**ЯВЛЕНИЕ РАДИОАКТИВНОСТИ.**

**1. РАДИОАКТИВНОСТЬ. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА**

***Процесс самопроизвольного перехода ядер из менее устойчивого состояния в энергетически более устойчивое получил название радиоактивности.***

***Этот процесс сопровождается превращением (распадом) некоторых природных и искусственных изотопов в ядра других химических элементов, при этом испускается невидимое и неощущаемое человеком излучение. Это излучение называется радиоактивным.***

***Атомы, способные на такие превращения называются радионуклидами.***

В ядерной физике распадающиеся ядра принято называть материнскими, а возникающие при этом новые – дочерними.

Деление радиоактивности на естественную и искусственную условно, т.к. оба вида подчиняются одним и тем же законам:

– ***Распад радионуклида происходит не одновременно для всех ядер, а постепенно***,

– ***причем за равные промежутки времени распадается разное число ядер***.

– ***Распад одного ядра не влияет на распад других, соседних ядер.***

***– На процесс радиоактивности не влияют внешние условия.***

***– Никогда не известно, в какой момент распадётся данное ядро, однако теория позволяет установить вероятность распада ядра за единицу времени, т.е. радиоактивность – это статистическое явление***.

При наличии большого числа ядер радионуклида, можно получить статистический закон, выражающий зависимость количества не распавшихся или распавшихся ядер от времени.

Экспериментально установлено, что число ядер dN, распавшихся за промежуток время dt, пропорционально числу ядер N, имевшихся на момент начала этого промежутка время и его длительности:

dN = -λNdt, (1)

где λ – коэффициент пропорциональности – постоянная распада, значение которой зависит от вида радионуклида. [λ] = с-1. ***Постоянная распада имеет смысл вероятности распада ядра за 1 с.***

Величина τ = 1 / λ называется средней продолжительностью жизни радионуклида.

Выражение (1) представляет собой дифференциальное уравнение 1-го порядка с разделяющимися переменными. Знак «–» в (1) указывает на убывание величины N с течением времени. Решим это уравнение, используя начальные условия: в начальный момент времени t = 0, N = N0 – первоначальному числу ядер:

   lnN – lnN0 =  = -λt.

Откуда после потенцирования имеем:

 . (2)

Это основной закон радиоактивного распада. N – количество ядер, ещё не распавшихся на момент времени t.

Найдем количество ядер распавшихся за время t считая с момента начала наблюдения:

ΔN = N0 - N = N0 - N0e-λt = N0(1-e-λt). (3)

На практике, для характеристики устойчивости ядер вместо постоянной распада λ используют другую величину – период полураспада Т. ***Период полураспада – это промежуток времени, в течение которого распадается*** половина из имевшихся на момент начала этого промежутка ядер. Чем меньше вероятность распада ядер λ, тем больше период полураспада – Т.

Запишем закон радиоактивного распада в соответствии с этим определением: 0,5N0 = N0 e -λТ. Откуда: Т = ln2 / λ = 0,693/λ и

. (4)

С учётом (4) закон радиоактивного распада примет вид:

. (5)

Периоды полураспада имеют значения от долей секунды до миллиардов лет, например, для изотопа полония  – Т = 3,04•10-4 с, а для урана  – Т = 4,5·109 лет. Соответственно, радионуклиды подразделяются на короткоживущие (Т = сек., час., дни) и долгоживущие (Т = годы, столетия,).

В заключение отметим, что для каждого радионуклида ***период полураспада – величина постоянная и не может быть изменена никаким внешним воздействием.*** На рис.2 представлены графики закона радиоактивного распада двух радионуклидов, периоды полураспада которых находятся в соотношении Т2 = 2Т1.

**2. АКТИВНОСТЬ РАДИОНУКЛИДА**

***Величина*, *равная числу атомных ядер, распавшихся за единицу времени называется активностью радионуклида***. Активность представляет собой скорость распада, и будет определяться выражением:

, 9)

где dN – количество распадов за промежуток времени dt.

Единица активности называется «беккерель» (Бк). Как это следует из определения, 1Бк = 1распад / 1с. Используются также единицы: килобеккерель – 1кБк = 103 Бк; мегабеккерель – 1МБк = 106 Бк и другие производные единицы.

Старая единица радиоактивности – кюри (Кu). Это активность 1г чистого радия. Поскольку в 1г радия за 1с происходит 3,7·1010 распадов, то соотношение между Бк и Кu: 1 Кu = 3,7·1010 Бк. Радиоактивность в 1 Ku это огромная величина. Специалисты обычно работают с активностями в тысячи и миллионы раз меньшими – соответственно: 1мКu = 10-3 Кu; 1мкКu = 10-6 Ки.

Найдем закон изменения активности препарата со временем. Для этого продифференцируем закон радиоактивного распада (4):

, . (10)

График зависимости активности от времени аналогичен графику закона радиоактивного распада (рис.3).

Отметим, что исследование характера изменения активности от времени позволяет проводить качественный химический анализ, т.е. определять, какие именно изотопы распадаются.

На практике, дело как правило, имеют не с чистыми радионуклидами, а с веществами, в которых они содержатся. Вещества эти могут иметь разное агрегатное состояние (твердое, жидкое, газообразное). Степень их загрязнения радиоизотопами характеризуется следующими величинами:

***Удельная активность*** – А/m, применяется для любых агрегатных состояний веществ, измеряется в Бк / кг.

***Объемная удельная активность*** – А/V; применяется в случаях объемного распределения радионуклидов для жидких и газообразных сред; измеряется в Бк/л, Кu/л.

***Удельная загрязненность площади*** – А/S; используется для характеристики земной поверхности; единицы измерения Бк/км2, Кu/км2.

***Радиоактивное поверхностное загрязнение*** – А/S; применяется, если радионуклид содержится в тонком в несколько микрон толщиной поверхностном слое образца; единица измерения распад/(мин.см2).

**3. ИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ.**

**ВИДЫ РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА**

До сих пор мы говорили о правилах, которым подчиняется процесс радиоактивного распада и не говорили об излучении, которое испускается при этом. Между тем, в этом излучении и кроется главный интерес, который заставляет нас пристально следить за всем, что связано с атомной энергетикой и атомным оружием.

Радиоактивное излучение не воспринимается обычными органами чувств человека. По своей природе его можно разделить на три основных вида, которые исторически получили названия α, β и γ - лучей. Эти лучи представляют собой либо поток частиц (α и β – излучение), либо поток электромагнитных волн (γ – лучи). В дальнейшем было установлено, что радиоактивный распад сопровождается испусканием самых разных элементарных частиц (протонов, нейтронов, нейтрино, позитронов и т.д.) и электромагнитных волн всех видов (радио волны, свет, рентгеновское излучение).

В зависимости от вида радиоактивного излучения, которое сопровождает процесс распада, по современным представлениям различают пять основных типов радиоактивности:

1. α – распад, когда наряду с дочерним ядром возникает поток α – частиц, которые представляют собой ядра изотопа ;
2. β – распад, который сопровождается излучением либо потока электронов – е-, либо потока позитронов – е+, либо представляет собой захват ядром одного из электронов внутренних электронных оболочек атома. Это, в конечном итоге, приводит к превращению одного из протонов в нейтрон и испусканию атомом рентгеновского излучения;
3. спонтанное деление – самопроизвольный распад ядра на две примерно равные части;
4. однопротонный распад – сопровождается излучением одного протона на каждый акт распада;
5. двухпротонный распад – когда каждый распад приводит к излучению ядром двух протонов.

Все виды превращений ядер одного химического элемента в ядра другого протекают в соответствии с тремя правилами:

1. ***Закон сохранения электрического заряда*** – суммарный заряд продуктов распада равен заряду распадающегося ядра.

2. ***Закон сохранения числа нуклонов*** – сумма нуклонов в продуктах распада равна числу нуклонов в распадающемся ядре.

3. ***Закон сохранения полной энергии*** – полная энергия продуктов распада равна полной энергии распадающегося ядра.

Если подсчитать суммарную массу покоя дочернего ядра и испущенных при радиоактивном распаде частиц, то она всегда оказывается меньше массы покоя материнского ядра, т.е. возникает так называемый дефект масс. Как известно, любым изменениям массы системы тел соответствуют эквивалентные изменения энергии этой системы. По формуле Эйнштейна: ΔЕ = Δmc2. В нашем случае это означает, что дочернее ядро и испущенные частицы приобретают при распаде некоторый запас кинетической энергии, пропорциональный дефекту масс.

Обычно, все типы радиоактивности сопровождаются испусканием γ – лучей, которое представляет собой поток квантов жесткого электромагнитного излучения с длиной волны от 10-10 м до 10-13 м. Это связано с тем, что возникшее в результате радиоактивного распада дочернее ядро, согласно законам квантовой механики, может находиться в нескольких различных состояниях. В каждом из них оно обладает определенной энергией. Состояние с наименьшей, возможной энергией является наиболее устойчивым и называется основным. Остальные состояния являются возбужденными. В возбуждённом состоянии ядро может находиться, примерно, 10-8 – 10-12 с. Затем происходит переход в основное состояние. Этот переход может быть реализован через ряд промежуточных состояний. При этом разница энергий ядра в разных состояниях испускается в виде γ – квантов.

Три последних типа распада (спонтанное деление, одно- и двух- протонная радиоактивность) довольно редкое явление в природе, и их мы рассматривать не будем. Остановимся более подробно на α и β распаде.

**α *– распад*** протекает по следующей схеме:

,

где *X* – химический символ материнского, распадающегося ядра, *Y* – символ дочернего ядра.

В соответствии с этой схемой, вновь образовавшийся элемент сдвинут в периодической таблице Менделеева на два номера влево, а его атомная масса меньше на четыре единицы. α - распад испытывают почти все тяжелые ядра с Z > 83 и всего несколько изотопов с Z < 83, причем периоды их полураспада очень велики (неодим , Т = 5·1015 лет; платина , Т = 1012 лет)

Энергия α-частиц, возникающих при распаде ядер разных химических элементов, лежит обычно в пределах от 4 до 8 МэВ (максимум 10,5 МэВ, минимум 1,8 МэВ). Это соответствует скорости вылета α - частиц из ядра от 1,2·107 до 2,0·107 м/с. Однако, энергия α - частиц, испускаемых ядрами одного и того же изотопа, имеет всего несколько строго определенных значений. Иначе говоря, α-излучение имеет дискретный энергетический спектр. Чтобы понять это, вспомним, что дочернее ядро может возникать в разных энергетических состояниях. Если дочернее ядро рождается сразу в основном состоянии, то при этом испускается α- частица с наибольшей возможной энергией. Если же дочернее ядро возникает в одном из возбужденных состояний, то энергия α-частицы оказывается меньше на величину энергии γ - кванта, который будет испущен дочерним ядром спустя некоторое время при его переходе в основное состояние. Cказанное поясняет энергетическая схемы распада  (рис.3):

0,38

0,18

0,11

0,00

Е, МэВ

, Т = 7,1·108 лет

4,20; 4%

4,40; 83%

4,47; 3%

4,58; 10%

Т =25,6 ч.

Рис. 3

εγ=hν3

εγ=hν2

εγ=hν1

.

Рассматривая явление радиоактивного распада, мы негласно полагали, что материнское ядро всегда находится в основном состоянии. Однако это не так. Оно тоже как и дочернее, может иметь несколько энергетических состояний. По этой причине спектр α – излучения состоит из нескольких групп линий с близкими значениями энергий.

***Бета-распад*** заключается во внутриядерном взаимном превращении нейтрона и протона. Все β-распадчики – это нуклиды с нарушенным отношением числа протонов и нейтронов (N/Z) в ядре.

Если в ядре имеется излишек нейтронов, то ядро испытывает электронный распад, при котором один из нейтронов ядра превращается в протон, испуская при этом электрон и антинейтрино:

.

схема атомных превращений имеет вид:

.

В качестве примера рассмотрим распады:

, , .

Как видно, при таком превращении вторичный элемент сдвигается в периодической таблице на один номер вправо, а значения массового числа остается без изменения.

Если неблагоприятное соотношение N и Z в ядре обусловлено излишком протонов, то происходит позитронный распад. В этом случае один из протонов превращается в нейтрон, при этом из ядра выбрасывается позитрон (частица с массой равной массе электрона и таким же, но положительным зарядом) и нейтрино:



Изотопное превращение реализуется по схеме:



В природе такой распад испытывают изотопы азота и натрия:

, .

При позитронном распаде дочернее ядро сдвигается в таблице Менделеева на один номер влево. Общее число нуклонов при этом не меняется.

Третий вид β-распада заключается в том, что ядро поглощает один из электронов своего атома. Чаще всего это происходит с электронами К- слоя, реже захватываются электроны из L или М слоев. В результате один из протонов превращается в нейтрон, испуская при этом нейтрино:

.

Этот вид β-распада получил название е-захвата (К-захвата). Его схема выглядит следующим образом:

.

Примером может служить распад бериллия:

.

Отметим, что е-захват всегда сопровождается испусканием характеристического рентгеновского излучения, т.к. на освободившееся место переходят электроны с более высоких энергетических уровней.

В результате е-захвата так же, как и при β+-распаде, массовое число ядра не меняется, а порядковый номер уменьшается на единицу.

В отличие от α-радиоактивности энергетический спектр электронов и позитронов не является дискретным, хотя ядро, как и прежде, может находиться только в некоторых определенных энергетических состояниях. Это связано с тем, что энергия распада распределяется между электроном и антинейтрино или между позитроном и нейтрино совершенно произвольным образом. В частности, если нейтрино не получит ничего, то энергия электрона или позитрона будет максимальной и наоборот.

График распределение β-частиц по энергиям представлен на рис.4: Значения кинетических энергий β-частиц лежат в пределах от 0 до 1-2 МэВ. Это соответствует максимальной скорости выброса частиц из ядра в 1,6·108 м/c.

n

Wmax

Wк

Рис. 4

Отметим, что всего известно около 1000 изотопов β-распадчиков. Из них только 20 являются естественными. Подавляющее большинство этих изотопов испытывает β--распад.

И в заключение, дадим краткую характеристику электромагнит-ному излучению, сопровождающему радиоактивный распад. Прежде всего отметим, что при радиоактивном распаде образуется весь интервал электромагнитных волн от 0 до ∞. Мы рассмотрим только γ-излучение и рентгеновские лучи, т.к. только они способны вызвать ионизацию атомов вещества, с которым взаимодействуют.

γ-излучение: сопутствует большинству радиоактивных превращений, интервал длин волн λ = 10-5 ÷ 10-1 нм; *v =* 3·1018 ÷ 3·1022 Гц; εγ = 0,01 ÷ 100 МэВ. При радиоактивном распаде испускаются как правило γ – кванты с энергией от 0,2 до 3 МэВ.

Рентгеновское излучение: λ = 10-4 м ÷ 80нм; *v =* 3,8·1015 ÷ 3·1021 Гц; ε = 12 эВ ÷ 10 МэВ. В большинстве случаев испускаются рентгеновские кванты с энергией от 20эВ до 1 МэВ.

**4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЧАСТИЦ РАДИОАКТИВНОГО**

**ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ**

Итак, мы установили, что в процессе радиоактивного распада атомы испускают потоки элементарных частиц (α, β, р, n) и квантов электромагнитного излучения, обладающих огромной энергией. Принимая во внимание, что время существования этих частиц и квантов весьма невелико, следует задать вопрос: куда пропадают эти частицы и кванты и где девается их энергия?

***Все частицы и кванты, испускаемые при радиоактивном распаде, проходя через различные среды, взаимодействуют с электронами и ядрами атомов вещества.***Это взаимодействие проявляется в двух первичных эффектах: ***ионизации атомов и их возбуждении, т.е. в переводе одного из электронов на более высокий энергетический уровень.*** По мере проникновения частиц радиоактивного излучения вглубь вещества, в результате многократных «столкновений», кинетическая энергия частиц постепенно уменьшается до значения средней кинетической энергии теплового движения молекул среды. После этого они становятся неотличимыми от частиц среды: α-частица присоединяет два электрона и превращается в атом гелия. Протон присоединяет электрон и становится атомом водорода. Электрон остаётся в свободном состоянии или присоединяется к положительно заряженному иону. Позитрон ***аннигилирует, т.е. соединяется с электроном***. При этом частицы исчезают, а рождается два γ-кванта*.*

Такой ***механизм взаимодействия радиоактивного излучения, приводящий к постепенному уменьшению скорости движения час-тиц, получил название ионизационного торможения, а все виды излучения объединяются под общим названием ионизирующего излучения.***

Первичные процессы ионизации и возбуждения атомов вызывают вторичные эффекты:

а) появление свободных электронов, способных вызывать вторичную ионизацию и возбуждение;

б) переход возбуждённых атомов в основное состояние и соответственно появление характеристического рентгеновского и оптического электромагнитного излучения;

в) активация молекул, приводящая к фотохимическим реакциям;

г) явление радиолюминесценции;

д) увеличение скорости теплового движения частиц среды;

е) нарушение структуры молекул вещества, в частности, радиолиз воды, который заключается в ионизации и последующем распаде ионизированной молекулы воды с образованием ненасыщенных радикалов и , которые не несут электрических зарядов, но имеют ненасыщенные валентности, и поэтому обладают исключительно высокой химической активностью. При этом образуются также соединения типа Н2О2 (перекись водорода) и (гидроперекись), которые тоже являются сильными окислителями.

Следует отметить, что вторичные эффекты могут вызвать аналогичные процессы третьего порядка и т.д. до тех пор, пока это будет

энергетически возможно.

В целом, ***ионизационная способность радиоактивных излучений оценивается тремя взаимосвязанными величинами и зависит от энергии частиц, их заряда, а также свойств среды, в которой они движутся*:**

1. Удельная ионизация или линейная плотность ионизации,  ; (м -1, см –1) – число пар ионов, создаваемых ионизирующим излучением на пути единичной длины.
2. Удельные ионизационные потери или линейная тормозная способность, , [S]=Дж/м, эВ/см – количество энергии, теряемое частицей на пути единичной длины.
3. Пробег частиц или средний линейный пробег, R, [R] = м, см, мм, км – это путь частицы в данном веществе до момента, когда её средняя кинетическая энергия не сравняется со средней кинетической энергией теплового движения.

Дадим краткую характеристику ионизирующих излучений.

Удельная ионизация α-частиц в воздухе *i*α = 2 ÷ 8 104 см –1, что соответствует Sα = 2 ÷ 8 104 см –1×34 эВ = 0,7 ÷ 2,7 МэВ/см. Пробег α-частиц зависит от их энергии и в воз-духе составляет 2 ÷ 10 см, в воде и биотканях 10 ÷ 100 мкм. Так как α-частицы данного радиоактивного вещества имеют примерно одинаковую энергию, то в однородной среде они проникают приблизительно на одинаковую глубину (рис.5).

Значение удельных ионизационных потерь с глубиной изменяется неравномерно. Такой ход кривой связан с уменьшением скорости α-частиц по мере проникновения в вещество, что увеличивает вероятность взаимодействия α-частицы с атомами среды (рис.6).

Возможно взаимодействие α-частиц с ядрами атомов среды, при

этом происходят ядерные реакции и рассеяние α-частиц, но это значительно более редкий процесс, чем ионизация.

Т.к. ионизационная способность α-частиц высокая, а глубина проникновения мала, то для защиты от α-излучения может быть использована плотная бумага, одежда, полиэтиленовая плёнка и т.д.

β-частицы, имеющие единичный элементарный заряд и меньшую энергию, обладают и меньшей ионизационной способностью *i*β = 50 ÷ 250 см–1. Это означает, что β-излучение проникает в вещество на бо'льшую глубину: для воздуха пробег составляет от десятков сантиметров до десятков метров, в воде и биотканях Rβ = 10 ÷ 15 мм.

β-частицы имеют разные значения энергии и поэтому проникают в однородную среду на разную глубину. Изменение числа β-частиц

Изменение числа β-частиц по мере их проникновения в вещество будет иметь вид (рис.7).

Взаимодействие β-излучения с веществом, наряду с ионизацией и возбуждением атомов, приводит так же к образованию тормозного рентгеновского излучения, возникновению черенковского свечения и явлению аннигиляции. Возникающие в результате аннигиляции два γ-кванта имеют энергию не меньше удвоенной энергии покоя β-частицы, которая равна 0,51 Мэв. Кроме того, следует отметить сильное рассеяние β-частиц на электронах вещества и, как следствие, сильное искривление их траектории. Учитывая все потери энергии β-излучения, можно считать, что интенсивность пучка β-излучения по мере его проникновения вглубь вещества уменьшается вначале по экспоненциальному закону – типа закона Бугера-Ланберта, а затем на глубине пробега R β-частицы быстро теряют энергию.

Защитой от β-излучения служат экраны из алюминия, оргстекла, дерева и т.п. толщиной порядка 10 мм.

Для оценки поглощательных свойств материалов используют понятие «слой половинного поглощения», т.е. слой, который уменьшает интенсивность излучения в 2 раза. Например, для β-излучения фосфора  слой половинного поглощения в алюминии Δ = 0,4 мм; в воде Δ = 1,1мм.

К ионизирующему излучению относится и пучок нейтронов. В связи с отсутствием заряда, первичная ионизирующая способность нейтронов мала. Это означает, что проникающая способность соответственно велика. Ионизационный эффект нейтронов обусловлен, в основном, вторичными процессами. Благодаря отсутствию заряда нейтроны легко вступают во взаимодействие с ядром, вызывая его распад, в результате чего образуется поток заряженных частиц и γ-излучение, которые обладают большой ионизирующей способностью. Первичными процессами взаимодействия нейтронов с веществом являются: а) появление ядер отдачи (упругое взаимодействие); б) испускание одного или двух γ-квантов (неупругое соударение); в) ядерные реакции, которые сопровождаются испусканием ,  и γ-излучения.

 .

Лучшей защитой от нейтронного излучения являются водородосодержащие материалы: полиэтилен, парафин, вода и т.д.

Ионизирующее действие протонов подобно действию α-частиц.

5. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ.

Взаимодействие электромагнитного, т.е. рентгеновского и γ-излучения с веществом может иметь четыре механизма: когерентное

рассеяние, некогерентное рассеяние или эффект Комптона, фотоэффект и процесс образования пар электрон-позитрон. В отдельных случаях γ-фотоны с очень высокой энергией могут вызвать фотоядерную реакцию, при которой ядро поглощает γ-квант и испытывает радиоактивный распад.

При взаимодействии с веществом одновременно работают все четыре механизма, приводящие к ионизации и возбуждению атомов среды. Однако, вклад этих механизмов в протекание первичных процессов зависит от энергии ε = hν квантов электромагнитного излучения.

***Когерентное рассеяние*** возникает, если ε = hν < А*i*. При этом, вещество излучает электромагнитные волны той же длины, что и поглощённые.

## Фотоэффект: ε = hν ≥ Аi – внутренний электрон атома полностью поглощает квант электромагнитного излучения и покидает атом с некоторой скоростью : . После этого возникает характеристическое рентгеновское излучение. Этот процесс в биотканях характерен для квантов с ε < 0,1 МэВ. Вылетевшие из атома электроны могут производить в биотканях вторичную ионизацию.

***Эффект Комптона*** наиболее вероятен для квантов с энергией ε ~ 1 ÷ 2 МэВ. Некогерентное рассеяние обусловлено взаимодействием квантов электромагнитного излучения hν с внешними слабо связанными с ядром электронами. В результате, часть энергии кванта передаётся этому электрону, и он покидает атом со скоростью . Кроме того, рождается новый квант электромагнитного излучения hν***'*** с меньшей энергией – . Изменение длины волны излучения определяется формулой Комптона:

. (11)

Возможны вторичные эффекты ионизации и возбуждения под воздействием квантов  и выбитого электрона.

***Образование электрон-позитронных пар*** возможно только для квантов с энергией не менее удвоенной энергии покоя β-частиц. Т.к. Е0,β = 0,51МэВ, то ε ≥ 1,02 МэВ. Однако, реально в тканях этот процесс будет иметь преобладающее значение при энергии квантов ε ~10 МэВ. И в этом случае возможны вторичные эффекты ионизации и возбуждения атомов вещества.

Учитывая, что рентгеновское излучение – это электромагнитные волны с λ = 10-4 ÷ 80 нм и ε = 20 эВ ÷ 1 МэВ, то для него преобладающим при взаимодействии будет когеретное рассеяние, фотоэффект и эффект Комптона.

γ-излучение имеет λ = 10-5 ÷ 10-1нм и ε = 0,20 ÷ 3,0 МэВ – т.е. для γ-излучения будут иметь место процессы фотоэффекта, некогерентного рассеяния и образования электрон-позитронных пар.

В целом, электромагнитное излучение в воздухе имеет длину пробега порядка сотен метров, и на всем пути образуется всего от 10 до 250 пар ионов. В жидкостях и тканях пробег электромагнитного излучения составляет десятки сантиметров, и даже метры.

Ослабление пучка рентгеновского и γ-излучения описывается экспоненциальным законом, причём линейный коэффициент поглощения для рентгеновского излучения: , а для γ-излучения:  в законе . Величины μк, μн, μф и μа определяют вклад когерентного и некогерентного рассеяния, явления фотоэффекта и аннигиляции в значение коэффициента поглощения μ. Для γ-излучения высоких энергий этот закон выполняется весьма приблизительно, т.к. не учитывает вторичных эффектов: аннигиляцию родившихся пар и возникновение новых γ-квантов.

**6. ДЕЙСТВИЕ РАДИОАКТИВНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА**

**БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОРГАНИЗМЫ**

Радиоактивное излучение представляет серьёзную опасность для всего живого на Земле, если не принимать определённых технических и профилактических мер. Эта опасность усугубляется ещё и тем, что ионизирующие излучения невидимы и непосредственно человеком не ощущаются. Кроме того, для действия ионизирующих излучений присущ скрытый (латентный) характер и значительные биологические нарушения при малых количествах переданной энергии.

Первичным звеном биологического действия ионизирующих излучений являются физико-химические процессы на молекулярном уровне, связанные с ионизацией и возбуждением атомов и молекул. При этом, можно выделить две группы процессов: а) связанных с радиолизом воды и б) с радиолизом молекул органических соединений.

;

; ; ; ;



Если в воде есть кислород, то



(НО2 – гидроперекись, Н2О2 – перекись водорода).

В случае органических соединений образуются возбуждённые молекулы, ионы, радикалы и перекиси.

; ; ; .

В настоящее время вклад прямого и косвенного механизмов в общий баланс повреждений на молекулярно-клеточном уровне изучен недостаточно. Однако, совершенно ясно, что эти первичные физико-химические процессы дают толчок к началу тех сложных и взаимосвязанных биологических изменений, которые приводят к нарушению нормального функционирования биосистемы.

Повышение уровня накопления окислителей не является специфическим признаком воздействия радиации. Это имеет место и в случаях токсического воздействия, УФ-облучения, Е-авитаминоза и в некоторых других случаях. По этой причине диагностирование радиационного воздействия при малых дозах облучения может быть проведено только по специфичности сочетания синдромов и признаков, каждый из которых в отдельности может быть вызван разными причинами нерадиационной природы.

Как при прямом, так при косвенном воздействии радиации, основной «мишенью» являются крупные белковые молекулы и связанные с ними механизмы биосинтеза. По этой причине, клетки с высоким уровнем воспроизводства и, следовательно, процессов деления отличаются высокой радиочувствительностью: это клетки костного мозга, половые, желудочно-кишечного тракта и лимфоидные ткани. По этой же причине высокая радиационная поражаемость характерна для злокачественно перерождённых тканей, что используют для лучевой терапии опухолей, которые лечат . Для лечения рака крови используют , щитовидной железы – . Для диагностики заболеваний используют избирательное поглощение и накопление некоторых химических элементов определёнными тканями. На этом основан метод меченых атомов. Опухоли головного мозга диагностируют введением радиоизотопов 14С, 15О, 13Ni, костные ткани –  60Со, печень – 198Аu, желчные пути – 99Те. Более высокая радиочувствительность у детей.

Значительной резистентностью к действию радиации обладает нервная, костная, хрящевая ткани с чрезвычайно замедленными темпами воспроизводства. Отметим также рост радиочувствительности по мере видового усложнения организма. Например, средняя смертельная доза, вызывающая 50%-ую гибель особей (в рад): человек – 450, крыса – 800, курица – 1000, рыба – 6500, дрозофила – 80000, инфузория – 300000. С общебиологических позиций это можно объяснить тем, что в сложно устроенных организмах, с их точно скоординированными функциями многочисленных органов и систем, больше слабых звеньев, которые могут вызвать цепные реакции дезадаптации и патологии. Кроме того, у более примитивных организмов частично или полностью отсутствуют сложно организованные системы управления – нервная, иммунная, эндокринная, поэтому они выживают при больших дозах.

**7. ДОЗИМЕТРИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Рассмотрим величины, которыми оперирует дозиметрия. Независимо от природы излучения эффект его воздействия на вещество объективно будет определяться количеством энергии, которую передаёт пучок ионизирующего излучения единице массы облучаемого тела. Эту величину называют ***поглощённой дозой***:

. (12)

Единицей дозы в СИ называется **грей** (Гр), . Внесистемной единицей является **рад**. 1 рад = 10-2 Гр.

Однако изменения, которые происходят в веществе, зависят не только от величины поглощённой дозы, но и от вида ионизирующего излучения, энергии его частиц и времени облучения. Чем быстрее накоплена данная доза, тем больше её поражающее действие. Быстрота накопления дозы определяется ***мощностью дозы – количества энергии переданной единице массы вещества за единицу времени***:

. (13)

[РD] = Гр/с. Внесистемной единицей мощности дозы является рад/с.

Казалось бы, для определения поглощённой дозы следует измерить энергию ионизирующего излучения, падающего на тело, энергию, прошедшую сквозь тело и разделить их разность на массу тела. Однако, на практике это сделать крайне трудно: во-первых, из-за рассеяния излучения в веществе; во-вторых, из-за неоднородности тел; в-третьих, из-за сложного состава излучений и др. Особенно трудно это сделать для биологических объектов. Тем не менее, оценить поглощённую дозу можно по ионизирующему действию излучения на воздух, окружающий тело.

В этой связи, для описания поля внешнего облучения объекта (экспозиции) вводится понятие ***экспозиционная доза***, которая представляет собой дозу, поглощённую воздухом. Использовать эту величину для оценки поглощённой дозы биологических объектов можно только при условии равномерного распределения излучения в пространстве, что выполняется только для рентгеновского и γ-излучения. Количественно экспозиционная доза и мощность экспозиционной дозы определяются в СИ по величине заряда, образующегося под воздействием рентгеновского и γ-излучения в 1 кг сухого воздуха:

 и . (14)

Единицей экспозиционной дозы является Кл/кг. Старая единица экспозиционной дозы называется рентген. 1 Р – это такая доза, при которой в результате полной ионизации в 1 см3 сухого воздуха (при t = 00С и Р=760 мм.рт.ст.) образуется 2,08·108 пар ионов. 1 Р = 2,58·10-4 Кл/кг. Единицей мощности экспозиционной дозы в СИ является 1 А/кг, а внесистемными единицами 1 Р/с; мР/час; мкР/час.

Биологические эффекты ионизирующих излучений в большей степени зависят от вида излучений. При одной и той же поглощённой дозе тяжёлые частицы (α, n, р) производят гораздо большие физиологические нарушения, чем β-, рентгеновское или γ-излучение. Особенно опасны для биоситем потоки нейтронов. В дозиметрии принято сравнивать биологические эффекты различных излучений с такими же эффектами, создаваемыми рентгеновским и γ-излучением.

Количественно оценка биологического воздействия разных излучений осуществляется с помощью «коэффициента качества» (КК), иначе его называют коэффициентом относительной биологической эффективности (ОБЭ). Значение КК (ОБЭ) определяют опытным путём. Для рентгеновского и γ-излучений коэффициент качества принят равным 1, тогда для β-частиц КК = 1; для медленных нейтронов – 5, быстрых нейтронов и протонов – 10, α-частиц – 20.

С учётом коэффициента качества оценка степени воздействия радиации на человека и другие биологические объекты производится величиной – ***эквивалентная доза***:

Dэкв = kкк · Dп. (15)

Единица Dэкв имеет ту же размерность, что и Dп, однако, называются в СИ по-другому – зиверт. Внесистемная единица эквивалентной дозы – бэр (биологический эквивалент рада). 1бэр=10-2 Зв.

Однако эквивалентная доза не в полной мере отражает степень радиационной опасности, т.к. разные органы и виды биотканей человека имеют разную радиочувствительность. При облучении в первую очередь поражаются красный костный мозг, половые железы, молочные железы и лёгкие. Напротив, нервные ткани очень устойчивы к радиации.

Учёт радиационной чувствительности разных тканей производится с помощью введения коэффициентов радиационного риска (КРР). Значения КРР для органов и тканей: гонады – 0,25; мозг – 0,12; молочные железы – 0,15. Если умножить эквивалентные дозы, полученные отдельными органами и частями тела, на КРР, и сложить полученные произведения, то получим величину, называемую ***эффективной эквивалентной дозой***.

. (16)

Облучение, которому подвергаются живые организмы, в том числе и человек, делится на внешнее и внутреннее. Источниками внешнего облучения могут быть ядерные взрывы, ядерные реакторы на АЭС, ускорители, рентгеновские аппараты, а также естественные источники: космические лучи, радиоактивные руды, солнечная радиация, излучение горных пород, некоторые изотопы, присутствующие в почве и воздухе , , . Внутреннее облучение обусловлено долгоживущими радиоактивными элементами, поступающими в организм с воздухом (родон, торон), с пищей (калий, уран, рубидий, радий) и через кожу или вводятся внутрь организма с лечебными и диагностическими целями. Считается, что внутреннее облучение более опасно, т.к. при этом непосредственному воздействию подвергаются незащищённые ткани, органы и системы тела.

В течение всего биологического развития человек подвергался воздействию радиации связанной с естественным радиационным фоном Земли. Естественный радиоактивный фон окружающей нас среды по экспозиционной дозе составляет 10 ÷ 20 мкР/час или 25 мкКл/кг в год, что соответствует эквивалентной дозе примерно в 125 мбэр. Предельно допускаемая эквивалентная доза при профессиональном облучении равна 5 бэр/год. Минимальная летальная доза для человека при равномерном облучении всего организма γ или рентгеновским излучением около 600 бэр. Величина смертельной дозы зависит от вида биоорганизмов. Некоторые микроорганизмы прекрасно себя чувствуют даже в ядерном реакторе.

Мы рассмотрели только основные специальные величины дозиметрии. Следует отметить, что наряду со специальными, дозиметрия использует и такие общефизические параметры, как скорость и энергия частиц, частота и длина волны излучения, спектр излучения и др.

**8. ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ**

***Приборы*, *которые служат для изучения и контроля ионизирующих излучений, называются дозиметрическими.***

Дозиметрические приборы условно можно разделить на пять основных видов: индикаторы, спектроскопы, рентгенометры, радиометры, дозиметры.

***Индикаторы –*** приборы для обнаружения и ориентировочной оценки радиационного поля.

***Спектроскопы –*** служат для определения вида излучения и его энергетического спектра.

***Рентгенометры*** – применяются для измерения экспозиционной дозы и мощности рентгеновского и γ-излучения.

***Радиометры*** – предназначены для измерения активности нуклида или плотности потока частиц.

***Дозиметры*** *–* используются для измерения дозы или мощности дозы ионизирующего излучения.

***Основной узел любого дозиметра - это детектор ионизирующего излучения – устройство, обеспечивающее преобразование энергии ионизирующего излучения в другой вид энергии удобной для регистрации***: электрический ток, заряд или электрический импульс. С некоторой условностью детекторы можно разделить на три группы: следовые (или трековые), счётчики, интегральные.

***Следовые***  названы так потому, что позволяют наблюдать трек (траекторию движения) частиц радиоактивного излучения. К ним относятся: камера Вильсона, пузырьковая камера, искровая камера, фотопластинки и фотоэмульсии.

***Счётчики*** регистрируют каждый случай попадания в объём детектора отдельных квантов ионизирующего излучения:

а) сцинтилляционные счётчики – в основе работы лежит явление флуоресценциии;

б) полупроводниковые – реагируют на взаимодействие с частицами радиоактивного излучения изменением электропроводности р-п перехода;

в) черенковские – счётчики, действие которых основано на явлении Вавилова-Черенкова;

г) газоразрядные счётчики – детекторы, в которых используется явление возникновения разряда в газах под воздействием отдельного кванта ионизирующего излучения.

***Интегральные детекторы*** – позволяют зафиксировать суммарную энергию ионизирующего излучения за какое-то время: ионизационная камера, счётчик Гейгера-Мюллера, фотодетектор.