поэтому у них «плюс» источника питания подключают к внешнему электроду. В этом случае электроны летят от центра к периферии и разгоняются не так сильно. В газоразрядном счетчике, наоборот, стремятся облегчить ударную ионизацию, поэтому у них «плюс» источника питания подают на центральный электрод. Тогда электроны, летящие к нему, разгоняются в более напряженном электрическом поле и обретают большую скорость.

13.2 Условие возникновения ударной ионизации

Условием ударной ионизации является соотношение:

$$q_e \cdot (U_1 - U_2) \geq I_{\text{ион}}, \quad (13.1)$$

где q_e – заряд электрона, Кл;

$I_{\text{ион}}$ – энергия ионизации атомов газа-наполнителя, Дж;

$(U_1 - U_2)$ – разность потенциалов в точках начала и конца пути электрона, В:

$$U_1 - U_2 = \lambda E, \quad (13.2)$$

где λ – длина свободного пробега, см;

E – напряженность поля, В/см.

Тогда

$$\lambda_e \cdot E \cdot q_e = I_{ион}. \quad (13.3)$$

Длина свободного пробега:

$$\lambda_e = \frac{4}{\pi \cdot d^2 \cdot Z}, \quad (13.4)$$

где d – диаметр молекулы;

Z – число молекул в единице объема:

$$Z = \frac{P_{атм}}{kT}, \quad (13.5)$$

где $P_{атм}$ – давление, Па;

T – температура, К;

k – константа Больцмана, Дж/К ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К).

$$\lambda_e = \frac{4kT}{\pi \cdot d^2 \cdot P_{атм}}. \quad (13.6)$$

Подставим все полученные выражения в условия ударной ионизации для расчета минимальной напряженности:

$$E_{\min} = \frac{I_{ион} \cdot \pi \cdot d^2 \cdot P_{атм}}{4kT \cdot q_e}. \quad (13.7)$$

Данное соотношение и отражает **условие возникновения ударной ионизации**. Напряженность электрического поля, при котором начнется процесс ударной ионизации, зависит от температуры и давления (все остальные составляющие являются характеристиками газа-наполнителя и для конкретного счетчика будут константами).

Напряженность электрического поля в газоразрядном счетчике распределена между электродами неравномерно (рис. 13.2). Вблизи анода существует область ударной ионизации, ограниченная величиной $E_{\min}^+$. По мере приближения от границы этой области к аноду напряженность поля растет.

Рассчитать напряженность поля в любой точке цилиндрического счетчика можно по формуле:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_{\kappa}}{r_a}}, \quad (13.8)$$

где U – разность потенциалов между анодом и катодом, В;
 r_k – внутренний радиус катода, см;
 r_a – радиус анода, см;
 r – расстояние от оси анода до точки вычисления напряженности, см;
 E – напряженность электрического поля, В/см.

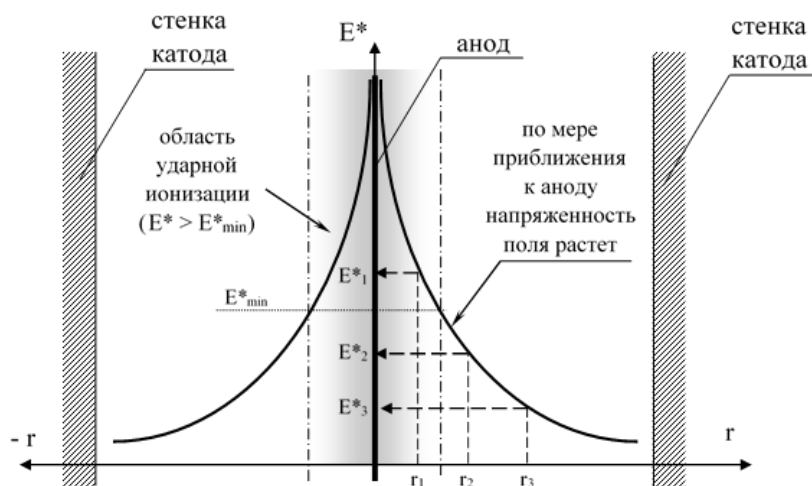


Рис. 13.2. Напряженность электрического поля в газоразрядном счетчике

13.3 Коэффициент газового усиления ГРС

Величина импульса напряжения зависит от коэффициента газового усиления. Коэффициент усиления одной лавины будет равен:

$$m = \frac{n_a}{n_0} = e^{-\alpha \cdot l}, \quad (13.9)$$

где n_a – число электронов в лавине, пришедшей на анод;
 n_0 – число первичных электронов, образованных попавшей в счетчик ионизирующей частицей;
 l – длина лавины;
 α – коэффициент ударной ионизации.

Из формулы следует, что коэффициент усиления сильно зависит от длины лавины, но в цилиндрическом счётчике имеется очень малая область ионизации и все длины примерно одинаковы. Однако одно-лавинный процесс проходит редко. Положительные ионы разряжаясь на катоде могут создавать вторичные лавины.

Вероятность рождения вторичного электрона определяется коэффициентом фотоионизации (поверхностной ионизации):

$$\gamma = \frac{n_e}{n_{\text{ион}}} \approx 10^{-4} \div 10^{-8}. \quad (13.10)$$

Тогда число электронов на аноде:

$n_a = n_0 m + n_0 m \gamma m + \dots$ – сумма убывающей геометрической прогрессии,

$$n_a = n_0 \cdot \frac{m}{1 - \gamma \cdot m}. \quad (13.11)$$

Тогда коэффициент полного газового усиления:

$$M = \frac{n_a}{n_0} = \frac{m}{1 - \gamma \cdot m}. \quad (13.12)$$

Амплитуда импульса напряжения на выходе счетчика:

$$\Delta U = \frac{Q}{C_{сч}} = \frac{q_e \cdot n_0 \cdot M}{C_{сч}}, \quad (13.13)$$

где q_e – заряд электрона, Кл;

n_0 – начальная ионизация, пар ионов;

C – электрическая емкость счетчика, Ф.

13.4 Форма импульса напряжения ГРС

Во времени t_0 в ГРС попала частица, образовались электроны, которые дрейфуют в область ударной ионизации (рис. 13.3). За это время напряжение не падает. При попадании в область ударной ионизации идёт разряжение счётчика. С $t = 10^{-7}$ напряжение падает. Так идёт процесс, если R_n бесконечно.

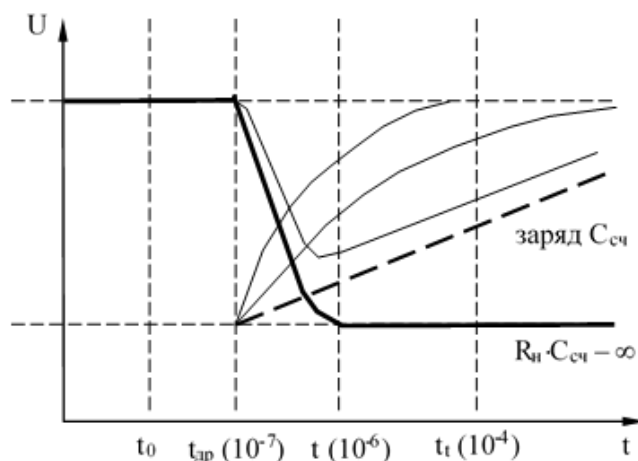


Рис. 13.3. Импульс напряжения газоразрядного счетчика

Спад идёт по экспоненте:

$$U = U_0 \cdot e^{-R_n C_{сч}}. \quad (13.14)$$

Реально R_n не бесконечно и одновременно идёт процесс заряда ёмкости:

$$U = (U_0 - \Delta U) \cdot (1 - e^{-R_n C_{сч}}). \quad (13.15)$$

Чем меньше R_n , тем меньше длительность импульсов, быстрее восстанавливается напряжение, вместе с тем уменьшается амплитуда. Если дальше уменьшать нагрузку, то длительность не уменьшается. Оптимальная ($R_n \cdot C_{сч} = 10^{-4}$ с) нагрузка счётчика 1 – 2 МОм.

13.4.1 Временные характеристики счётчика

Некоторое время после попадания частицы счётчик не чувствителен к новым частицам, т.к. напряжение упало и не вызывается возникновение лавин. Это время называется **мёртвым временем счётчика** t_m (рис. 13.4).

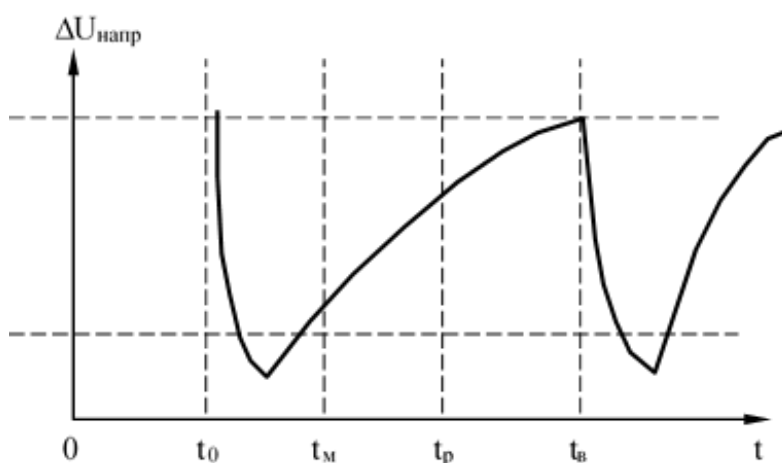


Рис. 13.4. Временные характеристики газоразрядного счетчика

Некоторое время после t_m амплитуда новых импульсов мала, и они не регистрируются счётной схемой, это **время разрешения счётчика** (t_p). Это приводит к просчётам счётчика, он некоторое время не чувствителен. Если на счётчик падает n_0 импульсов в секунду, то он будет нечувствителен 0,01 с.

Интервал времени от начала разряда до момента, когда амплитуда ближайшего последнего импульса достигает первоначального значения, называется **временем восстановления счётчика** ($t_в$).

Число зарегистрированных импульсов будет связано с числом частиц, попавших в счетчик, следующим соотношением:

$$n_0 = \frac{n_{сч}}{1 - n_{сч} \cdot t_p}, \quad (13.16)$$

где n_0 – число импульсов на электродах счетчика;

$n_{сч}$ – число частиц, попавших в счетчик;

t_p – время разрешения счетчика (определяется экспериментально).

Разрешающее время счетчика можно определить с помощью двух радиоактивных препаратов. Способ основан на сравнении скорости счета импульсов при измерении двух препаратов одновременно с суммой скоростей счета от каждого препарата в отдельности:

$$n_{01} = \frac{n_{сч1}}{1 - n_{сч1} \cdot t_p}, \quad (13.17)$$

$$n_{02} = \frac{n_{сч2}}{1 - n_{сч2} \cdot t_p}, \quad (13.18)$$

$$n_{012} = \frac{n_{сч12}}{1 - n_{сч12} \cdot t_p}, \quad (13.19)$$

$$n_{012} = n_{01} + n_{02}. \quad (13.20)$$

Формула для нахождения разрешающего времени счётчика:

$$t_p = \frac{n_{сч1} + n_{сч2} - n_{сч12}}{2 \cdot n_{сч1} \cdot n_{сч2}}. \quad (13.21)$$

13.5 Счётная характеристика газоразрядного счётчика

Счетная характеристика – это зависимость скорости счета от напряжения питания счетчиков при постоянной мощности дозы (рис. 13.5).

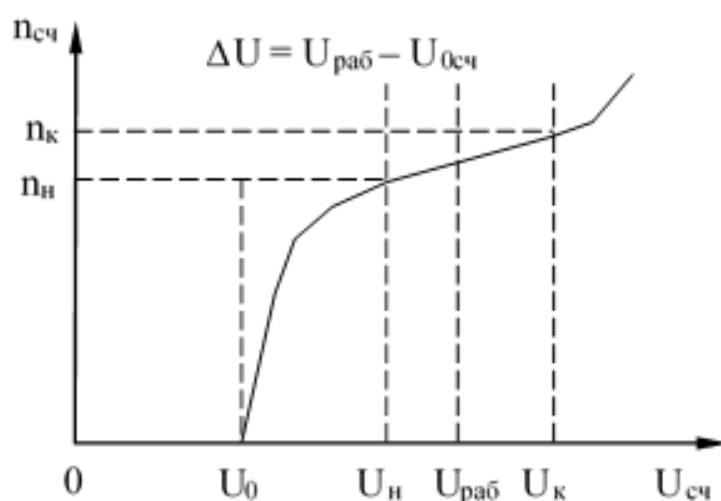


Рис. 13.5. Счетная характеристика

Характеристика снимается для определения пригодности счётчика. Счётчик считается пригодным к работе если:

– ширина плато:

$$U_K - U_H \geq 100 \text{ В}, \quad (13.22)$$

– наклон плато:

$$\Delta n = \frac{2 \cdot (n_K - n_H)}{(n_K + n_H) \cdot (U_K - U_H)} \cdot 100\% \geq 0,1 \frac{\%}{\text{В}} \quad (13.23)$$

где n_K, n_H – скорости счета импульсов, соответствующие точкам конца и начала плато счетной характеристики,
 U_K, U_H – напряжения конца и начала плато.

13.6 Эффективность и чувствительность газоразрядных счётчиков

Чувствительностью счётчика называется отношение изменения скорости счета к вызывающему его изменению мощности дозы излучения:

$$\eta = \frac{n_{сч}}{P_\gamma}. \quad (13.24)$$

Прежде всего, следует отметить, что скорость счета зависит от эффективности.

Эффективностью газоразрядного счётчика называется отношение числа зарегистрированных частиц, выраженных в процентах, к числу частиц (фотонов) данного вида излучения, попавших на рабочую поверхность счётчика:

$$\varepsilon = \frac{n_{сч}}{\Phi_n} \cdot 100\%, \quad (13.25)$$

где Φ_n – поток частиц (фотонов) через рабочую поверхность счётчика, 1/с;

$n_{сч}$ – скорость счета импульсов, имп/с;

ε – эффективность счётчика к данному виду излучения, %.

Таким образом, эффективность газоразрядного счётчика показывает ту долю от общего числа частиц или фотонов, попавших в счётчик, которая будет зарегистрирована.

Эффективность ГРС:

$$\varepsilon = (1 - e^{-\mu_K \cdot h_K}), \quad (13.26)$$

где h – толщина стенки камеры (катода счётчика), см;

μ_k – линейный коэффициент ослабления для материала стенки (катода счётчика), см^{-1} .

Поток гамма-квантов Φ_n :

$$\Phi_n = \varphi_\gamma \cdot S, \quad (13.27)$$

где φ_γ – плотность потока γ -квантов,

S – рабочая поверхность счётчика, см^2 .

Из двух этих формул следует, что скорость счета равна:

$$n_{сч} = \varepsilon \cdot \varphi_\gamma \cdot S \text{ имп/с.} \quad (13.28)$$

Рабочая поверхность счётчика:

$$S = d \cdot l. \quad (13.29)$$

Выражая из формулы (11.30) плотность потока гамма-квантов, получают следующую формулу для скорости счета:

$$n_{сч} = \frac{\varepsilon \cdot S}{E_\gamma \cdot \mu_{ng}} \cdot \frac{\omega_\varepsilon}{q_e} \cdot P_\gamma \text{ имп/с.} \quad (13.30)$$

Для несистемных единиц взяв P_γ в Р/ч будем иметь:

$$n_{сч} = \frac{\varepsilon \cdot S [\text{см}^2] \cdot 34 \cdot 10^{-6} [\text{МэВ}] \cdot 2,58 \cdot 10^{-7} \cdot P_\gamma [\text{Кл/Г}]}{E_\gamma [\text{МэВ}] \cdot \mu_{ng} [\text{см}^2/\text{Г}] \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}] \cdot 3600 [\text{с}]} = 1,5 \cdot 10^4 \cdot \frac{\varepsilon \cdot S}{E_\gamma \cdot \mu_{ng}} \cdot P_\gamma \text{ имп/с.}$$

Таким образом чувствительность газоразрядного счётчика:

$$\eta = \frac{n_{сч}}{P_\gamma} = 1,5 \cdot 10^4 \cdot \frac{\varepsilon \cdot S}{E_\gamma \cdot \mu_{ng}}. \quad (13.31)$$

Для малых энергий в приведённую выше формулу чувствительности нужно ввести ослабление катодом счётчика:

$$\frac{n_{сч}}{P_\gamma} = 1,5 \cdot 10^4 \cdot \frac{\varepsilon \cdot S}{E_\gamma \cdot \mu_{ng}} \cdot e^{-\mu_k h_k}. \quad (13.32)$$

13.7 Зависимость чувствительности от энергии γ -квантов

Как и ионизационная камера, газоразрядный счетчик проектируется для образцовой энергии $E_{\gamma обр}$, а реально измеряют при других энергиях $E_{\gamma x}$.

ЭЗЧ – это отношение чувствительности при некоторой энергии X и чувствительности при образцовой энергии:

$$\text{ЭЗЧ} = \frac{\left(\frac{n_{\text{сч}}}{P_{\gamma}} \right)_X}{\left(\frac{n_{\text{сч}}}{P_{\gamma}} \right)_{\text{обр}}} . \quad (13.33)$$

Исходя из формулы для чувствительности получаем ЭЗЧ ГРС:

$$\text{ЭЗЧ} = \frac{(1 - e^{-\mu_{\text{КХ}} h_{\text{К}}}) \cdot E_{\gamma} \cdot \mu_{\text{нвз}} \cdot e^{-\mu_{\text{КХ}} h_{\text{К}}}}{(1 - e^{-\mu_{\text{КЭ}} h_{\text{К}}}) \cdot E_{\gamma\text{х}} \cdot \mu_{\text{нвх}} \cdot e^{-\mu_{\text{КЭ}} h_{\text{К}}}} , \quad (13.34)$$

где $\mu_{\text{нв}}$ –коэффициент передачи энергии в воздухе, см²/г.

Чтобы уменьшить погрешность за счёт ЭЗЧ применяют фильтр, а если нужно сохранить диапазон энергий, то фильтр с отверстиями. ЭЗЧ в таком случае пересчитывают по формулам (12.29) и (12.30) соответственно.

Кардинально решает проблему ЭЗЧ переход к пропорциональному режиму работы счётчика.

13.8 Рабочая характеристика газоразрядного счётчика.

Нагрузочной (рабочей) характеристикой газоразрядного счетчика называется зависимость скорости счета от мощности дозы излучения при постоянном напряжении питания (рис. 13.6). Она снимается экспериментально для определения чувствительности счётчика и диапазона измерения.

Рабочим является прямолинейный участок, на нём определяется чувствительность:

$$P_{\gamma} = \frac{n_{\text{сч}}}{\eta} . \quad (13.35)$$

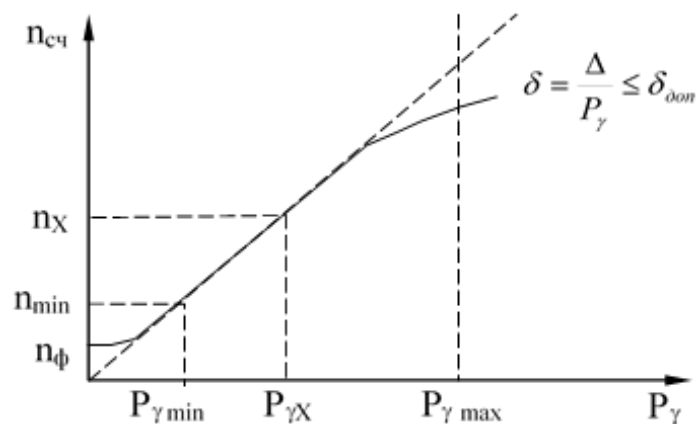


Рис. 13.6. Нагрузочная (рабочая) характеристика ГРС

Отклонение вниз объясняется собственным фоном счётчика (радиоактивные части в материале катода). Отклонение от линейности в верхней части объясняется наличием разрешающего времени (просчётами). Спад характеристики объясняется тем, что близко по времени попавшая частица даёт импульс малой амплитуды и увеличивает разрешающее время.

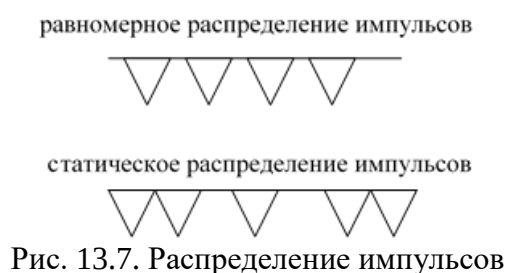
Погрешность из-за разрешающего времени (из-за просчётов) определяет верхний предел измерения $P_{\gamma \max}$:

$$\delta = n_{\text{сч}} \cdot t_p < \delta_{\text{дон}}. \quad (13.36)$$

$$n_{\text{сч} \max} = \frac{\delta_{\text{дон}}}{t_p}, \quad (13.37)$$

$$P_{\gamma \max} = \frac{n_{\text{сч} \max}}{\eta}. \quad (13.38)$$

Нижний предел определяет погрешность за счёт статического характера радиоактивного распада (рис. 13.7).



Истинную скорость счёта можно получить только при бесконечном времени измерения.

Теория показывает, что распределение числа импульсов от радиоактивного источника описывается законом Пуассона. Это распределение позволяет определять дисперсию и среднее квадратичное отклонение. При этом среднее квадратичное отклонение будет равно:

$$\sigma = \sqrt{n_{\text{сч}} \cdot t} = \sqrt{N}. \quad (13.39)$$

Относительная погрешность при этом будет равна:

$$\delta = \frac{\sigma}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}} = \frac{1}{\sqrt{n_{\text{сч}} \cdot t}}. \quad (13.40)$$

Источником погрешности может быть также фон, тогда картина усложняется.

Суммарная погрешность нескольких источников будет равна:

$$\delta_{\Sigma} = \sqrt{\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots \delta_m^2}. \quad (13.41)$$

Нижний предел определяется минимальной достоверно измеряемой скоростью счёта:

$$n_{\text{сч min}} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot n_{\phi} \cdot \delta^2 \cdot t_{\text{изм}}}}{2 \cdot \delta^2 \cdot t_{\text{изм}}}, \quad (13.42)$$

$$n_{\text{сч min}} = \frac{1}{\delta^2 \cdot t_{\text{изм}}}, \quad (13.43)$$

$$P_{\gamma \text{ min}} = \frac{n_{\text{сч min}}}{\eta}. \quad (13.44)$$

Из формулы (13.47) следует, что уменьшить $P_{\gamma \text{ min}}$ можно увеличением времени измерения, уменьшив собственный фон счётчика, или увеличив в разумных пределах погрешность измерения.

Пример решения задач

Пример 13.1. Рассчитать радиус области ударной ионизации в цилиндрическом газоразрядном счетчике при напряжении на его электродах $U = 2000$ В, если радиус катода $r_k = 0,5$ см, радиус анода $r_a = 0,005$ см. Счетчик наполнен аргоном, энергия ионизации аргона $I_{\text{ион}} = 15,75$ эВ. Длина свободного пробега электрона $\lambda_0 = 1,1 \cdot 10^{-4}$ см.

Решение

Дано:

$$U = 2000 \text{ В}$$

$$r_k = 0,5 \text{ см}$$

$$r_a = 0,005 \text{ см}$$

$$I_{\text{ион}} = 15,75 \text{ эВ}$$

$$\lambda_0 = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ см}$$

$$r - ?$$

1. Определяют напряженность электрического поля:

$$\lambda_e \cdot E \cdot q_e = I_{\text{ион}},$$

$$E = \frac{I_{\text{ион}}}{\lambda_e \cdot q_e}.$$

Т.к. $1 \text{ эВ} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ и $q_e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, то:

$$E = \frac{15,75 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}}{1,1 \cdot 10^{-4} \cdot 1,602 \cdot 10^{-19}} = \frac{15,75}{1,1 \cdot 10^{-4}} = 1,43 \cdot 10^5 \text{ В/см.}$$

3. Определяют радиус области ударной ионизации:

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{r_k}{r_a}},$$

$$r = \frac{U}{E \cdot \ln \frac{r_k}{r_a}},$$

$$r = \frac{2000}{1,43 \cdot 10^5 \cdot \ln \frac{0,5}{0,005}} = 3,04 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$$

Ответ: $r = 3,04 \cdot 10^{-3}$ см.

Пример 13.2. Чему равна нижняя граница диапазона измерения газоразрядного счетчика, если собственный фон его 0,2 имп/с чувствительность 1 (имп/с)/(мкР/ч), время измерения 1 мин, а допустимая погрешность $\pm 20\%$?

Решение

Дано:

$$n_\phi = 0,2 \text{ имп/с}$$

$$\eta = 1 \text{ (имп/с)/(мкР/ч)}$$

$$t_{изм} = 1 \text{ мин} = 60 \text{ с}$$

$$\delta = 20\% = 0,2$$

$$P_{\gamma \min} = ?$$

1. Определяют минимальную достоверно измеряемую скорость счёта:

$$n_{сч \min} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot n_\phi \cdot \delta^2 \cdot t_{изм}}}{2 \cdot \delta^2 \cdot t_{изм}},$$

$$n_{сч \min} = \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \cdot 0,2 \cdot 0,2^2 \cdot 60}}{2 \cdot 0,2^2 \cdot 60} = 0,564 \text{ имп/с.}$$

2. Определяют нижнюю границу диапазона измерения:

$$P_{\gamma \min} = \frac{n_{сч \min}}{\eta},$$

$$P_{\gamma \min} = \frac{0,564}{1} = 0,564 \text{ мкР/ч.}$$

Ответ: $P_{\gamma \min} = 0,564$ мкР/ч.

Пример 13.3. Рассчитать максимальную амплитуду импульса напряжения на электродах газоразрядного счетчика, если начальная ионизация составляет $n_0 = 4 \cdot 10^3$ пар ионов, емкость выходной цепи счетчика $C = 40$ пФ, коэффициент газового усиления за счет ударной ионизации $m = 2 \cdot 10^4$, коэффициент фотоионизации $\gamma = 10^{-6}$.

Решение

Дано:

$$n_0 = 4 \cdot 10^3$$

$$C = 40 \text{ пФ} = 40 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$$

$$m = 2 \cdot 10^4$$

$$\gamma = 10^{-6}$$

1. Определяют коэффициент полного газового усиления:

$$M = \frac{m}{1 - \gamma \cdot m},$$

$\Delta U - ?$

$$M = \frac{2 \cdot 10^4}{1 - 10^{-6} \cdot 2 \cdot 10^4} = 2,04 \cdot 10^4.$$

2. Определяют максимальную амплитуду импульса напряжения:

$$\Delta U = \frac{q_e \cdot n_0 \cdot M}{C_{сч}},$$

$$\Delta U = \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 10^3 \cdot 2,04 \cdot 10^4}{40 \cdot 10^{-9}} = 3,27 \cdot 10^{-4} \text{ В.}$$

Ответ: $\Delta U = 3,27 \cdot 10^{-4} \text{ В.}$

Контрольные задания

1. Рассчитать напряженность электрического поля, необходимую для возникновения ударной ионизации в газоразрядном счетчике с газовым наполнением аргоном, если энергия ионизации газа 15,75 эВ, а длина свободного пробега электрона $2,2 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$

2. Рассчитать напряженность электрического поля, необходимую для возникновения ударной ионизации в газоразрядном счетчике с газовым наполнением неоном, если энергия ионизации газа 21,56 эВ, а длина свободного пробега электрона $2,94 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$

3. Рассчитать напряженность электрического поля, необходимую для возникновения ударной ионизации в газоразрядном счетчике с газовым наполнением парами воды, если энергия ионизации пара 13,614 эВ, а длина свободного пробега электрона $6 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$

4. Рассчитать напряженность электрического поля, необходимую для возникновения ударной ионизации в газоразрядном счетчике с газовым наполнением водородом, если энергия ионизации газа 13,595 эВ, а длина свободного пробега электрона $3,14 \cdot 10^{-3} \text{ см.}$

5. Рассчитать напряженность электрического поля, необходимую для возникновения ударной ионизации в газоразрядном счетчике с газовым наполнением гелием, если энергия ионизации газа 24,58 эВ, а длина свободного пробега электрона $5,35 \cdot 10^{-4} \text{ см.}$

6. Чему равна напряженность поля в цилиндрическом газоразрядном счетчике на расстоянии 0,5 мм от центра анода, если диаметр катода – 10 мм, а диаметр анода 0,1 мм, напряжение питания – 400 В?

7. Чему равна напряженность поля на расстоянии 1,5 мм от центра анода, если диаметр катода – 3 мм, диаметр анода 0,2 мм, а напряжение питания – 500 В.

8. Определить чувствительность счетчика, если он на расстоянии 1 м от источника ^{60}Co активность 3 мКи показал скорость счета 200 имп/с.

9. Определить чувствительность счетчика, если он на расстоянии 0,5 м от источника ^{60}Co активностью 30 МБк показал скорость счета 100 имп/с.

10. Определить чувствительность счетчика, если он на расстоянии 20 см от источника ^{137}Cs активностью 10 МБк дал 1200 имп за 10 мин.

11. Рассчитать радиус области ударной ионизации в цилиндрическом газоразрядном счетчике при напряжении на его электродах $U = 2500$ В, если радиус катода $r_k = 0,3$ см, радиус анода $r_a = 0,02$ см. Счетчик наполнен аргоном, энергия ионизации аргона $I_{\text{ион}} = 15,75$ эВ. Длина свободного пробега электрона $\lambda_0 = 2,2 \cdot 10^{-4}$ см.

12. Рассчитать радиус области ударной ионизации в цилиндрическом газоразрядном счетчике при напряжении на его электродах $U = 2800$ В, если радиус катода $r_k = 1$ см, радиус анода $r_a = 0,01$ см. Счетчик наполнен водородом, энергия ионизации водорода $I_{\text{ион}} = 13,595$ эВ. Длина свободного пробега электрона $\lambda_0 = 3,14 \cdot 10^{-3}$ см.

13. Рассчитать радиус области ударной ионизации в цилиндрическом газоразрядном счетчике при напряжении на его электродах $U = 3000$ В, если радиус катода $r_k = 0,5$ см, радиус анода $r_a = 0,015$ см. Счетчик наполнен метаном, энергия ионизации метана $I_{\text{ион}} = 6,65$ эВ. Длина свободного пробега электрона $\lambda_0 = 2,94 \cdot 10^{-4}$ см.

14. Рассчитать радиус области ударной ионизации в цилиндрическом газоразрядном счетчике при напряжении на его электродах $U = 1000$ В, если радиус катода $r_k = 0,5$ см, радиус анода $r_a = 0,005$ см. Счетчик наполнен гелием, энергия ионизации гелия $I_{\text{ион}} = 24,58$ эВ. Длина свободного пробега электрона $\lambda_0 = 5,35 \cdot 10^{-4}$ см.

15. Рассчитать радиус области ударной ионизации в цилиндрическом газоразрядном счетчике при напряжении на его электродах $U = 3560$ В, если радиус катода $r_k = 0,5$ см, радиус анода $r_a = 0,02$ см. Счетчик наполнен парами воды, энергия ионизации пара $I_{\text{ион}} = 13,614$ эВ. Длина свободного пробега электрона $\lambda_0 = 6 \cdot 10^{-4}$ см.

16. Рассчитать максимальную амплитуду импульса напряжения на электродах газоразрядного счетчика, если начальная ионизация составляет $n_0 = 10^3$ пар ионов, емкость выходной цепи счетчика $C = 48$ пФ, коэффициент газового усиления за счет ударной ионизации $m = 10^5$, коэффициент фотоионизации $\gamma = 10^{-6}$.

17. Рассчитать максимальную амплитуду импульса напряжения на электродах газоразрядного счетчика, если начальная ионизация составляет $n_0 = 10^3$ пар ионов, емкость выходной цепи счетчика $C = 32$ пФ, коэффициент газового усиления за счет ударной ионизации $m = 2 \cdot 10^5$, коэффициент фотоионизации $\gamma = 10^{-6}$.

18. Рассчитать максимальную амплитуду импульса напряжения на электродах газоразрядного счетчика, если начальная ионизация составляет

$n_0 = 2 \cdot 10^3$ пар ионов, емкость выходной цепи счетчика $C = 50$ пФ, коэффициент газового усиления за счет ударной ионизации $m = 5 \cdot 10^5$, коэффициент фотоионизации $\gamma = 10^{-6}$.

19. Рассчитать максимальную амплитуду импульса напряжения на электродах газоразрядного счетчика, если начальная ионизация составляет $n_0 = 5 \cdot 10^4$ пар ионов, емкость выходной цепи счетчика $C = 50$ пФ, коэффициент газового усиления за счет ударной ионизации $m = 5 \cdot 10^4$, коэффициент фотоионизации $\gamma = 10^{-6}$.

20. Рассчитать максимальную амплитуду импульса напряжения на электродах газоразрядного счетчика, если начальная ионизация составляет $n_0 = 5 \cdot 10^4$ пар ионов, емкость выходной цепи счетчика $C = 43$ пФ, коэффициент газового усиления за счет ударной ионизации $m = 4 \cdot 10^4$, коэффициент фотоионизации $\gamma = 10^{-6}$.

21. Чему равна нижняя граница диапазона измерения газоразрядного счетчика, если чувствительность его 1 (имп/с)/(мкР/ч), время измерения 100 с, собственный фон – $0,1$ имп/с, а допустимая погрешность ± 30 %.

22. Чему равна нижняя граница диапазона измерения газоразрядного счетчика, если собственный фон счетчика 1 имп/мин, время измерения 10 мин, допустимая погрешность ± 20 %, а чувствительность 1 (имп/с)/(мкР/ч)?

23. Чему равна минимальная достоверно измеренная скорость счета газоразрядного счетчика, если время измерения 3 мин, собственный фон счетчика $0,15$ имп/с, а допустимая погрешность ± 10 %?

24. Чему равна минимальная, достоверно измеряемая скорость счета газоразрядного счетчика, если время измерения 100 с, собственный фон счетчика $0,5$ имп/с, а допустимая погрешность ± 30 %.

25. Чему равна минимальная, достоверно измеряемая скорость счета газоразрядного счетчика, если время измерения – 10 мин, собственный фон счетчика $0,2$ имп/с, а допустимая погрешность ± 10 %.

26. Какова должна быть скорость счета газоразрядного счетчика, чтобы при измерении в течении 1 минуты погрешность не превышала ± 10 %.

27. Какова должна быть минимальная скорость счета у газоразрядного счетчика, чтобы при времени измерения 100 с погрешность не превысила бы ± 5 %.

28. Какова должна быть скорость счета газоразрядного счетчика, чтобы при измерении в течении 50 с погрешность не превышала ± 30 %?

29. Сколько импульсов необходимо набрать за время измерения, чтобы погрешность не превышала бы ± 10 %.

30. Сколько импульсов необходимо набрать за время измерения, чтобы погрешность измерения была меньше, чем ± 30 %.

14 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СЦИНТИЛЛЯЦИОННОГО СЧЕТЧИКА

14.1 Характеристики сцинтилляторов

Сцинтилляционный счётчик – прибор для регистрации ядерных излучений и элементарных частиц (протонов, нейтронов, электронов, γ -квантов, мезонов и т.д.), основными элементами которого являются вещество, люминесцирующее под действием заряженных частиц (сцинтиллятор), и фотоэлектронный умножитель (ФЭУ).

Существует **ряд основных характеристик**, которые позволяют количественно оценить свойства того или иного сцинтиллятора. К их числу относятся:

1. **Конверсионная эффективность** – отношение энергии световой вспышки (E_ϕ) к энергии, потерянной ионизирующей частицей в сцинтилляторе (ΔE):

$$\eta_k = \frac{E_\phi}{\Delta E} \cdot 100\% . \quad (14.1)$$

Конверсионная эффективность сцинтилляторов обычно находится в пределах 1 – 30 %.

2. **Техническая эффективность** – отношение суммарной энергии всех фотонов сцинтилляции, прошедших через выходное окно сцинтиллятора (E_ϕ'), к энергии ионизирующей частицы, оставленной ею в сцинтилляторе (ΔE):

$$\eta_m = \frac{E_\phi'}{\Delta E} \cdot 100\% . \quad (14.2)$$

3. **Коэффициентом светособирания** – соотношение технической и конверсионной эффективности для одного и того же сцинтиллятора:

$$\tau^* = \frac{\eta_m}{\eta_k} . \quad (14.3)$$

4. **Постоянная времени высвечивания** – определяет спад интенсивности вспышки с течением времени:

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} , \quad (14.4)$$

где I_0 – интенсивность вспышки в начальный момент;

I – интенсивность вспышки через время t ;

τ – постоянная времени высвечивания.

В качестве сцинтилляторов используются различные вещества (твёрдые, жидкие, газообразные). Сцинтиллятор может быть органическим (кристаллы, пластики или жидкости) или неорганическим (кристаллы или стекла). Используются также газообразные сцинтилляторы.

Органические сцинтилляторы более быстрые, т.к. в органических механизм более быстрый и время высвечивания $\tau \approx 10^{-6} - 10^{-8}$ с. Однако у неорганических более высокий атомный номер, поэтому более высокий коэффициент передачи энергии и потому более высокая конверсионная эффективность. И потому более высокая амплитуда импульса.

Виды и характеристики неорганических и органических сцинтилляторов приведены в Приложениях М и Н соответственно.

14.2 Характеристики фотоэлектронных умножителей

Основными характеристиками ФЭУ являются:

1. **Квантовый выход фотокатода** – отношение числа выбитых с фотокатода электронов ($n_{\phi\epsilon}$) к числу фотонов, упавших на фотокатод (n_{ϕ}) за то же время:

$$C_{\beta} = \frac{n_{\phi\epsilon}}{n_{\phi}}. \quad (14.5)$$

Часть света, воспринимаемого ФЭУ, отражается, а часть проходит через фотокатод без взаимодействия. Кроме того, не все кванты, поглощенные фотокатодом, вызывают фотоэлектронную эмиссию. Некоторые из них лишь возбуждают атомы вещества. Все это приводит к тому, что максимальное значение квантового выхода для большинства существующих ФЭУ не превышает 20 – 30 %. Поэтому в практических расчетах, если точно неизвестен квантовый выход для данной длины волны, можно пользоваться ориентировочным значением 10 %.

2. **Интегральная катодная чувствительность** – отношение катодного тока I_k к световому потоку, падающему на фотокатод Φ_k :

$$S_k = \frac{I_k}{\Phi_k} \text{ мкА/лм}. \quad (14.6)$$

3. **Коэффициент электронного усиления** – количественная характеристика ФЭУ, которая показывает эффективность вторичной эмиссионной системы умножения. Он представляет собой отношение числа электронов, собранных на аноде (n_a) к числу фотоэлектронов, ушедших с фотокатода ($n_{\phi\epsilon}$):

$$M = \frac{n_a}{n_{фэ}}. \quad (14.7)$$

Величина этого коэффициента зависит от конструкции ФЭУ и напряжения его питания:

$$M = K_0 \cdot U^m \quad (14.8)$$

где m – число динодов ФЭУ;

U – напряжение питания;

K_0 – постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей ФЭУ.

4. Интегральная анодная чувствительность – отношение анодного тока I_a к падающему на фотокатод световому потоку Φ_κ :

$$S_a = \frac{I_a}{\Phi_\kappa} \text{ мкА/лм}, \quad (14.9)$$

$$S_a = S_\kappa \cdot M \text{ мкА/лм}. \quad (14.10)$$

На практике обычно измеряют интегральные чувствительности, а по их отношению определяют коэффициент электронного усиления при данном напряжении питания.

14.3 Зависимость выходного сигнала ФЭУ от энергии регистрируемого излучения

Амплитуда выходного сигнала ФЭУ обладает функциональной зависимостью от энергии регистрируемого излучения.

Рассмотрим процессы преобразования энергии в сцинтилляционном датчике. Пусть на сцинтиллятор падает частица с энергией E . Некоторая часть этой энергии ΔE поглотится в сцинтилляторе:

$$\Delta E = a \cdot E, \quad (14.11)$$

$$a = \frac{h_{сц}}{R_\kappa} \leq 1, \quad (14.12)$$

где a – безразмерный коэффициент, показывающий степень поглощения энергии частицы в сцинтилляторе;

$h_{сц}$ – толщина сцинтиллятора;

R_κ – пробег частицы в сцинтилляторе.

Часть этой энергии превратится в энергию фотонов. Эта часть определяется конверсионной эффективностью сцинтиллятора:

$$E_{\phi} = \Delta E \cdot \eta_{\kappa} = a \cdot E \cdot \eta_{\kappa}. \quad (14.13)$$

Каждый сцинтиллятор имеет определённую длину волны и, следовательно, энергию фотона:

$$E_{\lambda} = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (14.14)$$

где h – постоянная Планка ($4,21 \cdot 10^{-15}$ эВ·с);

c – скорость света в вакууме ($3 \cdot 10^8$ м/с);

λ – средняя длина волны фотонов, испускаемых сцинтиллятором, м.

Число фотонов:

$$n_{\phi} = E_{\phi} \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} = a \cdot E \cdot \eta_{\kappa} \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c}. \quad (14.15)$$

Из них часть достигнет фотокатода, при этом учитывается коэффициент светособираания τ^* :

$$n_{\phi} = a \cdot E \cdot \eta_{\kappa} \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot \tau^*. \quad (14.16)$$

Некоторые из фотонов, упавших на фотокатод, вызовут электронную эмиссию. Число фотоэлектронов, рождаемых вследствие этого процесса, зависит от квантового выхода фотокатода C_{β} :

$$n_{\phi\epsilon} = n_{\phi} \cdot C_{\beta}. \quad (14.17)$$

Количество электронов, собравшихся после вторичной эмиссии на аноде ФЭУ, будет равно:

$$n_a = n_{\phi\epsilon} \cdot M. \quad (14.18)$$

Отсюда несложно подсчитать суммарный электрический заряд Q , собранный этими электронами на аноде. Для этого нужно число n_a умножить на заряд одного электрона q_e :

$$Q = n_a \cdot q_e, \quad (14.19)$$

$$Q = a \cdot E \cdot \eta_{\kappa} \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot \tau^* \cdot C_{\beta} \cdot M \cdot q_e. \quad (14.20)$$

При практических измерениях удобнее определять не заряд, а амплитуду импульса на выходе датчика. Для этого нужно разделить заряд Q на ёмкость C выходной цепи датчика:

$$\Delta U = \frac{Q}{C} \text{ В}, \quad (14.21)$$

$$\Delta U = a \cdot E \cdot \eta_{\kappa} \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c \cdot C} \cdot \tau^* \cdot C_{\beta} \cdot M \cdot q_e \text{ В}. \quad (14.22)$$

Таким образом, амплитуда импульса пропорциональна энергии частицы.

14.4 Импульсный (счетный) режим работы сцинтилляционного счетчика

Чувствительность в счетном режиме может быть определена как отношение средней частоты импульсов (скорости счета) на выходе ФЭУ к мощности дозы излучения.

Найдем зависимость двух этих величин применительно к гамма-излучению. Рассмотрим цилиндрический сцинтиллятор с поперечным сечением S и высотой H , который равномерно облучается потоком моноэнергетических гамма-квантов, падающих нормально к его торцевой поверхности. Проходя через толщу сцинтиллятора, поток квантов ослабляется вследствие взаимодействия с веществом.

После прохождения через весь кристалл плотность потока квантов будет составлять:

$$\varphi_{nH} = \varphi_{n0} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot H}), \quad (14.23)$$

где φ_{n0} – плотность потока квантов на входе в сцинтиллятор;

φ_{nH} – плотность потока квантов после прохождения сцинтиллятора;

μ – линейный коэффициент ослабления излучения в сцинтилляторе, м^{-1} .

Эффективность регистрации гамма-квантов сцинтиллятором – относительная доля квантов, претерпевших взаимодействие с веществом сцинтиллятора, будет определяться отношением:

$$\varepsilon = \frac{\varphi_{n0} - \varphi_{nH}}{\varphi_{n0}} = 1 - e^{-\mu \cdot H}. \quad (14.24)$$

Если считать, что каждый гамма-квант, взаимодействующий со сцинтиллятором, вызывает возникновение одной вспышки, то средняя частота импульсов на выходе ФЭУ (скорость счета) будет равна средней частоте этих взаимодействий:

$$n_{сч} = \varphi_{n0} \cdot S \cdot \varepsilon. \quad (14.25)$$

Из формулы связи мощности экспозиционной дозы с плотностью потока связана с соотношением (11.30) следует:

$$\varphi_{n0} = \frac{P_\gamma}{E_\gamma \cdot \mu_{ng}} \cdot \frac{\omega_e}{q_e}. \quad (14.26)$$

В результате получим:

$$n_{cq} = \frac{P_\gamma}{E_\gamma \cdot \mu_{ng}} \cdot \frac{\omega_e}{q_e} \cdot S \cdot (1 - e^{-\mu \cdot H}) \text{ имп/с.} \quad (14.27)$$

Как видно из соотношения скорость счета импульсов на выходе ФЭУ пропорциональна мощности дозы.

Для несистемных единиц взяв $P_\gamma = 1$ Р/ч будем иметь:

$$n_{cq} = \frac{\varepsilon \cdot S [\text{см}^2] \cdot 34 \cdot 10^{-6} [\text{МэВ}] \cdot 2,58 \cdot 10^{-7} \cdot P_\gamma [\text{Кл/Г}]}{E_\gamma [\text{МэВ}] \cdot \mu_{ng} [\text{см}^2/\text{Г}] \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}] \cdot 3600 [\text{с}]} = 1,5 \cdot 10^4 \cdot \frac{\varepsilon \cdot S}{E_\gamma \cdot \mu_{ng}} \cdot P_\gamma \text{ имп/с,}$$

или

$$n_{cq} = 1,5 \cdot 10^4 \cdot \frac{(1 - e^{-\mu \cdot H}) \cdot V}{E_\gamma \cdot \mu_{ng} \cdot H} P_\gamma \text{ имп/с.} \quad (14.28)$$

Нетрудно получить выражение для расчета **чувствительности** в счетном режиме:

$$\eta = \frac{n_{cq}}{P_\gamma} = \frac{S}{E_\gamma \cdot \mu_{ng}} \cdot \frac{\omega_e}{q_e} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot H}). \quad (14.29)$$

Чувствительность сцинтилляционного датчика зависит от энергии гамма-излучения (E_γ) не только в явном виде, но и через другие переменные (μ_n, μ).

ЭЗЧ сцинтилляционного счетчика, как и ЭЗЧ ГРС, определяется по формуле (13.33). Уменьшить ЭЗЧ можно использовав фильтры и фильтры с отверстием. Координально решает вопрос измерение энергии каждого фотона по амплитуде импульса и введением поправки на ЭЗЧ по этой кривой.

14.5 Токовый режим сцинтилляционного счётчика.

В токовом режиме идёт суммирование зарядов импульсов за единицу времени.

Величина заряда, собранного на аноде ФЭУ, пропорциональна величине энергии ионизирующего излучения, поглощенной в сцинтилляторе:

$$Q = E \cdot a \cdot \eta_k \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot \tau^* \cdot C_\beta \cdot M \cdot q_e. \quad (14.30)$$

Если величину заряда и величину энергии отнести к единице времени, то получим зависимость входного тока ФЭУ от величины энергии ΔE ионизирующего излучения, поглощенной в сцинтилляторе в единицу времени:

$$I = \Delta E \cdot a \cdot \eta_{\kappa} \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot \tau^* \cdot C_{\beta} \cdot M \cdot q_e. \quad (14.31)$$

Величины, входящие в данное выражение и независимые от энергии гамма-квантов, можно обозначить одной буквой:

$$A = a \cdot \eta_{\kappa} \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot \tau^* \cdot C_{\beta} \cdot M \cdot q_e, \quad (14.32)$$

$$I = \Delta E \cdot A. \quad (14.33)$$

Плотность потока квантов в глубине сцинтиллятора убывает по экспоненциальному закону:

$$\varphi_n = \varphi_{n0} \cdot (1 - e^{-\mu \cdot x}). \quad (14.34)$$

Следовательно, энергия, поглощенная по всей толщине сцинтиллятора, будет:

$$\Delta E = \int_0^H \varphi_{n0} \cdot E \cdot S \cdot \mu_{nz} \cdot e^{-\mu \cdot x} \cdot dx. \quad (14.35)$$

Вычисляя значение ΔE , получим:

$$\Delta E = \varphi_{n0} \cdot E \cdot S \cdot \mu_{nz} \cdot \int_0^H e^{-\mu \cdot x} d(-\mu \cdot x), \quad (14.36)$$

$$\Delta E = \varphi_{n0} \cdot E \cdot S \cdot \mu_{nz} \cdot \frac{1 - e^{-\mu \cdot H}}{\mu}. \quad (14.37)$$

Зная, что $V = S \cdot H$ получим:

$$\Delta E = \varphi_{n0} \cdot E \cdot V \cdot \mu_{nz} \cdot \frac{1 - e^{-\mu \cdot H}}{\mu \cdot H}. \quad (14.38)$$

Известно, что:

$$\varphi_{n0} \cdot E = \frac{P_{\gamma}}{\mu_{n\epsilon}} \cdot \frac{\omega_{\epsilon}}{q_e}. \quad (14.39)$$

Тогда

$$\Delta E = \frac{\mu_{nz}}{\mu_{ng}} \cdot \frac{\omega_g}{q_e} \cdot V \cdot \frac{1 - e^{-\mu \cdot H}}{\mu \cdot H} \cdot P_\gamma, \quad (14.40)$$

$$I = A \cdot \frac{\mu_{nz}}{\mu_{ng}} \cdot \frac{\omega_g}{q_e} \cdot V \cdot \frac{1 - e^{-\mu \cdot H}}{\mu \cdot H} \cdot P_\gamma. \quad (14.41)$$

Для несистемных единиц взяв P_γ в Р/ч будем иметь:

$$I = 1,5 \cdot 10^4 \cdot A \cdot \frac{\mu_{nz}}{\mu_{ng}} \cdot V \cdot \frac{1 - e^{-\mu \cdot H}}{\mu \cdot H} \cdot P_\gamma. \quad (14.42)$$

Рассмотренные формулы показывают, что здесь нет E_γ в знаменателе и таким образом погрешность за счёт ЭЗЧ меньше. Если взять воздухоэквивалентный сцинтиллятор, то тогда:

$$\frac{\mu_{nz}}{\mu_{ng}} \approx 1,$$

а если взять тонкий сцинтиллятор тогда $\mu \rightarrow 0$ и тогда $\lim_{x \rightarrow 0} e^x = 1 + x$:

$$\frac{1 - e^{-\mu \cdot H}}{\mu \cdot H} \approx 1.$$

Таким образом токовый режим имеет малую погрешность, но и малую чувствительность.

Пример решения задач

Пример 14.1. Определить среднюю частоту следования импульсов на выходе сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором NaI(Tl) цилиндрической формы диаметром $d = 4$ см толщиной $H = 4$ см при облучении γ -излучением мощностью экспозиционной дозы $P_\gamma = 100$ мкР/ч и с энергией γ -квантов $E_\gamma = 0,3$ МэВ, $\mu = 0,55$ см⁻¹, $\mu_{ng} = 0,0308$ см²/г.

Решение

Дано:

$d = 4$ см

$H = 4$ см

$P_\gamma = 100$ мкР/ч = 10^{-4} Р/ч

$E_\gamma = 0,3$ МэВ

$\mu = 0,55$ см⁻¹

$\mu_{ng} = 0,0308$ см²/г

$n_{сч} = ?$

1. Определяют объем сцинтиллятора цилиндрической формы:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot H = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot H,$$

$$V = \frac{3,14 \cdot 4^2}{4} \cdot 4 = 50,24 \text{ см}^3.$$

2. Определяют среднюю частоту следования импульсов:

$$n_{сч} = 1,5 \cdot 10^4 \cdot \frac{(1 - e^{-\mu \cdot H}) \cdot V}{E_\gamma \cdot \mu_{пв} \cdot H} P_\gamma,$$

$$n_{сч} = 1,5 \cdot 10^4 \cdot \frac{(1 - e^{-0,554}) \cdot 50,24}{0,3 \cdot 0,0308 \cdot 4} \cdot 10^{-4} = 1813 \text{ имп/с.}$$

Ответ: $n_{сч} = 1813$ имп/с.

Пример 14.2. Определить амплитуду импульса на выходе ФЭУ сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором ZnS(Ag) при поглощении на нем α -частицы с энергией 5 МэВ. Коэффициент светособирания 0,15, квантовый выход катода 0,05, коэффициент усиления $2 \cdot 10^5$, емкость анода 45 пФ, $a = 0,5$.

Решение

Дано:

$$E = 5 \text{ МэВ} = 5 \cdot 10^6 \text{ эВ}$$

$$\tau^* = 0,15$$

$$C_\beta = 0,05$$

$$M = 2 \cdot 10^5$$

$$C = 45 \text{ пФ} = 45 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$$

$$a = 0,5$$

$$\Delta U - ?$$

1. Из Приложения М выбираем конверсионную эффективность и среднюю длину волны испускаемых квантов:

$$\eta_k = 28 \% = 0,28, \lambda = 450 \text{ нм} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

2. Определяют амплитуду импульса:

$$\Delta U = a \cdot E \cdot \eta_k \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c \cdot C} \cdot \tau^* \cdot C_\beta \cdot M \cdot q_e,$$

$$\Delta U = 0,5 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 0,28 \cdot \frac{4,5 \cdot 10^{-7}}{4,21 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 45 \cdot 10^{-12}} \cdot 0,15 \cdot 0,05 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 1,33 \text{ В.}$$

Ответ: $\Delta U = 1,33 \text{ В.}$

Пример 14.3. Определить мощность поглощенной дозы в веществе сцинтиллятора из трансстильбена ($H = 0,1 \text{ см}$ и $S = 1 \text{ см}^2$) в токовом режиме, если ток составляет 10^{-12} А , коэффициент светособирания 0,2, квантовый выход катода 0,04, коэффициент усиления $2 \cdot 10^5$, $a = 0,6$, $\mu = 1,1 \text{ см}^{-1}$, $\mu_{пв} = 0,028 \text{ см}^2/\text{г}$, $\mu_{пз} = 0,23 \text{ см}^2/\text{г}$.

Решение

Дано:

$$H = 0,1 \text{ см}$$

$$S = 1 \text{ см}^2$$

$$I = 10^{-12} \text{ А}$$

$$\tau^* = 0,2$$

$$C_\beta = 0,04$$

1. Из Приложения Н выбираем конверсионную эффективность и среднюю длину волны испускаемых квантов:

$$\eta_k = 2,5 \% = 0,025, \lambda = 410 \text{ нм} = 4,1 \cdot 10^{-7} \text{ м.}$$

$$M = 2 \cdot 10^5$$

$$a = 0,6$$

$$\mu = 1,1 \text{ см}^{-1}$$

$$\mu_{\text{нв}} = 0,028 \text{ см}^2/\text{г}$$

$$\mu_{\text{нз}} = 0,23 \text{ см}^2/\text{г}$$

$$P_\gamma - ?$$

2. Рассчитывают A :

$$A = a \cdot \eta_\kappa \cdot \frac{\lambda}{h \cdot c} \cdot \tau^* \cdot C_\beta \cdot M \cdot q_e,$$

$$A = 0,6 \cdot 0,025 \cdot \frac{4,1 \cdot 10^{-7}}{4,21 \cdot 10^{-15} \cdot 3 \cdot 10^8} \cdot 0,2 \cdot 0,04 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} = 1,25 \cdot 10^{-18}$$

2. Определяют мощность поглощенной дозы:

$$I = 1,5 \cdot 10^4 \cdot A \cdot \frac{\mu_{\text{нз}}}{\mu_{\text{нв}}} \cdot V \cdot \frac{1 - e^{-\mu \cdot H}}{\mu \cdot H} \cdot P_\gamma = 1,5 \cdot 10^4 \cdot A \cdot \frac{\mu_{\text{нз}}}{\mu_{\text{нв}}} \cdot S \cdot \frac{1 - e^{-\mu \cdot H}}{\mu} \cdot P_\gamma,$$

$$P_\gamma = \frac{I}{1,5 \cdot 10^4 \cdot A \cdot S} \cdot \frac{\mu_{\text{нв}}}{\mu_{\text{нз}}} \cdot \frac{\mu}{1 - e^{-\mu \cdot H}},$$

$$P_\gamma = \frac{10^{-12}}{1,5 \cdot 10^4 \cdot 1,25 \cdot 10^{-18} \cdot 1} \cdot \frac{0,028}{0,23} \cdot \frac{1,1}{1 - e^{-1,1 \cdot 0,1}} = 68,6 \text{ Р/ч.}$$

Ответ: $P_\gamma = 68,6 \text{ Р/ч.}$

Контрольные задания

1. Определить среднюю частоту следования импульсов на выходе сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором NaI(Tl) цилиндрической формы диаметром $d = 3 \text{ см}$ толщиной $H = 3 \text{ см}$ при облучении γ -излучением мощностью экспозиционной дозы $P_\gamma = 160 \text{ мкР/ч}$ и с энергией γ -квантов $E_\gamma = 0,5 \text{ МэВ}$, $\mu = 0,33 \text{ см}^{-1}$, $\mu_{\text{нв}} = 0,032 \text{ см}^2/\text{г}$.

2. Определить среднюю частоту следования импульсов на выходе сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором ZnS(Ag) цилиндрической формы диаметром $d = 4 \text{ см}$ толщиной $H = 3 \text{ см}$ при облучении γ -излучением мощностью экспозиционной дозы $P_\gamma = 300 \text{ мкР/ч}$ и с энергией γ -квантов $E_\gamma = 0,8 \text{ МэВ}$, $\mu = 0,28 \text{ см}^{-1}$, $\mu_{\text{нв}} = 0,0307 \text{ см}^2/\text{г}$.

3. Определить среднюю частоту следования импульсов на выходе сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором CdS(Ag) цилиндрической формы диаметром $d = 3 \text{ см}$ толщиной $H = 4 \text{ см}$ при облучении γ -излучением мощностью экспозиционной дозы $P_\gamma = 500 \text{ мкР/ч}$ и с энергией γ -квантов $E_\gamma = 1 \text{ МэВ}$, $\mu = 0,202 \text{ см}^{-1}$, $\mu_{\text{нв}} = 0,0297 \text{ см}^2/\text{г}$.

4. Определить среднюю частоту следования импульсов на выходе сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором LiI(Sn) цилиндрической формы диаметром $d = 5 \text{ см}$ толщиной $H = 5 \text{ см}$ при облучении γ -излучением мощностью экспозиционной дозы $P_\gamma = 400 \text{ мкР/ч}$ и с энергией γ -квантов $E_\gamma = 1,25 \text{ МэВ}$, $\mu = 0,195 \text{ см}^{-1}$, $\mu_{\text{нв}} = 0,0292 \text{ см}^2/\text{г}$.

5. Определить среднюю частоту следования импульсов на выходе сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором KI(Tl) цилиндрической формы диаметром $d = 4$ см толщиной $H = 5$ см при облучении γ -излучением мощностью экспозиционной дозы $P_\gamma = 800$ мкР/ч и с энергией γ -квантов $E_\gamma = 2$ МэВ, $\mu = 0,148$ см⁻¹, $\mu_{нв} = 0,0253$ см²/г.

6. Определить амплитуду импульса на выходе ФЭУ сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором CdS(Ag) при поглощении на нем α -частицы с энергией 3 МэВ. Коэффициент светособирания 0,18, квантовый выход катода 0,07, коэффициент усиления $5 \cdot 10^4$, емкость анода 50 пФ, $a = 0,55$.

7. Определить амплитуду импульса на выходе ФЭУ сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором из антрацена при поглощении на нем β -частицы с энергией 4 МэВ. Коэффициент светособирания 0,2, квантовый выход катода 0,06, коэффициент усиления $3 \cdot 10^4$, емкость анода 30 пФ, $a = 0,75$.

8. Определить амплитуду импульса на выходе ФЭУ сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором NaI(Tl) при поглощении на нем β -частицы с энергией 6 МэВ. Коэффициент светособирания 0,13, квантовый выход катода 0,05, коэффициент усиления $6 \cdot 10^4$, емкость анода 35 пФ, $a = 0,85$.

9. Определить амплитуду импульса на выходе ФЭУ сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором из нафталина при поглощении на нем α -частицы с энергией 7 МэВ. Коэффициент светособирания 0,17, квантовый выход катода 0,06, коэффициент усиления $3 \cdot 10^5$, емкость анода 40 пФ, $a = 0,4$.

10. Определить амплитуду импульса на выходе ФЭУ сцинтилляционного счетчика со сцинтиллятором CsI(Tl) при поглощении на нем α -частицы с энергией 8 МэВ. Коэффициент светособирания 0,2, квантовый выход катода 0,07, коэффициент усиления 10^4 , емкость анода 25 пФ, $a = 0,6$.

11. Определить мощность поглощенной дозы в веществе сцинтиллятора из антрацена ($H = 0,5$ см и $S = 5$ см²) в токовом режиме, если ток составляет $5 \cdot 10^{-11}$ А, коэффициент светособирания 0,2, квантовый выход катода 0,07, коэффициент усиления $3 \cdot 10^5$, $a = 0,75$, $\mu = 0,33$ см⁻¹, $\mu_{нв} = 0,03$ см²/г, $\mu_{нз} = 0,04$ см²/г.

12. Определить мощность поглощенной дозы в веществе сцинтиллятора NaI(Tl) ($H = 1$ см и $S = 10$ см²) в токовом режиме, если ток составляет $2 \cdot 10^{-11}$ А, коэффициент светособирания 0,15, квантовый выход катода 0,05, коэффициент усиления $5 \cdot 10^5$, $a = 0,7$, $\mu = 0,257$ см⁻¹, $\mu_{нв} = 0,029$ см²/г, $\mu_{нз} = 0,031$ см²/г.

13. Определить мощность поглощенной дозы в веществе сцинтиллятора из нафталина ($H = 0,4$ см и $S = 4$ см²) в токовом режиме, если ток составляет $4 \cdot 10^{-11}$ А, коэффициент светособирания 0,16, квантовый выход катода 0,04, коэффициент усиления $5 \cdot 10^4$, $a = 0,65$, $\mu = 0,202$ см⁻¹, $\mu_{нв} = 0,028$ см²/г, $\mu_{нз} = 0,027$ см²/г.

14. Определить мощность поглощенной дозы в веществе сцинтиллятора LiI(Eu) ($H = 2$ см и $S = 22$ см²) в токовом режиме, если ток составляет

$8 \cdot 10^{-11}$ А, коэффициент светособирания 0,18, квантовый выход катода 0,08, коэффициент усиления $4 \cdot 10^5$, $a = 0,5$, $\mu = 0,168 \text{ см}^{-1}$, $\mu_{nv} = 0,0256 \text{ см}^2/\text{Г}$, $\mu_{nz} = 0,024 \text{ см}^2/\text{Г}$.

15. Определить мощность поглощенной дозы в веществе сцинтиллятора из толана ($H = 0,3 \text{ см}$ и $S = 9 \text{ см}^2$) в токовом режиме, если ток составляет $7 \cdot 10^{-11}$ А, коэффициент светособирания 0,23, квантовый выход катода 0,09, коэффициент усиления $3 \cdot 10^4$, $a = 0,8$, $\mu = 0,14 \text{ см}^{-1}$, $\mu_{nv} = 0,0211 \text{ см}^2/\text{Г}$, $\mu_{nz} = 0,0245 \text{ см}^2/\text{Г}$.

16. Определить число фотонов, испускаемых сцинтиллятором KI(Tl) при поглощении на нем β -частицы с энергией 3 МэВ, а также число фотонов, которые достигнут фотокатода. Коэффициент светособирания 0,2, $a = 0,8$.

17. Определить число фотонов, испускаемых сцинтиллятором CsI(Tl) при поглощении на нем β -частицы с энергией 4 МэВ, а также число фотонов, которые достигнут фотокатода. Коэффициент светособирания 0,15, $a = 0,75$.

18. Определить число фотонов, испускаемых сцинтиллятором CdS(Ag) при поглощении на нем α -частицы с энергией 5 МэВ, а также число фотонов, которые достигнут фотокатода. Коэффициент светособирания 0,25, $a = 0,4$.

19. Определить число фотонов, испускаемых сцинтиллятором ZnS(Ag) при поглощении на нем β -частицы с энергией 6 МэВ, а также число фотонов, которые достигнут фотокатода. Коэффициент светособирания 0,16, $a = 0,85$.

20. Определить число фотонов, испускаемых сцинтиллятором CaWO₄ при поглощении на нем β -частицы с энергией 7 МэВ, а также число фотонов, которые достигнут фотокатода. Коэффициент светособирания 0,18, $a = 0,7$.

15 РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДЕТЕКТОРА

15.1 Принцип работы однородного полупроводникового детектора

Принцип работы однородного полупроводникового детектора аналогичен работе ионизационной камеры. При облучении кристалла ионизирующим излучением в нем происходит непрерывный переход электронов из валентной зоны в зону проводимости и последующее возвращение этих электронов в валентную зону. Чем больше мощность дозы ионизирующего излучения, тем больше число электронов, находящихся в данный момент в зоне проводимости, и, соответственно, больше дырок в валентной зоне. С числом свободных носителей заряда связана проводимость кристалла, а, следовательно, и сила тока через этот кристалл. Таким образом, ток, пропускаемый однородным полупроводниковым детектором при определенном напряжении питания, напрямую зависит от мощности дозы излучения. При этом чувствительным объемом однородного полупроводникового детектора является весь объем кристалла.

Ток в цепи детектора может быть определен по соотношению:

$$I = q_e \cdot S \cdot (\Delta n_n \cdot v_n + \Delta n_p \cdot v_p), \quad (15.1)$$

где I – сила тока через детектор, А;

$\Delta n_n, \Delta n_p$ – неравновесная концентрация электронов и дырок соответственно, $1/\text{м}^3$;

v_n, v_p – скорость дрейфа электронов и дырок соответственно, м/с;

S – площадь поперечного сечения детектора, м^2 .

Неравновесные концентрации связаны со скоростью образования носителей заряда:

$$\Delta n_n = g_n \cdot \tau_n, \quad (15.2)$$

$$\Delta n_p = g_p \cdot \tau_p, \quad (15.3)$$

где g_n, g_p – соответственно скорость образования электронов и дырок в единице объема полупроводника, $1/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$;

τ_n, τ_p – среднее время жизни электронов и дырок соответственно, с.

Скорость дрейфа можно определить как:

$$v_n = K_n \cdot E = K_n \cdot \frac{U}{H}, \quad (15.4)$$

$$v_p = K_p \cdot E = K_p \cdot \frac{U}{H}, \quad (15.5)$$

где K_n, K_p – подвижность электронов и дырок соответственно, $\text{м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$;

E – напряженность электрического поля, В/м ;

H – высота детектора (толщина чувствительного слоя), м ;

U – приложенное напряжение, В .

В целях упрощения примем $g_e = g_p = g$, тогда

$$I = q_e \cdot S \cdot g \cdot (K_n \cdot \tau_n + K_p \cdot \tau_p) \cdot \frac{U}{H}. \quad (15.6)$$

Число пар ионов, образующихся во всём объёме в единице времени:

$$G = g \cdot S \cdot H = g \cdot V, \quad (15.7)$$

тогда:

$$I = q_e \cdot G \cdot (K_n \cdot \tau_n + K_p \cdot \tau_p) \cdot \frac{U}{H^2}. \quad (15.8)$$

Пусть чувствительный объем имеет цилиндрическую форму и поток фотонов падает перпендикулярно плоскости торца, тогда число пар ионов:

$$G = \frac{\Delta E_{\text{изл}}}{\omega_z}, \quad (15.9)$$

где $\Delta E_{\text{изл}}$ – поглощенная в единицу времени энергия в чувствительном объеме;

ω_z – средняя энергия образования пары носителей «электрон-дырка», Дж.

$$\Delta E_{\text{изл}} = \frac{S \cdot \mu_{nz} \cdot \varphi}{\mu_z} \cdot (1 - e^{-\mu_z H}), \quad (15.10)$$

где μ_z – линейный коэффициент ослабления для полупроводника, м^{-1} ;

μ_{nz} – линейный коэффициент передачи энергии для полупроводника, м^{-1} ;

φ – плотность потока энергии.

Из формулы (11.30) следует, что плотность потока энергии связана с мощностью экспозиционной дозы соотношением:

$$\varphi = P_\gamma \cdot \frac{\omega_\phi \cdot \rho_\phi}{\mu_{n\phi} \cdot q_e}, \quad (15.11)$$

где P_γ – мощность экспозиционной дозы, $\text{Кл}/(\text{кг} \cdot \text{с})$;

ω_ϕ – средняя энергия ионообразования в воздухе, Дж (постоянная величина, равная 34 эВ ($5,44 \cdot 10^{-18}$ Дж));

ρ_ϕ – плотность воздуха, $\text{г}/\text{см}^3$;

$\mu_{n\phi}$ – линейный коэффициент передачи энергии для воздуха, м^{-1} .

Тогда получим в общем виде зависимость выходного сигнала однородного полупроводникового детектора от мощности дозы выглядит следующим образом:

$$I = P_{\gamma} \cdot \frac{\omega_{\text{с}} \cdot \rho_{\text{с}} \cdot S \cdot \mu_{\text{nz}}}{\omega_z \cdot \mu_{\text{не}}} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z H}}{\mu_z} \cdot (K_n \cdot \tau_n + K_p \cdot \tau_p) \cdot \frac{U}{H^2}. \quad (15.12)$$

Энергия излучения оказывает свое влияние на выходной сигнал детектора через коэффициенты ослабления и передачи энергии. Из-за большого эффективного атомного номера полупроводникового кристалла это влияние достаточно велико.

Для несистемных единиц взяв P_{γ} в Р/ч будем иметь:

$$I[A] = \frac{2,58 \cdot 10^{-7} \cdot P_{\gamma} [\text{Кл/Г}]}{3600 [\text{с}]} \cdot \frac{34 \cdot 10^{-6} [\text{МэВ}] \cdot 1,29 \cdot 10^{-3} [\text{Г/см}^3] \cdot S [\text{см}^2] \cdot \mu_{\text{nz}} [\text{см}^{-1}]}{\omega_z [\text{МэВ}] \cdot \mu_{\text{не}} [\text{см}^{-1}]} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z H}}{\mu_z [\text{см}^{-1}]} \cdot (K_n [\text{см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}] \cdot \tau_n [\text{с}] + K_p [\text{см}^2 / \text{В} \cdot \text{с}] \cdot \tau_p [\text{с}]) \cdot \frac{U [\text{В}]}{H^2 [\text{см}^2]}$$

Или:

$$I = 3,1433 \cdot 10^{-18} \cdot P_{\gamma} \cdot \frac{S \cdot \mu_{\text{nz}}}{\omega_z \cdot \mu_{\text{не}}} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z H}}{\mu_z} \cdot (K_n \cdot \tau_n + K_p \cdot \tau_p) \cdot \frac{U}{H^2}. \quad (15.13)$$

15.2 Принцип работы полупроводниковых детекторов с р-п-переходом

При подключении кристалла с р-п-переходом к источнику питания по диодной схеме («плюс» подключается к п-области) толщина слоя р-п-перехода увеличивается, так как основные носители заряда в обеих областях оттягиваются от границы контакта полупроводников. Если теперь на кристалл воздействовать ионизирующим излучением, то по всему его объему начнется образование дополнительных носителей заряда за счет перехода электронов из валентной зоны в зону проводимости. Однако, перенос заряда через кристалл будет производиться только теми электронами и дырками, которые образовались в слое р-п-перехода. Эти носители заряда будут разделяться полем р-п-перехода, двигаться к соответствующим электродам и образовывать ток во внешней цепи. Носители заряда, образующиеся за пределами слоя р-п-перехода, не будут вносить вклада в образование тока (этому воспрепятствует потенциальный барьер). Таким образом, чувствительным объемом такого полупроводникового детектора является слой р-п-перехода.

Расчет толщины слоя р-п-перехода для детекторов с различным типом подложки может быть выполнен по следующим формулам:

$$d_{0n} = 5 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\rho_n \cdot (U + U_\kappa)}, \quad (15.14)$$

$$d_{0p} = 3 \cdot 10^{-5} \cdot \sqrt{\rho_p \cdot (U + U_\kappa)}, \quad (15.15)$$

где d_{0n} , d_{0p} – толщина слоя р-п-перехода в детекторе, изготовленном на подложке с п- и р-проводимостью соответственно, см;

ρ_n , ρ_p – удельное сопротивление полупроводника с п- и р-проводимостью соответственно, Ом·см;

U – напряжение источника питания, В;

U_κ – контактная разность потенциалов (напряжение, создаваемое полем р-п-перехода), В.

Толщина р-п перехода может быть увеличена с приложением внешнего напряжения.

Величина U_κ обычно равна 0,5 – 0,7 В. В том случае, когда тип подложки, на которой изготовлен детектор, неизвестен, то пользуются усредненной формулой:

$$d_0 = \sqrt{10^{-9} \cdot \rho \cdot (U + U_\kappa)}. \quad (15.16)$$

Важным параметром детектора является электрическая емкость р-п-перехода:

$$C_{nep} = \frac{\varepsilon \cdot S}{4\pi \cdot d_0}, \quad (15.17)$$

где C_{nep} – емкость перехода, пФ;

S – площадь контакта областей с р- и п-проводимостью, см²;

d_0 – толщина слоя р-п-перехода, см;

ε – диэлектрическая проницаемость полупроводника.

Ионизирующая частица за счёт потери энергии создаёт в чувствительной области пары электрон – дырка, эти пары разносятся и создают во внешней цепи ток. Измеряя ток измеряют мощность дозы или плотность потока частиц.

Величина тока через переход (темновой ток) определяется по соотношению:

$$I = q_e \cdot S \cdot \left(\frac{n_n \cdot L_p}{\tau_p} + \frac{n_p \cdot L_n}{\tau_n} \right) \cdot \left(e^{\pm \frac{q_e U}{kT}} - 1 \right), \quad (15.18)$$

где n_n , n_p – соответственно равновесные концентрации дырок в п-области и электронов в р-области, 1/м³;

L_p , L_n – диффузионная длина дырок и электронов;

k – постоянная Больцмана, Дж/К ($1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T – температура, К.

Перед выражением $\frac{q_e U}{kT}$ ставиться «+», если напряжение приложено в пропускном направлении, и «–», если в обратном (режим обратного смещения).

Максимальный ток насыщения можно определить как:

$$I_s = q_e \cdot S \cdot \left(\frac{n_n \cdot L_p}{\tau_p} + \frac{n_p \cdot L_n}{\tau_n} \right), \quad (15.19)$$

тогда

$$I = I_s \cdot \left(e^{\pm \frac{q_e U}{kT}} - 1 \right). \quad (15.20)$$

Ток, генерируемый воздействующим излучением, может быть определен по формуле:

$$I_\gamma = \alpha \cdot P_\gamma, \quad (15.21)$$

где α – постоянный для данных условий коэффициент.

При воздействии излучения величина тока будет:

$$I = I_s \cdot \left(e^{\pm \frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I_\gamma, \quad (15.22)$$

$$I = I_s \cdot \left(e^{\pm \frac{qU}{kT}} - 1 \right) - \alpha P_\gamma. \quad (15.23)$$

Характеристики различных материалов для ППД приведены в Приложении О. Зависимость линейных коэффициентов от энергии гамма-кванта в кремнии и германии в Приложении П.

15.3 Чувствительность полупроводниковых детекторов с р-п-переходом

Полупроводниковые детекторы с р-п-переходом могут использоваться в счетном и токовом режимах. Наиболее высокая чувствительность достигается в счетном режиме, используемом в области малых и средних мощностей доз. При высоких мощностях доз используется токовый режим.

Эффективность детектора определяется из соотношения:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\mu_z H}. \quad (15.24)$$

Скорость счета:

$$n_{сч} = P_{\gamma} \cdot \frac{\omega_{\epsilon} \cdot S \cdot \epsilon \cdot \rho_{\epsilon}}{E_{\gamma} \cdot \mu_{n\epsilon} \cdot q_e} \quad (15.25)$$

Тогда чувствительность:

$$\eta = \frac{n_{сч}}{P_{\gamma}} = \frac{\omega_{\epsilon} \cdot S \cdot \rho_{\epsilon}}{E_{\gamma} \cdot \mu_{n\epsilon} \cdot q_e} \cdot (1 - e^{-\mu_z H}) \quad (15.26)$$

Из формулы видно, что чувствительность зависит от энергии. Энергетическую зависимость чувствительности можно существенно уменьшить выбором соответствующей величины порога дискриминации регистрирующей схемы. В определенной степени ЭЗЧ можно уменьшить с помощью металлических фильтров.

Для несистемных единиц взяв P_{γ} в Р/ч будем иметь:

$$\begin{aligned} n_{сч} &= \frac{2,58 \cdot 10^{-7} \cdot P_{\gamma} [\text{Кл/Г}]}{3600 [\text{с}]} \cdot \frac{34 \cdot 10^{-6} [\text{МэВ}] \cdot S [\text{см}^2] \cdot \epsilon \cdot 1,29 \cdot 10^{-3} [\text{Г/см}^3]}{E_{\gamma} [\text{МэВ}] \cdot \mu_{n\epsilon} [\text{см}^2/\text{Г}] \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} [\text{Кл}]} = \\ &= 19,646 \cdot P_{\gamma} \cdot \frac{S \cdot \epsilon}{E_{\gamma} \cdot \mu_{n\epsilon}} = 19,646 \cdot P_{\gamma} \cdot \frac{S}{E_{\gamma} \cdot \mu_{n\epsilon}} \cdot (1 - e^{-\mu_z H}) \text{ имп/с} \\ \eta &= 19,646 \cdot \frac{S}{E_{\gamma} \cdot \mu_{n\epsilon}} \cdot (1 - e^{-\mu_z H}) \frac{\text{имп/с}}{\text{Р/ч}}. \end{aligned} \quad (15.27)$$

15.4 Схемы включения полупроводникового детектора с р-п-переходом

Схемы включения полупроводникового детектора с р-п-переходом, позволяющие получить выходные импульсы с различной полярностью, представлены на рис. 15.1.

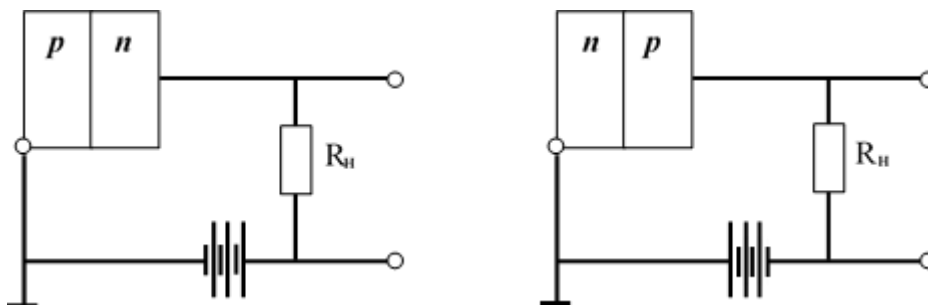


Рис. 15.1. Схемы включения полупроводниковых детекторов с различной полярностью выходных импульсов

Если принять, что весь заряд Q , образованный в чувствительном объеме детектора при поглощении в нем заряженных частиц с энергией E , будет собран на электродах, то максимальная амплитуда импульса напряжения U_m будет равна:

$$\Delta U_m = \frac{Q}{C} = \frac{E \cdot q_e}{\omega \cdot C} \quad (15.28)$$

где C – емкость в нагрузке детектора, Ф:

$$C = C_{сч} + C_{вх}, \quad (15.29)$$

где $C_{сч}$ – собственно емкость детектора, Ф;

$C_{вх}$ – емкость входного каскада усиления, Ф.

Заряд Q , собираемый выходных электродах детектора, распределяется между емкостями C и C_{oc} (емкостью конденсатора обратной связи). Тогда амплитуда импульса напряжения на входе будет равна:

$$\Delta U_{вх} = \frac{Q}{C + C_{oc}}. \quad (15.30)$$

Амплитуда импульса напряжения на выходе усилителя определяется как:

$$\Delta U_{вых} = \Delta U_{вх} \cdot \frac{K}{1 + \beta_{oc} \cdot K}, \quad (15.31)$$

где K – коэффициент усиления при разомкнутой цепи обратной связи;

β_{oc} – коэффициент обратной связи:

$$\beta = \frac{C_{oc}}{C_{oc} + C}. \quad (15.32)$$

Тогда:

$$\Delta U_{вых} = \frac{Q}{C + C_{oc}} \cdot \frac{K}{\left(1 + \frac{C_{oc} \cdot K}{C + C_{oc}}\right)} = \frac{Q}{C_{oc} \cdot \left(1 + \frac{C + C_{oc}}{K \cdot C_{oc}}\right)}. \quad (15.33)$$

Величины C и C_{oc} одного порядка, а коэффициент усиления K выбирается достаточно большим ($K = 100 \div 1000$), поэтому $\frac{C + C_{oc}}{K \cdot C_{oc}} \ll 1$, отсюда:

$$\Delta U_{вых} = \frac{Q}{C_{oc}}. \quad (15.34)$$

Пример решения задач

Пример 15.1. Рассчитать ток в цепи кремниевого однородного полупроводникового детектора с площадью поперечного сечения 16 см^2 и высотой $0,05 \text{ см}$, работающего при 77 К , к которому приложено напряжение 220 В и воздействует излучение мощностью $1,5 \text{ Р/ч}$. Энергия гамма-излучения $0,1 \text{ МэВ}$.

Решение

Дано: $S = 16 \text{ см}^2$ $H = 0,05 \text{ см}$ $T = 77 \text{ К}$ $U = 220 \text{ В}$ $P_\gamma = 1,5 \text{ Р/ч}$ $E_\gamma = 0,1 \text{ МэВ}$ $I = ?$	$I = 3,1433 \cdot 10^{-18} \cdot P_\gamma \cdot \frac{S \cdot \mu_{nz}}{\omega_z \cdot \mu_{ng}} \cdot \frac{1 - e^{-\mu_z H}}{\mu_z} \cdot (K_n \cdot \tau_n + K_p \cdot \tau_p) \cdot \frac{U}{H^2}$ $I = 3,1433 \cdot 10^{-18} \cdot 1,5 \cdot \frac{16 \cdot 0,36}{3,76 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{1 - e^{-0,55 \cdot 0,05}}{0,55} \cdot (2,1 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-5} + 1,1 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-5}) \cdot \frac{220}{0,05^2} = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ Ответ: $I = 6,7 \cdot 10^{-4} \text{ А}$.
--	--

Пример 15.2. Рассчитать мощность экспозиционной дозы, действующей на полупроводниковый детектор с р-п-переходом, работающего при температуре 300 К , если темновой ток равен $2 \cdot 10^{-6} \text{ А}$, ток насыщения $2 \cdot 10^{-5} \text{ А}$, приложенное в пропускном направлении напряжение $0,5 \text{ В}$, коэффициент $\alpha = 10^{10}$.

Решение

Дано: $T = 300 \text{ К}$ $I = 2 \cdot 10^{-6} \text{ А}$ $I_s = 2 \cdot 10^{-5} \text{ А}$ $U = 0,5 \text{ В}$ $\alpha = 10^{10}$ $P_\gamma = ?$	$I = I_s \cdot \left(e^{\pm \frac{qU}{kT}} - 1 \right) - \alpha P_\gamma$ $P_\gamma = \frac{I_s \cdot \left(e^{\pm \frac{qU}{kT}} - 1 \right) - I}{\alpha}$ $P_\gamma = \frac{2 \cdot 10^{-5} \cdot \left(e^{\frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,5}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}} - 1 \right) - 2 \cdot 10^{-6}}{10^{10}} = 4,934 \cdot 10^{-7} \text{ А/кг}$ $1 \text{ А/кг} = 1,4 \cdot 10^7 \text{ Р/ч} \rightarrow P_\gamma = 4,934 \cdot 10^{-7} \cdot 1,4 \cdot 10^7 = 6,9 \text{ Р/ч}$
---	---

Ответ: $P_\gamma = 6,9 \text{ Р/ч}$.

Контрольные задания

1. Рассчитать ток в цепи кремниевого однородного полупроводникового детектора с площадью поперечного сечения 20 см^2 и высотой $0,04 \text{ см}$, работающего при 300 К , к которому приложено напряжение 220 В и воздействует излучение мощностью 2 Р/ч . Энергия гамма-излучения 10 МэВ .

2. Рассчитать ток в цепи германиевого однородного полупроводникового детектора с площадью поперечного сечения 18 см^2 и высотой $0,06 \text{ см}$, работающего при 77 К , к которому приложено напряжение 220 В и воздействует излучение мощностью 3 Р/ч . Энергия гамма-излучения 6 МэВ .

3. Рассчитать ток в цепи кремниевого однородного полупроводникового детектора с площадью поперечного сечения 17 см^2 и высотой $0,06 \text{ см}$, работающего при 77 К , к которому приложено напряжение 220 В и воздействует излучение мощностью 1 Р/ч . Энергия гамма-излучения 2 МэВ .

4. Рассчитать ток в цепи кремниевого однородного полупроводникового детектора с площадью поперечного сечения 22 см^2 и высотой $0,035 \text{ см}$, работающего при 77 К , к которому приложено напряжение 220 В и воздействует излучение мощностью $2,5 \text{ Р/ч}$. Энергия гамма-излучения $0,1 \text{ МэВ}$.

5. Рассчитать ток в цепи германиевого однородного полупроводникового детектора с площадью поперечного сечения 10 см^2 и высотой $0,055 \text{ см}$, работающего при 300 К , к которому приложено напряжение 220 В и воздействует излучение мощностью 5 Р/ч . Энергия гамма-излучения 1 МэВ .

6. Рассчитать ток в цепи кремниевого однородного полупроводникового детектора с площадью поперечного сечения 18 см^2 и высотой $0,05 \text{ см}$, работающего при 77 К , к которому приложено напряжение 220 В и воздействует излучение мощностью $3,5 \text{ Р/ч}$. Энергия гамма-излучения 1 МэВ .

7. Рассчитать емкость и толщину перехода в германиевом детекторе с неизвестным типом подложки. Удельное сопротивление полупроводника 10^{-7} , площадь контакта областей проводимости 10 см^2 , напряжение источника питания 220 В , контактная разность потенциалов $0,5 \text{ В}$.

8. Рассчитать емкость и толщину перехода в детекторе на основе CdTe с подложкой с р-проводимостью. Удельное сопротивление полупроводника 10^{-6} , площадь контакта областей проводимости 5 см^2 , напряжение источника питания 220 В , контактная разность потенциалов $0,7 \text{ В}$.

9. Рассчитать емкость и толщину перехода в детекторе на основе GaAs с подложкой с п-проводимостью. Удельное сопротивление полупроводника $4 \cdot 10^{-6}$, площадь контакта областей проводимости 9 см^2 , напряжение источника питания 220 В , контактная разность потенциалов $0,58 \text{ В}$.

10. Рассчитать емкость и толщину перехода в детекторе на основе HgI с подложкой с п-проводимостью. Удельное сопротивление полупроводника 10^{-8} , площадь контакта областей проводимости 15 см^2 , напряжение источника питания 220 В , контактная разность потенциалов $0,75 \text{ В}$.

11. Рассчитать емкость и толщину перехода в детекторе на основе CdS с подложкой с n-проводимостью. Удельное сопротивление полупроводника $9 \cdot 10^{-6}$, площадь контакта областей проводимости 11 см^2 , напряжение источника питания 220 В, контактная разность потенциалов 0,7 В.

12. Рассчитать емкость и толщину перехода в алмазном детекторе с неизвестным типом подложки. Удельное сопротивление полупроводника $5 \cdot 10^{-7}$, площадь контакта областей проводимости 7 см^2 , напряжение источника питания 220 В, контактная разность потенциалов 0,6 В.

13. Рассчитать емкость и толщину перехода в детекторе на основе GaAs с подложкой с p-проводимостью. Удельное сопротивление полупроводника 10^{-7} , площадь контакта областей проводимости 8 см^2 , напряжение источника питания 220 В, контактная разность потенциалов 0,6 В.

14. Рассчитать мощность экспозиционной дозы, действующей на полупроводниковый детектор с p-n-переходом, работающего при температуре 300 К, если темновой ток равен $1 \cdot 10^{-5} \text{ А}$, ток насыщения $5 \cdot 10^{-5} \text{ А}$, приложенное в пропускном направлении напряжение 0,7 В, коэффициент $\alpha = 10^{11}$.

15. Рассчитать мощность экспозиционной дозы, действующей на полупроводниковый детектор с p-n-переходом, работающего при температуре 300 К, если темновой ток равен $4 \cdot 10^{-6} \text{ А}$, ток насыщения $1 \cdot 10^{-5} \text{ А}$, приложенное в пропускном направлении напряжение 0,6 В, коэффициент $\alpha = 10^{12}$.

16. Рассчитать мощность экспозиционной дозы, действующей на полупроводниковый детектор с p-n-переходом, работающего при температуре 300 К, если темновой ток равен $5 \cdot 10^{-7} \text{ А}$, ток насыщения $4 \cdot 10^{-6} \text{ А}$, приложенное в пропускном направлении напряжение 0,7 В, коэффициент $\alpha = 10^{10}$.

17. Рассчитать мощность экспозиционной дозы, действующей на полупроводниковый детектор с p-n-переходом, работающего при температуре 300 К, если темновой ток равен $1 \cdot 10^{-7} \text{ А}$, ток насыщения $2 \cdot 10^{-6} \text{ А}$, приложенное в пропускном направлении напряжение 0,53 В, коэффициент $\alpha = 10^{10}$.

18. Рассчитать мощность экспозиционной дозы, действующей на полупроводниковый детектор с p-n-переходом, работающего при температуре 300 К, если темновой ток равен $5 \cdot 10^{-7} \text{ А}$, ток насыщения $3 \cdot 10^{-6} \text{ А}$, приложенное в пропускном направлении напряжение 0,56 В, коэффициент $\alpha = 10^{11}$.

19. Рассчитать мощность экспозиционной дозы, действующей на полупроводниковый детектор с p-n-переходом, работающего при температуре 300 К, если темновой ток равен $1 \cdot 10^{-5} \text{ А}$, ток насыщения $3 \cdot 10^{-4} \text{ А}$, приложенное в пропускном направлении напряжение 0,7 В, коэффициент $\alpha = 10^9$.

20. Энергия гамма излучения 8 МэВ. Рассчитать чувствительность кремниевого детектора с p-n-переходом площадью 12 см^2 , толщиной 0,08 см.

21. Энергия гамма излучения 1 МэВ. Рассчитать чувствительность германиевого детектора с p-n-переходом площадью 15 см^2 , толщиной 0,04 см.

22. Энергия гамма излучения 4 МэВ. Рассчитать чувствительность кремниевого детектора с p-n-переходом площадью 17 см^2 , толщиной 0,03 см.

23. Энергия гамма излучения 0,1 МэВ. Рассчитать чувствительность германиевого детектора с р-п-переходом площадью 21 см², толщиной 0,04 см.

24. Энергия гамма-излучения 1 МэВ. Рассчитать чувствительность германиевого детектора с р-п-переходом площадью 18 см², толщиной 0,055 см.

25. Энергия гамма излучения 4 МэВ. Рассчитать чувствительность кремниевого детектора с р-п-переходом площадью 14 см², толщиной 0,06 см.

26. Энергия гамма-излучения 10 МэВ. Рассчитать чувствительность кремниевого детектора с р-п-переходом площадью 17 см², толщиной 0,05 см.

27. Рассчитать амплитуды напряжения на входе и выходе, если заряд составляет 20 Кл, емкость в нагрузке детектора 0,08 Ф, емкость конденсатора обратной связи 0,04 Ф, коэффициент усиления 100.

28. Рассчитать амплитуды напряжения на входе и выходе, если заряд составляет 40 Кл, емкость в нагрузке детектора 0,05 Ф, емкость конденсатора обратной связи 0,01 Ф, коэффициент усиления 150.

29. Рассчитать амплитуды напряжения на входе и выходе, если заряд составляет 30 Кл, емкость в нагрузке детектора 0,1 Ф, емкость конденсатора обратной связи 0,03 Ф, коэффициент усиления 200.

30. Рассчитать амплитуды напряжения на входе и выходе, если заряд составляет 15 Кл, емкость в нагрузке детектора 0,09 Ф, емкость конденсатора обратной связи 0,02 Ф, коэффициент усиления 300.

31. Рассчитать амплитуды напряжения на входе и выходе, если заряд составляет 23 Кл, емкость в нагрузке детектора 0,1 Ф, емкость конденсатора обратной связи 0,02 Ф, коэффициент усиления 260.

32. Рассчитать амплитуды напряжения на входе и выходе, если заряд составляет 25 Кл, емкость в нагрузке детектора 0,05 Ф, емкость конденсатора обратной связи 0,01 Ф, коэффициент усиления 500.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бекман И.Н. Атомная и ядерная физика: радиоактивность и ионизирующие излучения: учебник для бакалавриата и магистратуры / И.Н. Бекман. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 398 с.
2. Бекман И.Н. Ядерные технологии: учебник для бакалавриата и магистратуры / И.Н. Бекман. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 404 с.
3. Бекман И.Н. Ядерная индустрия: курс лекций / И.Н. Бекман. – М.: МГУ, 2005. – <http://profbeckman.narod.ru/NI.htm>
4. Бекман И.Н. Измерение ионизирующих излучений: курс лекций / И.Н. Бекман. – М.: МГУ, 2006. – <http://profbeckman.narod.ru/radiometr.htm>
5. Сазонов А.Б. Ядерная физика: учебное пособие для вузов / А.Б. Сазонов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 269 с.
6. Ташлыков О.Л. Ядерные технологии: учебное пособие для вузов / О.Л. Ташлыков; под науч. ред. С.Е. Щеклеина. – М.: Издательство Юрайт, 2019. – 210 с.
7. Климов А.Н. Ядерная физика и ядерные реакторы: учебник для вузов / А.Н. Климов. – М.: Энергоатомиздат, 2002. – 464 с.: ил.
8. Званцев А.А. 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.
9. Матвеев А.В. Практикум по дозиметрии и радиационной безопасности: учеб. пос. / А. В. Матвеев, В. И. Козаченко, В. П. Котов; под ред. А. В. Матвеева. – С-Пб.: ГУАП, 2006. – 88 с.: ил.
10. Афанасьев А.В. Дозиметрические величины и единицы их измерения: учебное пособие / А.В. Афанасьев. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2002. – 22 с.
11. Афанасьев А.В. Основы ядерной физики, радиохимии и дозиметрии: учебно-методическое пособие / А.В. Афанасьев, В.В. Гуманный, Г.П. Мясоедов. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2003. – 68 с.: ил.
12. Афанасьев А.В. Переход к системе СИ в дозиметрии: учебное пособие / А.В. Афанасьев, Г.П. Мясоедов. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2005. – 26 с.

Приложение А

Некоторые свойства ядер

Нуклид ^A X	Z	Атомная масса, аеm	Тип распада	T _{1/2}
¹ H	1	1,00783	-	-
² H		2,01410	-	-
³ H		3,01605	β ⁻	12,26 лет
³ He	2	3,01603	-	-
⁴ He		4,00260	-	-
⁶ He		6,01889	β ⁻	0,8 с
⁶ Li	3	6,01512	-	-
⁷ Li		7,01600	-	-
⁸ Li		8,02248	β ⁻ , 2α	0,84 с
⁷ Be	4	7,01693	β ⁺ (11%), κ (89%), γ	5,3 сут
⁸ Be		8,00530	2α	10 ⁻¹⁶ с
⁹ Be		9,01218	-	-
¹⁰ Be		10,01353	β ⁻	2,7·10 ⁶ лет
⁸ B	5	8,02461	2α, β ⁺	0,77 с
¹⁰ B		10,01294	-	-
¹¹ B		11,00930	-	-
¹² B		12,01435	β ⁻	20,3 мс
¹¹ C	6	11,01143	β ⁺	20,4 мин
¹² C		12,00000	-	-
¹³ C		13,00335	-	-
¹⁴ C		14,00324	β ⁻	5730 лет
¹³ N	7	13,00574	β ⁺	9,97 мин
¹⁴ N		14,00307	-	-
¹⁵ N		15,00010	-	-
¹⁶ N		16,00610	β ⁻ , γ	7,14 с
¹⁷ N		17,00845	β ⁻ , n, γ	4,16 с
¹⁵ O	8	15,00307	β ⁺	123 с
¹⁶ O		15,99491	-	-
¹⁷ O		16,99913	-	-
¹⁸ O		17,99916	-	-
¹⁸ F	9	18,00094	β ⁺ , γ	109,8 мин
¹⁹ F		18,99840	-	-
²⁰ F		19,99998	β ⁻ , γ	11,56 с
²¹ F		20,99995	β ⁻ , γ	4,35 с
¹⁹ Ne	10	19,00188	β ⁺	17,4 с
²⁰ Ne		19,99244	-	-
²¹ Ne		20,99385	-	-
²² Ne		21,99138	-	-
²³ Ne		22,99447	β ⁻ , γ	38,7 с
²² Na	11	21,99443	β ⁺ (95%), κ (5%), γ	2,6 года
²³ Na		22,98770	-	-
²⁴ Na		23,99096	β ⁻ , γ	15 ч

Нуклид ^A X	Z	Атомная масса, аем	Тип распада	T _{1/2}
²³ Mg	12	22,99426	β^+, γ	12,1 с
²⁴ Mg		23,98504	-	-
²⁵ Mg		24,98584	-	-
²⁶ Mg		25,98259	-	-
²⁷ Mg		26,98434	β^-, γ	9,46 мин
²⁶ Al	13	25,98689	β^+, γ	7,35·10 ⁵ лет
²⁷ Al		26,98154	-	-
²⁸ Al		27,98191	β^-, γ	2,24 м
²⁷ Si	14	26,98670	β^+	4,14 с
²⁸ Si		27,97693	-	-
²⁹ Si		28,97650	-	-
³⁰ Si		29,97377	-	-
³¹ Si		30,97536	β^-	2,64 ч
³⁰ P	15	29,97831	β^+	2,5 мин
³¹ P		30,97376	-	-
³² P		31,97391	β^-	14,3 сут
³¹ S	16	30,97960	β^+, γ	2,72 с
³² S		31,97207	-	-
³³ S		32,97146	-	-
³⁴ S		33,96787	-	-
³⁵ S		34,96903	β^-	88 сут
³⁵ Cl	17	34,96885	-	-
³⁶ Cl		35,96831	β^-, κ	3·10 ⁵ лет
³⁷ Cl		36,96590	-	-
³⁸ Cl		37,96801	β^-, γ	37,3 мин
³⁶ Ar	18	35,96755	-	-
³⁷ Ar		36,96678	κ	35,1 сут
³⁸ Ar		37,96273	-	-
⁴⁰ Ar		39,96238	-	-
⁴¹ Ar		40,96450	β^-, γ	1,83 ч
³⁸ K	19	37,96909	β^+, γ	7,71 мин
³⁹ K		38,96371	-	-
⁴⁰ K		39,96400	β^- (88%), κ (12%)	1,27·10 ⁹ лет
⁴¹ K		40,96182	-	-
⁴² K		41,96240	β^-, γ	12,36 ч
³⁹ Ca	20	38,97071	β^+	0,87 с
⁴⁰ Ca		39,96259	-	-
⁴¹ Ca		40,96228	κ	8·10 ⁴ лет
⁴² Ca		41,95863	-	-
⁴³ Ca		42,95878	-	-
⁴⁴ Ca		43,95549	-	-
⁴⁸ Ca		47,95253	-	-
⁴⁵ Sc	21	44,95591	-	-
⁴⁸ Sc		47,95223	β^-, γ	44,0 ч
⁴⁶ Ti	22	45,95263	-	-

Нуклид ^A X	Z	Атомная масса, аем	Тип распада	T _{1/2}
⁴⁷ Ti		46,95177	-	-
⁴⁸ Ti		47,94795	-	-
⁴⁹ Ti		48,94787	-	-
⁵⁰ V	23	49,94716	β-, γ	4·10 ¹⁶ лет
⁵¹ V		50,94396	-	-
⁵² V		51,94478	β-, γ	3,76 мин
⁴⁹ Cr	24	48,95127	β ⁺ , γ	41,9 мин
⁵⁰ Cr		49,94605	-	-
⁵¹ Cr		50,94477	к, γ	27,72 сут
⁵² Cr		51,94051	-	-
⁵⁴ Mn	25	53,94036	к, γ	312,5 сут
⁵⁵ Mn		54,93804	-	-
⁵⁶ Mn		55,93890	β-, γ	2,58 ч
⁵⁴ Fe	26	53,93961	-	-
⁵⁵ Fe		54,93829	к, е	2,7 года
⁵⁶ Fe		55,93493	-	-
⁵⁷ Fe		56,93539	-	-
⁵⁸ Fe		57,93327	-	-
⁵⁹ Fe		58,93487	β-, γ	44,6 сут
⁵⁹ Co	27	58,93319	-	-
⁶⁰ Co		59,93381	β-, γ	5,26 лет
⁵⁸ Ni	28	57,93534	-	-
⁵⁹ Ni		58,93434	к	8·10 ⁴ лет
⁶⁰ Ni		59,93078	-	-
⁶¹ Ni		60,93105	-	-
⁶⁴ Ni		63,92796	-	-
⁶³ Cu	29	62,92959	β ⁺ , γ	9,76 мин
⁶⁴ Cu		63,92976	β-, к	12,8 ч
⁶⁵ Cu		64,92779	-	-
⁶⁴ Zn	30	63,92914	-	-
⁶⁵ Zn		64,92924	к (97,5%), β ⁺ (2,5%), γ	245,0 сут
⁶⁹ Ga	31	68, 92558	-	-
⁷⁰ Ga		69,92603	β ⁻	21,1 мин
⁷¹ Ga		70,92470	-	-
⁷⁰ Ge	32	69,92425	-	-
⁷² Ge		71,92208	-	-
⁷⁴ Ge		73,92118	-	-
⁷⁴ As	33	73,92393	β-, β ⁺ , к, γ	18 сут
⁷⁵ As		74,92160	-	-
⁷⁷ As		76,92064	β-, γ	38,7 ч
⁷⁸ Se	34	77,91731	-	-
⁷⁹ Se		78,91848	β-	6,5·10 ⁴ лет
⁸⁰ Se		79,91652	-	-
⁷⁴ Br	35	73,92890	β ⁺ , γ	36 мин

Нуклид ^A X	Z	Атомная масса, аем	Тип распада	T _{1/2}
⁷⁵ Br		74,92576	β^+ (18%), κ (82%)	103 м
⁷⁶ Br		75,92420	β^- , β^+ , γ	16,1 ч
⁷⁷ Br		76,92138	κ (95%), β^+ , γ	58 ч
⁷⁸ Br		77,92114	β^+ , γ	6,5 мин
⁷⁹ Br		78,91833	-	-
⁸¹ Br		80,91629	-	-
⁸² Kr	36	81,91348	-	-
⁸³ Kr		82,91413	-	-
⁸⁴ Kr		83,91150	-	-
⁸⁵ Kr		84,91252	β^- , γ	10,732 лет
⁸⁶ Kr		85,91061	-	-
⁸⁷ Kr		86,91336	β^- , γ	76 мин
⁸⁸ Kr		87,91444	β^- , γ	2,8 ч
⁸⁹ Kr		88,91780	β^- , γ	3,2 ч
⁹⁰ Kr		89,9197	β^- , γ	32,3 с
⁸⁵ Rb	37	84,91179	-	-
⁸⁶ Rb		85,91117	β^- , γ	18,66 сут
⁸⁷ Rb		86,90918	β^-	$4,7 \cdot 10^{10}$ лет
⁸⁸ Rb		87,91132	β^- , γ	17,8 мин
⁸⁶ Sr	38	85,90928	-	-
⁸⁷ Sr		86,90889	-	-
⁸⁸ Sr		87,90563	-	-
⁸⁹ Sr		88,90746	β^- , γ	50,5 сут
⁹⁰ Sr		89,90775	β^-	28,5 г
⁸⁸ Y	39	87,90951	β^+ , γ , κ	107 сут
⁸⁹ Y		88,90586	-	-
⁹⁰ Y		89,90716	β^-	64 ч
⁹⁰ Zr	40	89,90470	-	-
⁹¹ Zr		90,90565	-	-
⁹² Zr		91,90504	-	-
⁹³ Zr		92,90645	β^-	$1,5 \cdot 10^6$ лет
⁹⁴ Zr		93,90632	-	-
⁹⁵ Zr		94,90804	β^- , γ	65,6 сут
⁹⁶ Zr		95,90829	-	-
⁹³ Nb	41	92,90638	-	-
⁹⁴ Nb		93,90729	β^- , γ	$2,03 \cdot 10^4$ лет
⁹⁴ Mo	42	93,90509	-	-
⁹⁵ Mo		94,90584	-	-
⁹⁶ Mo		95,90468	-	-
⁹⁷ Mo		96,90602	-	-
⁹⁸ Mo		97,90541	-	-
⁹⁹ Mo		98,90772	β^- , γ	66,2 ч
¹⁰⁰ Mo		99,90748	-	-
⁹⁷ Tc	43	96,90639	κ	$2,6 \cdot 10^6$ лет
⁹⁹ Tc		98,90625	β^-	$2,13 \cdot 10^5$ лет
¹⁰² Ru	44	101,90435	-	-

Нуклид ^A X	Z	Атомная масса, аем	Тип распада	T _{1/2}
¹⁰³ Ru		102,90632	β-, γ	39,6 сут
¹⁰⁴ Ru		103,90543	-	-
¹⁰⁶ Ru		105,90732	β-	369 сут
¹⁰³ Rh	45	102,90551	-	-
¹⁰⁴ Rh		103,90664	β- (γ)	6,95 мин
¹⁰⁴ Rd	46	103,90401	-	-
¹⁰⁸ Rd		107,90390	-	-
¹⁰⁹ Rd		108,90594	β-, γ	13,6 ч
¹¹⁰ Rd		109,90516	-	-
¹⁰⁷ Ag	47	106,90509	-	-
¹⁰⁹ Ag		108,90476	-	-
¹¹⁰ Ag		109,90611	β-, γ	24,4 с
¹⁰⁹ Cd	48	108,90495	γ, κ, e ⁻	1,29 года
¹¹⁰ Cd		109,90301	-	-
¹¹² Cd		111,90276	-	-
¹¹³ Cd		112,90441	-	-
¹¹⁴ Cd		113,90337	-	-
¹¹⁵ In	49	114,90387	β-	6·10 ¹⁴ лет
¹¹⁶ In		115,90521	β-, γ	13,4 с
¹¹⁶ Sn	50	115,90175	-	-
¹¹⁷ Sn		116,90296	-	-
¹²⁰ Sn		119,90221	-	-
¹²¹ Sn		120,90424	β-	27 ч
¹²² Sn		121,90345	-	-
¹²³ Sn		122,90573	β-, γ	40 мин
¹²⁴ Sn		123,90529	-	-
¹²¹ Sb	51	120,90382	-	-
¹²² Sb		121,90518	β-, γ	2,74 сут
¹²³ Sb		122,90422	-	-
¹²⁶ Te	52	125,90331	-	-
¹²⁸ Te		127,90447	-	-
¹²⁹ Te		128,90660	β-	68,7 мин
¹³⁰ Te		129,90626	-	-
¹²⁶ I	53	125,90562	β- (51,8%), β ⁺ (1,4%), e ⁻ (46,8%), γ	13,2 сут
¹²⁷ I		126,90477	-	-
¹²⁹ I		128,90499	β-, γ	1,6·10 ⁷ лет
¹³⁰ I		129,90672	β-, γ	12,3 ч
¹²⁹ Xe	54	128,90478	-	-
¹³⁰ Xe		129,90351	-	-
¹³¹ Xe		130,90508	-	-
¹³² Xe		131,90416	-	-
¹³³ Xe		132,90589	β-, γ	5,29 сут
¹³⁵ Xe		134,90714	β-, γ	9,14 ч
¹³⁷ Xe		136, 91174	β-, γ	3,82 мин
¹³⁰ Cs	55	129,90676	β-, β ⁺ , κ	29,1 мин

Нуклид ^A X	Z	Атомная масса, аем	Тип распада	T _{1/2}
¹³³ Cs		132,90544	-	-
¹³⁴ Cs		133,90670	β ⁻ , γ	2,07 года
¹³⁷ Cs		136,90709	β ⁻	30,17 лет
¹³⁸ Ba	56	137,90523	-	-
¹³⁹ Ba		138,90883	β ⁻ , γ	82,9 мин
¹⁴⁰ Ce	58	139,90549	-	-
¹⁴¹ Ce		140,90832	β ⁻ , γ	32,5 сут
¹⁴² Ce		141,90930	-	-
¹⁴³ Ce		142, 91241	β ⁻ , γ	30 ч
¹⁴¹ Pr	59	140,90770	-	-
¹⁴² Pr		141,91009	β ⁻ , γ	19,2 ч
¹⁴³ Pr		142,91086	β ⁻	13,7 сут
¹⁴⁴ Nd	60	143,91013	-	-
¹⁴⁹ Nd		148,92015	β ⁻ , γ	1,73 ч
¹⁵⁰ Nd		149,92092	-	-
¹⁴³ Pm	61	142,91100	к, γ, e ⁻	265 сут
¹⁴⁶ Pm		145,91474	β ⁻ , γ, к	1 год
¹⁵¹ Sm	62	150,91997	β ⁻ , γ	93,0 года
¹⁵² Sm		151, 91975	-	-
¹⁵⁴ Sm		153,92222	-	-
¹⁵¹ Eu	63	150,91988	-	-
¹⁵³ Eu		152,92126	-	-
¹⁵⁴ Eu		153,92301	β ⁻ , γ	16 г
¹⁵⁸ Gd	64	157,92412	-	-
¹⁶⁰ Gd		159,92707	-	-
¹⁶¹ Gd		160,92969	β ⁻ , γ	3,6 мин
¹⁵⁹ Tb	65	158,92538	-	-
¹⁶⁰ Tb		159,92719	β ⁻ , γ	72,4 сут
¹⁶⁴ Dy	66	163,92921	-	-
¹⁶⁵ Dy		164,93174	β ⁻ , γ	139,2 мин
¹⁶⁶ Ho	67	165,93232	β ⁻ , γ	27,0 ч
¹⁶⁸ Fr	68	167,93240	-	-
¹⁶⁹ Fr		168,93462	β ⁻ , γ	9,3 сут
¹⁶⁹ Tm	69	168,93425	-	-
¹⁷⁰ Tm		169,93583	β ⁻ , γ	127,0 сут
¹⁷⁴ Yb	70	173,93888	-	-
¹⁷⁵ Yb		174,94130	β ⁻ , γ	4,2 сут
¹⁷⁶ Yb		175,94258	-	-
¹⁷⁷ Yb		176,94528	β ⁻ , γ	1,88 ч
¹⁷⁵ Lu	71	174,94080	-	-
¹⁷⁶ Lu		175,94270	β ⁻ , к, γ	5·10 ¹⁰ лет
¹⁷⁸ Hf	72	177,94372	-	-
¹⁸⁰ Hf		179,94657	-	-
¹⁸¹ Hf		180,94913	β ⁻ , γ	45,0 сут
¹⁸¹ Ta	73	180,94803	-	-

Нуклид ^A X	Z	Атомная масса, аем	Тип распада	T _{1/2}
¹⁸² Ta	74	181,95018	β-, γ	115,1 сут
¹⁸² W		181,94824	-	-
¹⁸³ W		182,95027	-	-
¹⁸⁴ W		183,95097	-	-
¹⁸⁵ W		184,95347	β-, γ	74,0 сут
¹⁸⁵ Re	75	184,95301	-	-
¹⁸⁷ Re		186,95579	β-	4,3·10 ¹⁰ лет
¹⁸⁸ Re		187,95815	β-, γ	16,9 ч
¹⁹⁰ Os	76	189,95848	-	-
¹⁹¹ Os		190,96096	β-, γ	15,0 сут
¹⁹² Os		191,96151	-	-
¹⁹³ Os		192,96413	β-, γ	32,0 ч
¹⁹⁰ Ir	77	189,96068	κ, γ	12,0 сут
¹⁹¹ Ir		190,96063	-	-
¹⁹³ Ir		192,96291	-	-
¹⁹⁴ Ir		193,96507	β-, γ	19,0 ч
¹⁹³ Pt	78	192,96298	κ	500 лет
¹⁹⁴ Pt		193,96266	-	-
¹⁹⁵ Pt		194,96481	-	-
¹⁹⁶ Pt		195,96497	-	-
¹⁹⁷ Pt		196,96735	β-, γ	18,0 ч
¹⁹⁷ Au	79	196,96655	-	-
¹⁹⁸ Au		197,96822	β-, γ	64,8 ч
²⁰² Hg	80	201,97064	-	-
²⁰³ Hg		202,97287	β-, γ	46,6 сут
²⁰³ Tl	81	202,97235	-	-
²⁰⁴ Tl		203,97387	β-, κ	3,78 лет
²⁰⁵ Tl		204,97444	-	-
²⁰⁶ Tl		205,97612	β-	4,19 мин
²⁰⁴ Pb	82	203,97305	-	-
²⁰⁶ Pb		205,97447	-	-
²⁰⁷ Pb		206,97590	-	-
²⁰⁸ Pb		207,97666	-	-
²¹⁰ Pb		209,98420	β-, γ	21,3 года
²¹¹ Pb		210,98877	β-, γ	36,1 мин
²¹² Pb		211,99190	β-, γ	10,64 ч
²¹⁴ Pb		213,99984	β-, γ	26,8 мин
²⁰⁹ Bi	83	208,98040	-	-
²¹⁰ Bi		209,98413	β- (α)	5,0 сут
²¹¹ Bi		210,98729	α (99,68%)	2,16 мин
²¹² Bi		211,99128	β- (65,3%), α (33,7%), γ	60,6 мин
²¹⁴ Bi		213,99873	α (0,04%), β- (99,96%), γ	19,7 мин
²¹⁰ Po	84	209,98288	α, γ	138,4 сут
²¹¹ Po		210,98666	α, γ	0,52 с
²¹² Po		211,98887	α	0,3 мкс
²¹⁵ Po		214,99945	α, (β-)	1,78 мс

Нуклид ^A X	Z	Атомная масса, аем	Тип распада	T _{1/2}
²¹⁶ Po		216,00192	α	0,145 с
²¹⁸ Po		218,00900	α , (β^-)	3,05 мин
²¹¹ At	85	210,98751	α (40%), κ (60%)	7,2 ч
²¹² At		211,99074	α	0,3 с
²¹⁸ At		218,00871	α , (β^-)	1,5 с
²¹⁹ Rn	86	219,00950	α , γ	4 с
²²⁰ Rn		220,01139	α , (γ)	55,3 с
²²² Rn		222,01760	α , (γ)	3,82 сут
²²² Fr	87	222,01756	β^- (99%), α (0,1%)	14,8 мин
²²³ Fr		223,01976	β^- , γ	22,0 мин
²²⁴ Ra	88	224,02021	α , γ	3,64 сут
²²⁵ Ra		225,02365	β^- , γ	14,8 сут
²²⁶ Ra		226,02543	α , (γ)	1620 лет
²²⁷ Ra		227,02920	β^- , γ	41,2 мин
²²⁸ Ra		228,03109	β^- , γ	5,7 лет
²²⁷ Ac	89	227,02777	β^- (99,75%), α (1,25%), γ	21,6 лет
²²⁸ Ac		228,03103	β^- , γ	6,13 ч
²²⁸ Th	90	228,02873	α , γ	1,91 года
²²⁹ Th		229,03178	α , γ	7340 лет
²³⁰ Th		230,03315	α	$8 \cdot 10^4$ лет
²³¹ Th		231,03631	β^- , γ	25,64 ч
²³² Th		232,03807	α , γ	$1,39 \cdot 10^{10}$ лет
²³³ Th		233,04160	β^- , (γ)	22,12 мин
²³⁴ Th		234,04363	β^- , γ	24,1 дня
²³¹ Pa	91	231,03590	α , γ	$3,48 \cdot 10^4$ лет
²³⁴ Pa		234,04335	β^- , γ	6,75 ч
²³³ U	92	233,03965	α , (γ)	$1,65 \cdot 10^5$ лет
²³⁴ U		234,04097	α , (γ)	$2,48 \cdot 10^5$ лет
²³⁵ U		235,04394	α , γ	$7,13 \cdot 10^8$ лет
²³⁶ U		236,04560	α	$2,39 \cdot 10^7$ лет
²³⁸ U		238,05081	α , (γ)	$4,51 \cdot 10^9$ лет
²³⁹ U		239,05432	β^- , γ	23,54 мин
²⁴⁰ U		240,05616	β^- , γ	14,1 ч
²³⁶ Np	93	236,04663	β^- (33%), κ (67%), γ	22,0 ч
²³⁷ Np		237,04819	α , γ	$2,14 \cdot 10^6$ лет
²³⁸ Np		238,05097	β^- , γ	2,1 сут
²³⁹ Np		239,05295	β^- , γ	2,35 сут
²³⁶ Pu	94	236,04605	α , γ	2,85 лет
²³⁸ Pu		238,04958	α , γ	86,4 лет
²³⁹ Pu		239,052137	α , γ	$2,44 \cdot 10^4$ лет
²⁴⁰ Pu		240,05382	α , γ	6240 лет
²⁴² Am	95	242,05957	β^- (60%), κ , γ	16,01 ч
²⁴³ Am		243,01139	α , γ	$7,95 \cdot 10^3$ лет
²⁴² Cm	96	242,05885	α , γ	163 сут
²⁴³ Cm		243,06140	α , γ	32 лет

Нуклид ^A X	Z	Атомная масса, аем	Тип распада	T _{1/2}
²⁴⁴ Cm		244,06276	α	18,1 лет
²⁴³ Bk	97	243,06302	α (0,1%), κ	4,6 ч
²⁴⁵ Bk		245,06638	κ (99%), α	5,0 ч
²⁴⁴ Cf	98	244,06599	α	19,7 мин
²⁴⁵ Cf		245,06806	α, κ	44 мин
²⁴⁶ Cf		246,06883	α, γ	35,7 ч
			f	1500 лет
²⁴⁸ Cf		248,07220	α, γ	350 сут
			f	4·10 ⁴ лет
²⁵¹ Cf		251,07960	α, γ	1600 лет
²⁵² Cf		252,08165	α, γ	2,65 лет
²⁵³ Cf	253,08517	β-, (α)	17,6 сут	
²⁵⁴ Es	99	254,08805	α, γ	270 сут
²⁵⁵ Es		-	β-, γ	35 сут
²⁵³ Fm	100	253,08520	α, κ	3,0 сут
²⁵⁴ Fm		254,08688	α, γ	3,24 ч

Приложение Б

Линейные коэффициенты ослабления гамма-излучения

E_γ , МэВ	Воздух, см^{-1}	Al, см^{-1}	Pb, см^{-1}	Sn, см^{-1}	Fe, см^{-1}	C, см^{-1}	NaI, см^{-1}	Cu, см^{-1}	Ti, см^{-1}
0,01	$6,22 \cdot 10^{-3}$	69,9	1390	977	1330	4,82	499	1910	490
0,015	$1,87 \cdot 10^{-3}$	20,2	1210	322	440	1,55	165	653	157
0,02	$0,876 \cdot 10^{-3}$	8,61	939	145	196	0,830	74,8	296	68,8
0,03	$0,393 \cdot 10^{-3}$	2,70	323	292	61,3	0,495	24,2	92,9	21,1
0,04	$0,283 \cdot 10^{-3}$	1,33	151	138	26,8	0,419	66,7	41,2	9,27
0,05	$0,243 \cdot 10^{-3}$	0,861	82,1	75,1	14,2	0,389	37,0	21,8	4,95
0,06	$0,224 \cdot 10^{-3}$	0,656	50,8	45,8	8,72	0,371	22,8	13,2	3,10
0,08	$0,204 \cdot 10^{-3}$	0,489	23,6	20,9	4,22	0,349	10,4	6,17	1,62
0,1	$0,193 \cdot 10^{-3}$	0,424	60,3	11,4	2,60	0,333	5,68	3,66	1,09
0,145	$0,174 \cdot 10^{-3}$	0,362	24,6	4,50	1,51	0,302	2,26	1,88	0,702
0,15	$0,172 \cdot 10^{-3}$	0,356	21,8	4,07	1,39	0,299	2,06	1,79	0,680
0,2	$0,158 \cdot 10^{-3}$	0,321	10,7	2,17	1,06	0,274	1,11	1,28	0,554
0,279	$0,141 \cdot 10^{-3}$	0,286	4,65	1,25	0,865	0,245	0,642	1,02	0,468
0,3	$0,137 \cdot 10^{-3}$	0,278	4,25	1,10	0,833	0,238	0,565	0,946	0,450
0,4	$0,123 \cdot 10^{-3}$	0,248	2,44	0,787	0,717	0,214	0,403	0,811	0,399
0,412	$0,122 \cdot 10^{-3}$	0,245	2,32	0,765	0,707	0,212	0,392	0,799	0,362
0,5	$0,112 \cdot 10^{-3}$	0,226	1,70	0,647	0,646	0,196	0,332	0,728	0,392
0,6	$0,104 \cdot 10^{-3}$	0,209	1,33	0,566	0,595	0,181	0,289	0,668	0,362
0,662	$0,100 \cdot 10^{-3}$	0,201	1,18	0,531	0,570	0,173	0,271	0,638	0,322
0,8	$0,091 \cdot 10^{-3}$	0,184	0,952	0,473	0,520	0,159	0,241	0,581	0,293
1	$0,082 \cdot 10^{-3}$	0,165	0,771	0,414	0,467	0,143	0,211	0,522	0,264
1,25	$0,073 \cdot 10^{-3}$	0,148	0,658	0,368	0,422	0,128	0,187	0,472	0,238
1,5	$0,067 \cdot 10^{-3}$	0,135	0,577	0,334	0,381	0,116	0,179	0,427	0,215
2	$0,057 \cdot 10^{-3}$	0,116	0,508	0,297	0,333	0,100	0,150	0,374	0,187
2,75	$0,047 \cdot 10^{-3}$	0,099	0,476	0,272	0,291	0,083	0,136	0,330	0,162
3	$0,046 \cdot 10^{-3}$	0,096	0,468	0,266	0,284	0,080	0,134	0,320	0,158
4	$0,040 \cdot 10^{-3}$	0,084	0,472	0,259	0,260	0,068	0,128	0,296	0,143
5	$0,036 \cdot 10^{-3}$	0,076	0,481	0,257	0,248	0,061	0,127	0,284	0,134
6	$0,033 \cdot 10^{-3}$	0,072	0,494	0,260	0,240	0,056	0,127	0,277	0,130
8	$0,029 \cdot 10^{-3}$	0,066	0,520	0,269	0,234	0,049	0,130	0,272	0,124
10	$0,026 \cdot 10^{-3}$	0,063	0,550	0,281	0,234	0,044	0,134	0,275	0,123

Приложение В

Линейные коэффициенты передачи энергии

E_γ , МэВ	Воздух, см^{-1}	Al, см^{-1}	Pb, см^{-1}	Sn, см^{-1}	Fe, см^{-1}	C, см^{-1}	NaJ, см^{-1}	Cu, см^{-1}	Ti, см^{-1}
0,010	$6,01 \cdot 10^{-3}$	68,6	1390	955	1080	4,50	484	1360	447
0,015	$1,68 \cdot 10^{-3}$	19,8	1000	316	387	1,22	161	527	148
0,020	$0,681 \cdot 10^{-3}$	8,26	774	143	178	0,486	73,9	252	65,7
0,030	$0,194 \cdot 10^{-3}$	2,31	285	110	56,7	0,144	23,5	83,4	19,9
0,040	$0,0867 \cdot 10^{-3}$	0,953	136	72,9	24,7	0,0734	31,0	37,2	8,55
0,050	$0,0522 \cdot 10^{-3}$	0,489	75,5	46,6	12,7	0,0531	21,0	19,6	4,33
0,060	$0,0389 \cdot 10^{-3}$	0,292	46,5	31,1	7,48	0,0468	14,4	11,5	2,51
0,080	$0,0309 \cdot 10^{-3}$	0,146	21,5	15,5	3,21	0,0457	7,33	4,96	1,08
0,100	$0,0300 \cdot 10^{-3}$	0,101	25,3	8,75	1,70	0,0482	4,18	2,62	0,580
0,145	$0,0319 \cdot 10^{-3}$	0,0759	13,8	3,21	0,668	0,0544	1,61	0,973	0,252
0,150	$0,0322 \cdot 10^{-3}$	0,0748	12,9	3,05	0,618	0,0551	1,50	0,911	0,238
0,200	$0,0345 \cdot 10^{-3}$	0,0734	7,09	1,46	0,376	0,0598	0,733	0,514	0,165
0,300	$0,0371 \cdot 10^{-3}$	0,0759	2,94	0,606	0,263	0,0646	0,307	0,332	0,135
0,400	$0,0381 \cdot 10^{-3}$	0,0772	1,93	0,378	0,238	0,0664	0,194	0,279	0,129
0,500	$0,0384 \cdot 10^{-3}$	0,0783	1,08	0,294	0,230	0,0668	0,151	0,264	0,126
0,600	$0,0381 \cdot 10^{-3}$	0,0764	0,811	0,253	0,223	0,0666	0,129	0,254	0,124
0,800	$0,0372 \cdot 10^{-3}$	0,0748	0,550	0,212	0,214	0,0648	0,108	0,240	0,119
1,000	$0,0361 \cdot 10^{-3}$	0,0724	0,429	0,190	0,204	0,0628	0,0972	0,229	0,115
1,250	$0,0344 \cdot 10^{-3}$	0,0688	0,363	0,176	0,196	0,0601	0,0887	0,217	0,110
1,500	$0,0328 \cdot 10^{-3}$	0,0656	0,313	0,165	0,187	0,0574	0,0840	0,208	0,104
2,000	$0,0302 \cdot 10^{-3}$	0,0608	0,277	0,153	0,174	0,0526	0,0777	0,194	0,0976
2,750	$0,0274 \cdot 10^{-3}$	0,0556	0,269	0,149	0,163	0,0475	0,0759	0,182	0,0918
3,000	$0,0266 \cdot 10^{-3}$	0,0545	0,268	0,149	0,161	0,0461	0,0752	0,181	0,090
4,000	$0,0242 \cdot 10^{-3}$	0,0508	0,281	0,154	0,156	0,0416	0,0763	0,178	0,086
5,000	$0,0225 \cdot 10^{-3}$	0,0486	0,299	0,161	0,156	0,0385	0,0796	0,179	0,085
6,000	$0,0213 \cdot 10^{-3}$	0,0472	0,313	0,168	0,157	0,0362	0,0825	0,183	0,085
8,000	$0,0196 \cdot 10^{-3}$	0,0459	0,339	0,182	0,163	0,0331	0,0880	0,189	0,086
10,00	$0,0186 \cdot 10^{-3}$	0,0454	0,359	0,192	0,167	0,0310	0,0924	0,196	0,088

Приложение Г

Массово-энергетические соотношения

	г	аеи	эВ	эрг	Дж	кал	кгм
1 г	1	$6,018 \cdot 10^{23}$	$5,610 \cdot 10^{32}$	$8,986 \cdot 10^{20}$	$8,986 \cdot 10^{13}$	$2,174 \cdot 10^{13}$	$9,165 \cdot 10^{12}$
1 аеи	$1,660 \cdot 10^{-24}$	1	$9,3148 \cdot 10^8$	$1,492 \cdot 10^{-3}$	$1,492 \cdot 10^{-10}$	$3,566 \cdot 10^{-11}$	$1,521 \cdot 10^{-11}$
1 эВ	$1,782 \cdot 10^{-33}$	$1,074 \cdot 10^{-9}$	1	$1,602 \cdot 10^{-12}$	$1,602 \cdot 10^{-19}$	$3,827 \cdot 10^{-20}$	$1,634 \cdot 10^{-20}$
1 эрг = = $1 \cdot 10^7$ Втс	$1,113 \cdot 10^{-21}$	671	$6,240 \cdot 10^{11}$	1	$1 \cdot 10^{-7}$	$2,389 \cdot 10^{-8}$	$1,019 \cdot 10^{-8}$
1 Дж	$1,114 \cdot 10^{-14}$	$6,708 \cdot 10^9$	$6,250 \cdot 10^{18}$	$1 \cdot 10^7$	1	0,239	0,102
1 кал	$4,657 \cdot 10^{-14}$	$2,803 \cdot 10^{10}$	$2,612 \cdot 10^{19}$	$4,185 \cdot 10^7$	4,185	1	0,427
1 кгм	$1,091 \cdot 10^{-13}$	$6,568 \cdot 10^{10}$	$6,120 \cdot 10^{19}$	$9,807 \cdot 10^{19}$	9,807	2,343	1

Приложение Д

Численное значение некоторых физических постоянных

Наименование	Численное значение, размерность
Скорость света в абсолютном вакууме	$c = 2,99793 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Авогадро	$N_A = 6,02209 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Постоянная Больцмана	$K = 1,38066 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Постоянная Планка	$h = 6,62617 \cdot 10^{-34}$ Дж·с = $4,1 \cdot 10^{-15}$ эВ·с
Приведённая постоянной Планка	$\hbar = 1,0546 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Газовая универсальная постоянная	$R = 8,31441$ Дж/моль·К
Молярный объем идеального газа	$V_m = 22,41383 \cdot 10^{-3}$ м ³ /моль
Заряд электрона	$q_e = 1,60219 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса электрона	$m_e = 9,10953 \cdot 10^{-31}$ кг = 0,0005 аеи = 0,511 МэВ
Масса протия	$m_{1H} = 1,67332 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса протона	$m_p = 1,67265 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,007276 аеи = 938,26 МэВ
Масса нейтрона	$m_n = 1,67496 \cdot 10^{-27}$ кг = 1,008665 аеи = 939,55 МэВ
Масса α-частицы	$m_\alpha = 6,64783 \cdot 10^{-27}$ кг
Классический радиус электрона	$r_e = 2,81785 \cdot 10^{-15}$ м
Магнетон Бора	$M_B = 9,27 \cdot 10^{-24}$ А·м ²
Ядерный магнетон	$\mu_B = 5,05 \cdot 10^{-27}$ А·м ²
Магнитный момент протона	$\mu_p = 2,79 \mu_B$
Магнитный момент нейтрона	$\mu_n = -1,9131 \mu_B$
Атомная единица массы (аеи)	1 аеи = $1,6605655 \cdot 10^{-27}$ кг
Атомная единица энергии (аеэ)	1 аеэ = 931,5016 МэВ
Астрономический год	365,2422 суток $8,7658 \cdot 10^3$ $5,2595 \cdot 10^5$ минут $3,1557 \cdot 10^7$ секунд

Приложение Е

Плотность и атомный (молекулярный) вес некоторых веществ

Вещество	Плотность, г/см ³	Атомная (молекулярная) масса, аем
Азот	$1,251 \cdot 10^{-3}$	14,007
Алюминий	2,70	26,98
Бериллий	1,83	9,012
Бор	2,45	10,81
Висмут	9,80	208,98
Воздух	$1,29 \cdot 10^{-3}$	28,98
Графит	1,60	12,01
Железо	7,87	55,84
Золото	19,32	196,97
Кадмий	8,65	112,41
Калий	0,86	39,098
Карбид бора (B ₄ C)	2,50	55,29
Кобальт	8,90	58,93
Литий	0,53	6,94
Магний	1,74	24,305
Медь	8,93	63,54
Натрий хлористый	2,16	58,44
Никель	8,90	58,70
Окись бериллия	3,03	25,01
Олово	7,40	118,60
Платина	21,50	195,0
Плутоний	19,80	244
Ртуть	13,60	200,5
Свинец	11,34	207,2
Серебро	10,50	107,87
Торий	11,70	232,04
Тяжелая вода	1,10	20,03
Цинк	7,00	65,38
Цинк сернистый	4,10	97,45
Уран	18,70	238,02

Приложение Ж

Соотношения между единицами измерения характеристик поля излучений

Величина и ее символ	Единицы измерения в СИ	Единица измерения внесистемные	Соотношения между единицами
Плотность потока энергии φ	Вт·м ⁻²	МэВ·см ⁻² ·с ⁻¹	1 МэВ·см ⁻² ·с ⁻¹ = 1,6·10 ⁻⁹ Вт·м ⁻²
Плотность потока частиц φ_N	м ⁻² ·с ⁻²	част·см ² ·мин	1 част·см ² ·мин = 1,67 м ⁻² ·с ⁻²
Поток энергии Φ	Дж·с ⁻²	МэВ·с ⁻¹	1 МэВ·с ⁻¹ = 1,6·10 ⁻¹³ Дж·с ⁻²
Поток частиц Φ_N	с ⁻¹	част·с ⁻¹	
Флюенс энергии F	Дж·м ⁻²	МэВ·см ⁻²	1 МэВ·см ⁻² = 1,6·10 ⁻⁹ Дж·м ⁻²
Флюенс частиц F_N	м ⁻²	част·см ⁻²	1 част·см ⁻² = 1·10 ⁴ м ⁻²

Приложение З

Основные дозиметрические величины

Величина	Единицы СИ			Внесистемные единицы		
	Наименование	Обозначение		Наименование	Обозначение	
		Русское	Международное		Русское	Международное
Активность	Беккерель	Бк	Bs	Кюри Распад в секунду Распад в минуту	Ки расп/с расп/мин	Ci 1/s 1/min
Поглощенная доза	Грэй	Гр	Gy	Рад	рад	rad,rd
Мощность поглощенной дозы	Грэй в секунду	Гр/с	Gy/s	Рад в секунду Рад в час	рад/с рад/ч	rad/s rad/h
Экспозиционная доза	Кулон на килограмм	Ки/кг	C/kg	Рентген	Р	R
Мощность экспозиционной дозы	Ампер на килограмм	А/кг	A/kg	Рентген в секунду Рентген в час	Р/с Р/ч	R/s R/h
Эквивалентная доза	Зиверт	Зв	Sv	Бэр	бэр	rem
Мощность эквивалентной дозы	Зиверт в секунду	Зв/с	Sv/s	Бэр в секунду Бэр в час	бэр/с бэр/ч	rem/s rem/h

Приложение И

Соотношения между единицами измерения основных дозиметрических величин

Величина	СИ – внесистемные	Внесистемные - СИ
Активность	1 Бк = 1 расп/с = $2,7 \cdot 10^{-11}$ Ки 1 Бк = 60 расп/мин	1 Ки = $3,7 \cdot 10^{10}$ Бк = $2,22 \cdot 10^{12}$ расп/мин 1 расп/мин = $1,67 \cdot 10^{-2}$ Бк
Удельная актив- ность	1 Бк/м ³ = $2,7 \cdot 10^{-14}$ Ки/л 1 Бк/м ² = $0,27 \cdot 10^{-8}$ мкКи/см ² 1 Бк/м ² = $6 \cdot 10^{-3}$ расп/мин·см ²	1 Ки/л = $3,7 \cdot 10^{13}$ Бк/м ³ 1 мкКи/см ² = $2,22 \cdot 10^6$ расп/мин·см ² = = $3,7 \cdot 10^8$ Бк/м ² 1 расп/мин·см ² = 167 Бк/м ²
Поглощенная доза	1 Гр = 1 Дж/кг = 100 рад	1 рад = 0,01 Гр
Мощность по- глощенной дозы	1 Гр/с = 1 Вт/кг = 100 рад/с 1 Гр/с = $3,6 \cdot 10^5$ рад/ч	1 рад/ч = $2,78 \cdot 10^{-6}$ Гр/с 1 рад/ч = $2,4 \cdot 10^5$ бета-част./мин·см ²
Экспозиционная доза	1 Кл/кг = 3876 Р	1 Р = $2,58 \cdot 10^{-4}$ Кл/кг
Мощность экс- позиционной дозы	1 А/кг = $1,4 \cdot 10^7$ Р/ч 1 А/кг = $3,28 \cdot 10^3$ Р/с	1 Р/ч = $7,16 \cdot 10^{-8}$ А/кг = $2,78 \cdot 10^{-4}$ Р/с 1 Р/с = $3,05 \cdot 10^{-4}$ А/кг = 3600 Р/ч
Эквивалентная доза	1 Зв = 1 Дж/кг = 100 бэр	1 бэр = 0,01 Зв
Мощность экви- валентной дозы	1 Зв/с = 100 бэр/с = $3,6 \cdot 10^5$ бэр/ч	1 бэр/ч = $2,78 \cdot 10^{-6}$ Зв/с = $2,78 \cdot 10^{-4}$ бэр/с 1 бэр/с = 0,01 Зв/с = 3600 бэр/ч

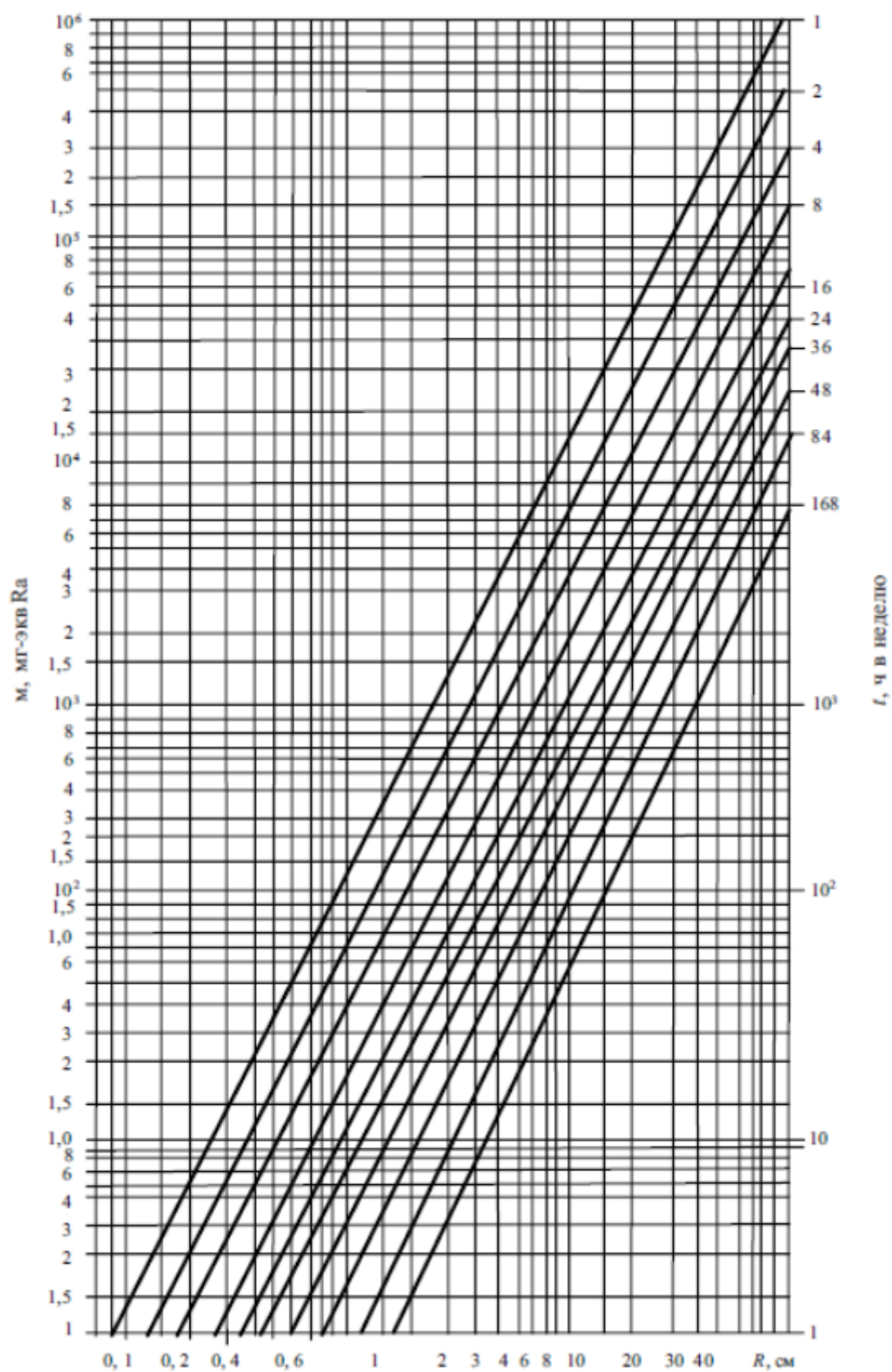
Приложение К

Гамма-постоянные некоторых радионуклидов по мощности эффективной дозы Γ_E , мощности воздушной кермы Γ_K и мощности экспозиционной дозы Γ_X

Радионуклид	$T_{1/2}$	Γ_E , (мкЗв·м ²)/(Бк·ч)	Γ_K , (мкГр·м ²)/(Бк·ч)	Γ_X , (Р·см ²)/(мКи·ч)
³ H	12,34 лет	0	0	0
¹⁴ C	5730 лет	0	0	0
⁵¹ Cr	27,7 сут	$3,4 \cdot 10^{-9}$	$4,2 \cdot 10^{-9}$	0,258
⁵⁴ Mn	312,3 сут	$8,6 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	0,106
⁵⁹ Fe	45,1 сут	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	6,157
⁵⁸ Co	70,2 сут	$1 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	6,724
⁶⁰ Co	5,27 лет	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	13
⁶⁵ Zn	244,3 сут	$6 \cdot 10^{-8}$	$7,3 \cdot 10^{-8}$	3,056
⁹⁰ Sr + ⁹⁰ Y	28,6 лет	0	0	0
⁹⁵ Zr + ^{95m} Nb	64,05 сут	$7,6 \cdot 10^{-8}$	$9,9 \cdot 10^{-8}$	4,139
⁹⁵ Nb	34,97 сут	$7,9 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	4,269
¹⁰⁶ Ru + ¹⁰⁶ Rh	368,2 сут	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$2,7 \cdot 10^{-8}$	1,152
¹³¹ I	8,04 сут	$3,9 \cdot 10^{-8}$	$5,1 \cdot 10^{-8}$	2,156
¹³⁴ Cs	2,062 лет	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	8,724
¹³⁷ Cs + ^{137m} Ba	30,17 лет	$6,2 \cdot 10^{-8}$	$7,7 \cdot 10^{-8}$	3,1
¹⁴⁴ Ce + ¹⁴⁴ Pr + ^{144m} Pr	284,8 сут	$3,1 \cdot 10^{-9}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$	0,129
¹⁹² Ir	74,92 сут	$8,3 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$	4,605
²³⁹ Pu	2411 лет	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$	

Приложение Л

Номограмма для расчета защиты временем, количеством и расстоянием



Приложение М

Характеристики неорганических сцинтилляторов

Сцинтиллятор (активатор)	Плотность, г/см ³	Эффективный атомный номер	Конверсионная эффективность η_k , %	Постоянная времени свечения τ , мкс	Средняя длина волны испускаемых квантов λ , нм	Вид регистрируемого излучения
ZnS (Ag)	4,1	27	28,0	1	450	α , β
CdS (Ag)	4,8	44	20,0	1	760	α
NaI (Tl)	3,67	50	8,4	0,25	410	β , γ
CsI (Tl)	4,51	54	3,0	0,5	560	α , β , γ
LiI (Eu)	4,06	52	3,0	1	460	n
LiI (Sn)	4,06	52	1,0	1,2	450	n
KI (Tl)	3,13	49	2,5	1	410	β , γ
CaWO ₄	6,1	59	4,0	6	430	α , β , γ

Приложение Н

Характеристики органических сцинтилляторов

Сцинтиллятор	Плотность, г/см ³	Эффективный атомный номер	Конверсионная эффективность η_k , %	Постоянная времени свечения τ , нс	Средняя длина волны испускаемых квантов λ , нм	Вид регистрируемого излучения
Антрацен	1,25	5,8	6,0	27	445	β , γ
Трансстильбен	1,16	5,7	2,5	6	410	α , β , γ
Толан	1,18	5,8	2,8	4	390	γ
Нафталин	1,15	5,8	1,0	75	345	α , γ
Пара-терфенил	1,23	5,8	2,8	10	415	α , β , γ

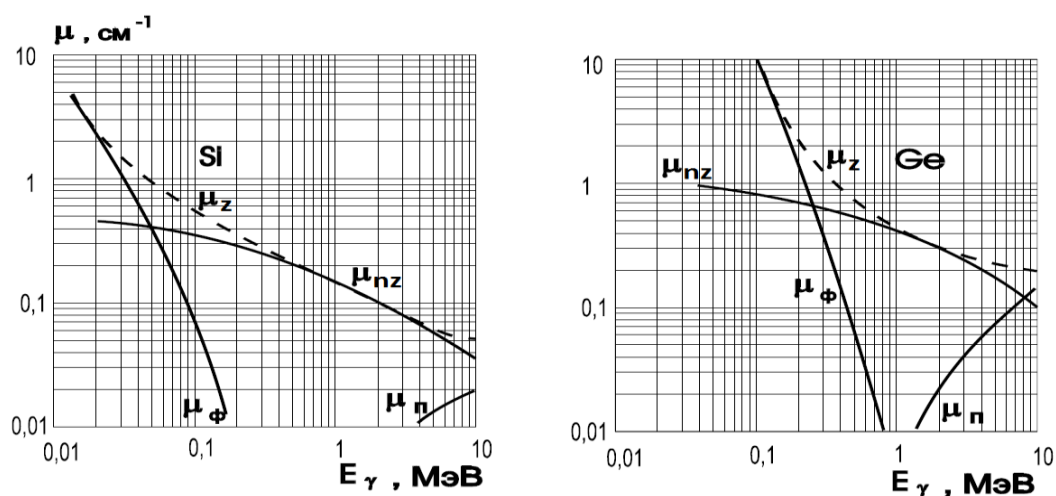
Приложение О

Характеристики различных материалов для ППД

Тип материала	Атомный номер Z	Плотность ρ , г/см ³	Диэлектрическая проницаемость ε	Температура работы детектора T, К	Средняя энергия образования пары носителей «электрон-дырка» ω , эВ	Подвижность		Среднее время жизни	
						электронов K_n , см ² /В·с	дырок K_p , см ² /В·с	электронов τ_n , с	дырок τ_p , с
Si	14	2,33	11,7	77	3,76	$2,1 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
				300	3,61	1350	480	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
Ge	32	5,33	16	77	2,98	$3,6 \cdot 10^4$	$4,5 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-5}$
				300	—	3900	1900	—	—
C (алмаз)	12	3,55	5,7	300	18 – 20	1800	1200	—	—
CdTe	48; 52	6,06	10,3	300	4,43	1000	80	10^{-6}	$2 \cdot 10^{-7}$
GaAs	31; 33	5,32	12,9	300	4,2	$8 \cdot 10^3$	450	10^{-6}	10^{-8}
HgI ₂	80; 53	6,4	8,5 – 25,9	300	4,2	100	4	10^{-6}	10^{-6}
CdS	48; 16	4,82	9	300	—	300	15	10^{-3}	10^{-8}
Воздух	—	$1,29 \cdot 10^{-3}$	1,0006	при любой	34	1,91	1,37	—	—

Приложение П

Зависимость линейных коэффициентов от энергии гамма-кванта в кремнии и германии



μ_z – линейный коэффициент ослабления; μ_{nz} – линейный коэффициент передачи энергии; μ_ϕ – линейный коэффициент фотоэлектрического поглощения излучения; μ_n – линейный коэффициент поглощения излучения.