

Л.А. Ильин, И.П. Коренков, Б.Я. Наркевич

# Радиационная гигиена

---

Учебник

5-е издание,  
переработанное и дополненное



Москва  
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА  
«ГЭОТАР-Медиа»  
2017

# Глава 2

## ЭЛЕМЕНТЫ РАДИАЦИОННОЙ ФИЗИКИ

### 2.1. РАДИОАКТИВНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Радиоактивность — самопроизвольное превращение ядер атомов одних элементов в другие, сопровождающееся испусканием ионизирующего излучения.

#### Виды радиоактивных превращений

1.  **$\alpha$ -Распад** характерен для естественных радиоактивных элементов с большим порядковым номером — элементы с малыми энергиями связи. Реакция этого превращения может быть показана на примере распада радия:



Таким образом,  $\alpha$ -распад приводит к уменьшению порядкового номера вещества на 2 единицы и массового числа на 4 единицы.

Закон превращения ядра при  $\alpha$ -распаде в общем виде может быть записан следующим образом:



где  $X$  — символ исходного ядра;  $Y$  — символ ядра — продукта распада.

**$\alpha$ -Частицы**, т.е. ядра двукратно ионизированного атома гелия, испускаемые этим радионуклидом, по своей энергии или однородны, или разделяются на небольшое число групп. Испускание  $\alpha$ -частиц разной энергии ядрами одного и того же вида может происходить с различных энергетических уровней. Поэтому при распаде могут возникать возбужденные ядра (продукты распада), которые, переходя в основное состояние, испускают  $\gamma$ -кванты. Наблюдаемые на опыте значения энергий  $\gamma$ -квантов равны разности энергий соответствующих двух групп  $\alpha$ -частиц (с учетом энергии ядра отдачи).

2. **Электронный  $\beta$ -распад** характерен для естественных и искусственных радиоактивных элементов и может быть представлен примером:



т.е. ядро испускает электрон, в результате чего возникает ядро нового элемента при неизменном массовом числе. Энергетический спектр  $\beta$ -частиц непрерывный; испускаемые  $\beta$ -частицы имеют энергию от нулевой до максимальной для

этого радионуклида. В общем виде электронный распад может быть записан следующим образом:



При испускании  $\beta$ -частиц ядра атомов находятся в возбужденном состоянии. Переход их в невозбужденное состояние сопровождается испусканием  $\gamma$ -квантов. Для ряда радиоактивных распадов такое испускание происходит не мгновенно, а с определенным запаздыванием — изомерный переход. Его обозначают латинской буквой  $m$  сразу после массового числа. Например, наиболее применяемый в медицинской диагностике радиоактивный изотоп  ${}^{99m}\text{Tc}$  распадается с испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией 140 кэВ и периодом полураспада 6 ч по схеме:



3. **Позитронный  $\beta$ -распад** наблюдают у некоторых искусственных радиоактивных изотопов, например:



и в общем виде:



Следовательно, при позитронном распаде порядковый номер распадающегося атома уменьшается на единицу, а масса практически не меняется. Аналогично спектру энергии электронного  $\beta$ -распада спектр энергии позитронного распада непрерывен.

4. **К-захват (захват орбитального электрона ядром)**, при котором ядро захватывает электрон с К-оболочки и происходит такое же превращение ядра, как и при позитронном распаде:



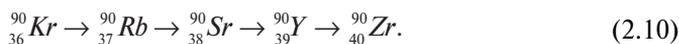
В общем виде реакция может быть записана так:



Позитронный распад и К-захват — конкурирующие процессы. Если возможно испускание позитрона, то возможен и К-захват. Если энергия  $\gamma$ -кванта меньше энергии покоя электрона ( $E_0 < m_0 c^2$ ), единственный энергетически возможный процесс — К-захват. При нем единственная вылетающая из ядра частица — нейтрино. При К-захвате возникает фотонное излучение, энергия которого однозначно характеризует химический тип нуклида  $Y$  в соответствии с формулой 2.9.

5. **Деление ядер** наблюдают у радиоактивных элементов с большим атомным номером (например,  ${}^{235}\text{U}$ ,  ${}^{239}\text{Pu}$  и др.) при захвате их ядрами медленных нейтронов.

Одни и те же ядра при делении формируют разные пары осколков — ядра элементов средних массовых чисел. В результате деления тяжелых ядер образуются осколки с избыточным числом нейтронов. Эти осколки часто претерпевают несколько последовательных  $\beta$ -распадов, например:



Возникающие при делении тяжелых ядер ядра легких элементов имеют большую энергию связи, приходящуюся на одну частицу. При этом выделяется энергия, соответствующая разнице энергии связи частиц в ядрах тяжелых и легких элементов. Это явление служит для получения ядерной энергии. Если возникающие при делении одного ядра нейтроны вновь используются для последующего деления других ядер, реакция будет цепной. Условия для такой реакции создают в ядерных реакторах. Если цепная реакция нарастает лавинообразно в результате выделения энергии в течение короткого промежутка времени, происходит взрыв. Это возможно тогда, когда масса способного к делению материала достигает критической величины (например, в атомных зарядах при их взрыве).

**6. Термоядерные реакции** протекают лишь при температуре нескольких миллионов градусов. В этих условиях ядра легких элементов, двигаясь с большой кинетической энергией, сближаются на малые расстояния и объединяются в ядра более тяжелых элементов. На этом принципе основано устройство термоядерных зарядов. Они состоят из плутониевого запала, служащего для создания высокой температуры, и смеси изотопов легкого элемента.

При изучении радиоактивного распада установлено, что не все ядра радиоактивного изотопа распадаются одновременно. В каждую единицу времени распадается лишь некоторая доля общего числа радиоактивного элемента. Эта неизменная для радиоактивного вещества величина, которая характеризует вероятность распада, названа постоянной распада и обозначена  $\lambda$ .

Отсюда закон радиоактивного распада сформулирован в виде простой зависимости:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 \exp\left(-\frac{t \ln 2}{T}\right), \quad (2.11)$$

где  $N$  — число не распавшихся к моменту времени  $t$  атомов;  $N_0$  — число радиоактивных атомов в нулевой момент времени;  $T$  — период полураспада — время, в течение которого распадается половина всех атомов этого радиоактивного изотопа.

В зависимости от периода полураспада различают ультракороткоживущие радионуклиды, период полураспада которых исчисляется секундами и минутами, короткоживущие — с периодами полураспада в несколько часов и суток, и долгоживущие радионуклиды, период полураспада которых — от нескольких месяцев до миллиардов лет.

Скорость ядерных превращений характеризуется активностью — числом ядерных превращений в единицу времени. Аналогично формуле (2.11) снижение активности радионуклидного источника со временем описывается такой же экспоненциальной зависимостью:

$$Q = Q_0 e^{-\frac{0,693t}{T}}, \quad (2.12)$$

где  $Q$  — активность источника в момент времени  $t$ ;  $Q_0$  — начальная активность,  $\ln 2 = 0,693$ ;  $T$  — период полураспада радиоактивного вещества источника.

За единицу активности радиоактивного вещества принимают **беккерель (Бк)** — одно превращение в секунду. Килобеккерель (кБк) —  $10^3$  Бк, мегабеккерель (МБк) —  $10^6$  Бк, гигабеккерель (ГБк) —  $10^9$  Бк, терабеккерель (ТБк) —  $10^{12}$  Бк, петабеккерель (ПБк) —  $10^{15}$  Бк. Внесистемная единица активности — **кюри (Ки)** — единица активности радиоактивных веществ — активность препарата изотопа, в котором в 1 с происходит  $3,7 \times 10^{10}$  ядерных превращений ( $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$ ).

Между активностью в единицах кюри и массой радиоактивных веществ в граммах существует определенная связь. Массу радионуклида  $M$  в граммах, активность которого  $Q$  кюри, период полураспада  $T$ , а атомная масса (массовое число)  $A$ , рассчитывают по соотношениям:

$$\begin{aligned} M &= 8,9 \times 10^{-14} ATQ \text{ (Т, с)} \\ M &= 5,3 \times 10^{-13} ATQ \text{ (Т, мин)} \\ M &= 3,2 \times 10^{-10} ATQ \text{ (Т, ч)} \\ M &= 7,7 \times 10^{-9} ATQ \text{ (Т, сут)} \\ M &= 2,8 \times 10^{-6} ATQ \text{ (Т, г)}. \end{aligned} \tag{2.13}$$

Отсюда понятно, что с уменьшением  $\lambda$  или увеличением  $T$  масса радиоактивного материала при одной и той же активности увеличивается. Так, для  $^{131}\text{I}$ , для которого период полураспада равен 8,06 сут, масса 1 Ки — 0,008 мг; масса 1 Ки  $^{238}\text{U}$ , для которого период полураспада равен 4,5 млрд лет, — около 3 т.

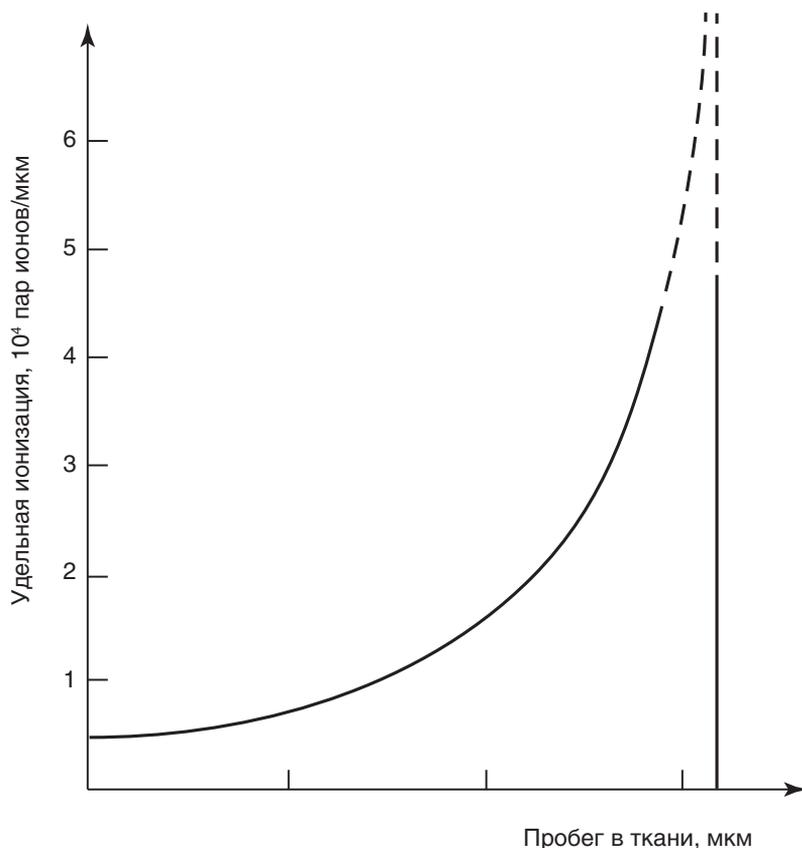
## 2.2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

### 2.2.1. Взаимодействие $\alpha$ -частиц с веществом

При взаимодействии  $\alpha$ -частиц с веществом их энергия идет на возбуждение и ионизацию атомов среды. Эти процессы происходят в результате неупругих столкновений частиц с орбитальными электронами атомов. Редко  $\alpha$ -частицы проникают в ядро, вызывая ядерную реакцию ( $\alpha, n$ ). Длина пробега  $\alpha$ -частиц в веществе зависит от их начальной энергии, от порядкового номера, атомной массы и плотности материала. Например, для воздуха при  $0^\circ\text{C}$  и атмосферном давлении 760 мм рт.ст. пробег (см)  $\alpha$ -частиц с энергией  $E_\alpha$  3–8 МэВ составляет по формуле Гейгера с погрешностью до 5%:

$$R_\alpha = 0,318 E_\alpha^{3/2}. \tag{2.14}$$

Число пар ионов на единицу пути пробега, возникающих при взаимодействии  $\alpha$ -частиц с веществом, зависит от глубины их проникновения. График изменения удельной плотности ионизации биологической ткани вдоль пробега  $\alpha$ -частицы  $^{210}\text{Po}$ , энергия которой равна 5,3 МэВ, представлен на рис. 2.1. В начале пробега  $\alpha$ -частицы удельная ионизация остается постоянной, а по мере снижения энергии частицы она резко возрастает, достигая максимума в конце пути.



**Рис. 2.1.** Изменение удельной плотности ионизации в биологической ткани вдоль пробега  $\alpha$ -частиц  $^{210}\text{Po}$  ( $E_\alpha = 5,3$  МэВ)

Обладая относительно большой массой и зарядом,  $\alpha$ -частицы имеют незначительную проникающую способность. Так, для  $\alpha$ -частиц с энергией 4 МэВ длина пробега в воздухе — 2,5 см, в биологической ткани — 31 мкм, в алюминии — 16 мкм. Для  $\alpha$ -частиц характерны высокие показатели линейной передачи энергии. Лист обычной бумаги полностью поглощает  $\alpha$ -частицы.

### 2.2.2. Взаимодействие $\beta$ -частиц с веществом

При прохождении  $\beta$ -частиц через вещество возможны упругие и неупругие взаимодействия с атомами поглощающей среды. Упругие взаимодействия — сумма кинетической энергии взаимодействующих частиц после взаимодействия остается неизменной. При неупругом взаимодействии часть энергии взаимодействующих частиц передается образовавшимся свободным частицам или квантам — неупругое рассеяние, ионизация и возбуждение атомов, возбуждение ядер, тормозное излучение.

При проникновении заряженной частицы в кулоновское поле ядра атома скорость ее меняется по величине и по направлению. Энергия тормозного из-

лучения тем больше, чем больше порядковый номер тормозящего вещества и меньше масса бомбардирующей частицы. Так, при энергии  $\beta$ -частиц или электронов около 1 МэВ ионизационные потери составляют примерно 95%, потери энергии на упругое соударение — 5%, потери на тормозное излучение ничтожны. Для свинца потери энергии на ионизацию и тормозное излучение становятся равными при  $E_\beta = 6,9$  МэВ. Для алюминия даже при  $E_\beta = 10$  МэВ потеря энергии на излучение составляет около 10% потерь энергии на столкновение с ядрами. Для определения пробега  $\beta$ -частиц в разных средах используют эмпирические формулы. Для воздуха:

$$R_\beta = 400 E_\beta \text{ (см)}.$$

Для легких материалов (алюминий, стекло):

$$\begin{aligned} R_\beta &= 0,2 E_\beta \text{ (см) при } E_\beta < 0,5 \text{ МэВ;} \\ R_\beta &= 0,1 E_\beta \text{ (см) при } E_\beta > 0,5 \text{ МэВ.} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Удельная плотность ионизации, создаваемая  $\beta$ -частицами, примерно в 1000 раз меньше, чем для  $\alpha$ -частиц той же энергии. Для  $\beta$ -частиц с энергией 4 МэВ длина пробега в воздухе составляет 17,8 м, в воде — 2,6 см, в алюминии — 9,8 мм.

При расчете защиты от  $\beta$ -излучения малых энергий, для которых ионизационные потери незначительны, необходима толщина защитного экрана равная или более максимального пробега частицы в этом материале. При этом следует использовать материалы с малым  $Z$  (плексиглас, алюминий). При высоких энергиях  $\beta$ -частиц часто необходима дополнительная защита от возникающего в экране тормозного рентгеновского излучения.

### 2.2.3. Взаимодействие рентгеновского и $\gamma$ -излучений с веществом

При прохождении пучка рентгеновского или  $\gamma$ -излучения через разные среды в результате взаимодействия квантов с веществом уменьшается его интенсивность. При этом каждый фотон выбывает из пучка в результате одиночного акта взаимодействия с веществом. Если излучение моноэнергетическое, то изменение интенсивности пучка с глубиной проникновения описывается простой зависимостью:

$$I_x = I_0 \times e^{-\mu x}, \quad (2.16)$$

где  $I_0$  и  $I_x$  — интенсивность пучка фотонов на входе и на выходе из слоя вещества толщиной  $x$ ;  $\mu$  — коэффициент ослабления излучения в этом веществе.

Поскольку  $x$  может быть выражено в сантиметрах или в граммах на 1 см<sup>2</sup>, а произведение в показателе степени формулы (2.16) должно быть безразмерным, то коэффициент ослабления  $\mu$ , соответственно, выражается в см<sup>-1</sup> (линейный коэффициент ослабления) или в см<sup>2</sup>/г (массовый коэффициент ослабления).

Изменение интенсивности излучения иногда выражают не коэффициентом ослабления, а слоем половинного ослабления  $\Delta$  — толщина поглоща-

ющей среды, при прохождении которой интенсивность излучения уменьшается в 2 раза. Этот показатель можно рассчитать по соотношению:

$$\Delta = \frac{0,693}{\mu}. \quad (2.17)$$

В области энергии квантов 60 кэВ–50 МэВ существуют процессы их взаимодействия с веществом:

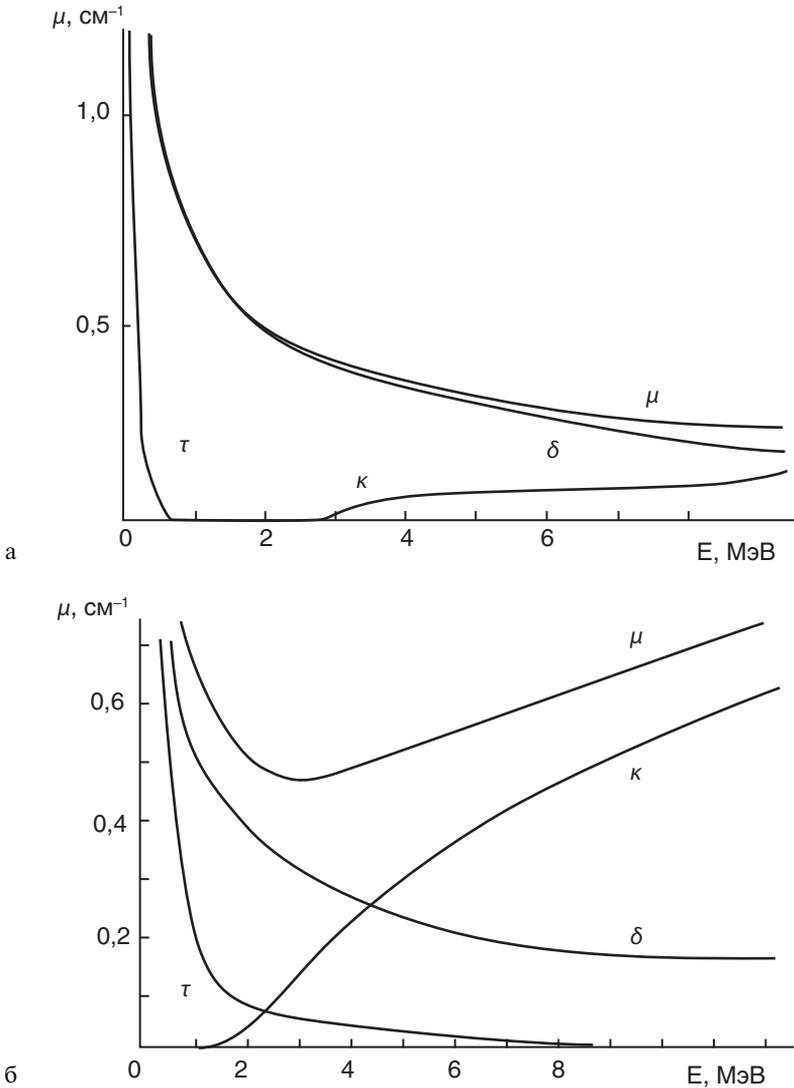
- фотоэлектрический эффект, при котором фотон передает свою энергию связанному электрону, причем часть энергии расходуется на преодоление связи электрона с атомом, а остальная превращается в кинетическую энергию электрона; этот эффект преобладает при энергиях 1–500 кэВ и уменьшается с увеличением энергии;
- рассеяние атомными электронами, в результате которого фотон отклоняется от своего первоначального направления с потерей или без потери энергии (комptonовское и релеевское рассеяние соответственно); при энергии, значительно превышающей энергию связи электронов — эффект Комптона; около 1 МэВ он является преобладающим видом взаимодействия; при малых энергиях фотонов преобладает эффект релеевского рассеяния;
- образование пар, при котором фотон в поле ядра атома исчезает и рождается пара электрон–позитрон, полная кинетическая энергия которой равна энергии фотона, уменьшенной на энергию покоя этих двух появившихся частиц; этот процесс наблюдают при энергии только более 1 МэВ, и он становится преобладающим видом взаимодействия при дальнейшем увеличении энергии.

Эти три процесса происходят независимо друг от друга, поэтому полный коэффициент ослабления  $\mu$  можно разбить на три части:  $\tau$  — для фотоэлектрического эффекта,  $\delta$  — для рассеяния и  $\kappa$  — для образования пар. Коэффициент ослабления равен сумме этих частей:

$$\mu = \tau + \delta + \kappa. \quad (2.18)$$

При небольшой энергии преобладает фотоэлектрическое поглощение, а при большой энергии ослабление полностью определяется образованием пар (рис. 2.2). Однако относительное значение каждого из этих видов взаимодействия меняется в зависимости от атомного номера поглощающего вещества. Для Al ( $Z=13$ ) в интервале 0,3–3 МэВ ослабление почти полностью связано с комptonовским рассеянием, а для Pb ( $Z = 82$ ) в интервале 3–5 МэВ все три главных процесса играют существенную роль.

По формуле 2.16 определяют интенсивность только первичного нерассеянного излучения, прошедшего через слой вещества  $x$ . Однако пренебречь квантами, испытавшими одно- и многократное рассеяние, можно лишь при коллимации пучка излучения, т.е. в геометрии узкого пучка. Если в пучке квантов доля рассеянного излучения велика, что существует при большой глубине проникновения фотонов в вещество, такой пучок называют широким пучком. При этом интенсивность излучения параллельного пучка  $I_x$  за защитой толщиной  $x$  с коэффициентом ослабления  $\mu$  определяют по формуле:



**Рис. 2.2.** Изменение  $\tau$ ,  $\delta$ ,  $\kappa$  и  $\mu$  в зависимости от энергии  $\gamma$ -излучения для вещества с малым  $Z$  (а — алюминий) и большим  $Z$  (б — свинец)

$$I_x = I_0 B(E_\gamma, Z, \mu x) \exp(-\mu x), \quad (2.19)$$

где  $I_0$  — интенсивность излучения на входе пучка в защиту;  $I_x$  — на выходе из защиты;  $B(E_\gamma, Z, \mu x)$  — энергетический фактор накопления, который зависит от энергии квантов, порядкового номера поглощающего вещества и глубины проникновения.

Значения энергетических факторов накопления и кратность ослабления при разных по толщине материалах, которые используют при расчете защиты, можно найти в ряде справочников по защите от ионизирующих излучений.

Рентгеновское излучение и  $\gamma$ -излучение обладают высокой проникающей способностью, длина пробега их в воздухе достигает сотен метров. Они обычно ослабляются материалами с высокой плотностью: сталь, свинец, просвинцованная резина, вольфрам и даже уран.

#### 2.2.4. Взаимодействие нейтронов с веществом

При прохождении пучка нейтронов через вещество возможны два вида их взаимодействия с ядрами вещества. Во-первых, в результате соударения нейтронов с ядрами возникает упругое и неупругое рассеяние нейтронов, во-вторых, происходят ядерные реакции типа  $(n, \alpha)$ ,  $(n, p)$ ,  $(n, 2p)$  и деление тяжелых ядер. В зависимости от энергии нейтронов обычно преобладают те или иные виды их взаимодействия с веществом. По уровню энергии нейтроны условно разделены на группы.

- Медленные нейтроны подразделяют на холодные нейтроны с энергией менее 0,025 эВ, тепловые с энергией 0,025–0,5 эВ и эпитепловые с энергией выше 0,5 эВ. В поглощающей среде обычна реакция захвата медленных нейтронов.
- Резонансные нейтроны наблюдают в области энергий от нескольких электронвольт до 500 эВ. У таких нейтронов велика вероятность резонансного поглощения тяжелыми ядрами (Au, U и др.).
- Промежуточные нейтроны с энергией 0,5 кэВ – 0,5 МэВ. Для нейтронов этой группы наиболее типично упругое рассеяние при взаимодействии с веществом.
- Быстрые нейтроны с энергией 0,5–10 МэВ характеризуются как упругим, так и неупругим рассеянием и возникновением ядерных реакций.

Защита от нейтронного излучения основана на поглощении тепловых и медленных нейтронов, а быстрые нейтроны должны сначала быть замедлены. Нейтроны с энергией более 0,5 МэВ рассеиваются на ядрах поглощающей среды, испытывая неупругие столкновения. При этом ядра среды находятся в возбужденном состоянии и испускают  $\gamma$ -кванты. Кроме того, под действием нейтронного излучения многие материалы активируются, т.е. образуются радионуклиды с дальнейшим их радиоактивным распадом. В этой связи защитные свойства материалов определяются их замедляющей и поглощающей способностью, степенью их активации и уровнем нежелательного  $\gamma$ -излучения, мгновенно возникающего при захвате нейтронов атомами защитного материала.

Быстрые нейтроны наиболее эффективно замедляются веществами с малым порядковым номером — водородсодержащие вещества: парафин, вода, бетон, пластмассы и др. Для эффективного поглощения тепловых нейтронов используют материалы с большим сечением захвата — материалы с бором и кадмием: борная сталь, бораль, борный графит, сплав кадмия со свинцом и др.

### 2.3. БАЗОВЫЕ ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Мера взаимодействия ионизирующего излучения с веществом — базовые дозиметрические единицы: флюенс ионизирующих частиц, полная линейная передача энергии, керма, экспозиционная доза, поглощенная доза.

**1. Флюенс ионизирующих частиц** — отношение числа ионизирующих частиц, проникающих в элементарную сферу, к площади центрального сечения этой сферы — количественная характеристика поля излучения. Она определяется следующим образом. В поле излучения помещают абсолютно прозрачную пробную сферу с площадью сечения  $dS$ ; считают число  $dN$  частиц, которые пересекут поверхность и попадут внутрь сферы. Флюенс частиц — отношение числа проникающих в сферу частиц  $dN$  к площади поперечного сечения сферы  $dS$ :  $\Phi = dN/dS$ . Размерность флюенса — частица/см<sup>2</sup>.

**2. Поток частиц.** Если число регистрируемых частиц меняется во времени, то поток частиц — отношение их приращения ко времени регистрации  $dt$ :

$$\dot{N} = dN/dt.$$

**3. Линейная передача энергии (ЛПЭ) (LET — linear energy transfer)** — полная средняя энергия частиц, потерянная заряженной частицей при всех столкновениях с электронами и поглощенная веществом. Единица ее измерения Дж/м. В качестве внесистемной единицы используют электронвольт на микрометр (эВ/мкм) воды (чаще — кэВ/мкм). При этом  $1 \text{ эВ/мкм} = 0,16 \text{ Дж/м}$ .

Легкие заряженные частицы — электроны и позитроны — излучение с низкой ЛПЭ; тяжелые частицы (их иногда называют адронами) — протоны, ионы,  $\alpha$ -частицы, ядра отдачи и др. — излучение с высокой ЛПЭ. Этот показатель не используют для характеристики косвенно ионизирующего излучения, но, учитывая вторичный ионизационный эффект этих излучений,  $\gamma$ - и рентгеновское излучение характеризуют как излучения с малой ЛПЭ, а потоки нейтронов — излучение с большой ЛПЭ.

**3. Керма** — величина, отражающая взаимодействие поля косвенно ионизирующего излучения, например  $\gamma$ -квантов, с веществом [kinetic energy released in material (kerma)] — отношение средней суммы начальной кинетической энергии всех заряженных ионизирующих частиц (электронов, позитронов, протонов,  $\alpha$ -частиц и др.), образовавшихся под действием ионизирующего излучения в элементарном объеме вещества, к массе вещества в этом объеме:  $K = dE_k/dm$ . Единица измерения кермы Дж/кг — грей (Гр) (по имени английского физика Л. Грея).

**4. Экспозиционная доза** — хронологически первая количественная мера ионизирующего излучения — характеризует взаимодействие поля фотонного излучения с воздухом. Она пропорциональна энергии фотонов, затраченной на ионизацию молекул воздуха, и равна отношению среднего суммарного заряда всех ионов одного знака, созданных в воздухе, к массе объема воздуха, в которой освобожденные фотонами электроны и позитроны полностью остановились:  $X = dQ/dm$ . Единица экспозиционной дозы — кулон/килограмм (Кл/кг). Внесистемная единица экспозиционной дозы — рентген (Р);  $1 \text{ Р} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ Кл/кг}$  и соответствует образованию  $2,08 \times 10^9$  пар ионов в  $1 \text{ см}^3$  воздуха при нормальных условиях. Учитывая среднюю энергию ионизации воздуха, равную 33,85 эВ, энергетический эквивалент кулона на килограмм  $1 \text{ Кл/кг} = 33,85 \text{ Дж/кг}$ . Экспозиционная доза — аналог кермы фотонов в воздухе. Соотношение между кермой в воздухе и экспозиционной дозой —  $8,7 \times 10^{-3} \text{ Гр} = 1 \text{ Р}$ .

**5. Поглощенная доза.** Степень, глубина и форма лучевого поражения, возникающего у биообъектов при действии на них ионизирующего излучения, в первую очередь зависят от величины поглощенной энергии излучения. Для ее характеристики используют понятие «поглощенная доза» — энергия излучения, поглощенная единицей массы облучаемого вещества:  $D = dE/dm$ . За единицу поглощенной дозы излучения принимают джоуль на килограмм (Дж/кг) (см. понятие «керма») — грей. В радиобиологии и радиационной гигиене ранее широко использовали внесистемную единицу поглощенной дозы — рад, но теперь ее рекомендуют не использовать:  $1 \text{ рад} = 1 \times 10^{-2} \text{ Гр} = 100 \text{ эрг/г}$ . В практике радиационной защиты часто используют понятие «мощность дозы» — отношение приращения дозы  $dD$  за интервал времени  $dt$ :  $\dot{D} = dD/dt$ . Единица мощности дозы — Гр/с. В условиях электронного равновесия — при равенстве выделяемой и поглощаемой энергий излучения в единице объема — керма и поглощенная доза совпадают по смыслу и значению.

**6. Мощность дозы  $\gamma$ -излучения** для точечного изотропного источника можно определить, если известна постоянная  $G$  мощности воздушной кермы радионуклида. Она выражается мощностью поглощенной дозы в воздухе, создаваемой  $\gamma$ -излучением точечного изотропного источника активностью 1 Бк на расстоянии 1 м от него (без начальной фильтрации). Единица ее измерения —  $\text{аГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{Бк})$ . Мощность дозы в единицах  $\text{аГр/с}$  от источника активностью  $Q$  (Бк) на расстоянии  $R$  (м) определяют простой формулой:

$$\dot{D} = \frac{QG}{R^2}. \tag{2.20}$$

При расчете защиты часто используют внесистемный показатель — гамма-постоянную ( $K$ ) любого  $\gamma$ -излучающего радионуклида; ее размерность —  $\text{Р}\cdot\text{см}^2/(\text{мКи}\cdot\text{ч})$  (табл. 2.1). Между керма-постоянной и гамма-постоянной существует простая связь:  $G[\text{аГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{Бк})] = 6,55 K [\text{Р}\cdot\text{см}^2/(\text{мКи}\cdot\text{ч})]$ .

**Таблица 2.1.** Основные единицы измерения для характеристики радионуклидов и полей ионизирующего излучения

Название единицы измерения	Размерность единицы измерения	Название единицы измерения	Размерность единицы измерения
Период полураспада радионуклида, $T$	с, мин, ч, сут, год	Линейная передача энергии (ЛПЭ)	кэВ/мкм
Активность радионуклида, $Q$	Бк, кБк, МБк, ГБк, ТБк, ПБк	Поглощенная доза, $D$	Гр, мГр, мкГр
Энергия ионизирующих частиц, $E$	эВ, кэВ, МэВ	Мощность поглощенной дозы, $\dot{D}$	Гр/мин, мГр/с, Гр/с
Флюенс ионизирующих частиц, $\Phi$	част/см <sup>2</sup>	Керма-постоянная, $G$	$\text{аГр}\cdot\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{Бк})$
Плотность потока ионизирующих частиц, $\phi$	част/(см <sup>2</sup> ·с), част/(см <sup>2</sup> ·мин)	Гамма-постоянная, $K$	$\text{Р}\cdot\text{см}^2/(\text{мКи}\cdot\text{ч})$

Окончание табл. 2.1

Название единицы измерения	Размерность единицы измерения	Название единицы измерения	Размерность единицы измерения
Экспозиционная доза, $\dot{X}$	Кл/кг, Р	Мощность экспозиционной дозы, $X$	А/кг, Р/ч, мкР/с
Линейный коэффициент ослабления, $\mu$	см <sup>-1</sup>	Массовый коэффициент ослабления, $\mu$	см <sup>2</sup> /г

### Контрольные вопросы

1. Какие виды ионизирующего излучения вы знаете?
2. Дайте характеристику  $\alpha$ -распаду.
3. Какие виды  $\beta$ -излучения вы знаете?
4. Дайте характеристику К-захвату.
5. Опишите виды взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом.
6. Опишите виды взаимодействия  $\beta$ -излучения с веществом.
7. Опишите виды взаимодействия нейтронов с веществом.
8. Сформулируйте закон радиоактивного распада.
9. Каковы единицы радиоактивного распада, единицы дозы излучения? Сформулируйте их понятия.
10. Какие материалы используют для защиты от  $\alpha$ - и  $\beta$ -излучения?
11. Какие материалы используют для защиты от рентгеновского  $\gamma$ -излучения?
12. Какие материалы используют для защиты от нейтронов?