## Ионизирующие излучения, их характеристики и методы измерений

## 

## Краткая характеристика ионизирующих излучений

**Ионизирующее излучение (ИИ) –** это излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию в этой среде ионов разных знаков. Излучение считается ионизирующим, если оно способно разрывать химические связи молекул. Ионизирующее излучение делят на корпускулярное и фотонное.

Радиоволны, световые волны, тепловая энергия Солнца не относятся к ионизирующим излучениям, так как они не вызывают повреждения организма путем ионизации.

**Корпускулярное –** это поток частиц с массой отличной от нуля (электроны, протоны, нейтроны, альфа-частицы).

**Фотонное** – это электромагнитное излучение, косвенно ионизирующее излучение (гамма излучение, характеристическое излучение, тормозное излучение, рентгеновское излучение, аннигиляционное излучение).

**Альфа-излучение** – это поток альфа-частиц (ядер атомов гелия), испускаемых при радиоактивном распаде, а также при ядерных реакциях и превращениях. Альфа-частицы обладают сильной ионизирующей способностью и незначительной проникающей способностью. В воздухе они проникают на глубину несколько сантиметров, в биологической ткани – на глубину доли миллиметра, задерживается листом бумаги, тканью одежды. Альфа-излучение особо опасно при попадании его источника внутрь организма с пищей или с вдыхаемым воздухом.

**Бета-излучение** – это поток электронов или позитронов, испускаемых ядрами радиоактивных элементов при бета-распаде. Их ионизирующая способность меньше, чем у альфа-частиц, но проникающая способность во много раз больше, и составляет десятки сантиметров. В биологической ткани они проникают на глубину до 2 см, одеждой задерживается только частично. Бета-излучение опасно для здоровья человека, как при внешнем, так и при внутреннем облучении.

**Протонное излучение** – это поток протонов, составляющих основу космического излучения, а также наблюдаемых при ядерных взрывах. Их пробег в воздухе и проникающая способность занимают промежуточное положение между альфа и бета-излучением.

**Нейтронное излучение** – поток нейтронов, наблюдаемых при ядерных взрывах, особенно нейтронных боеприпасов и работе ядерного реактора. Последствия его воздействия на окружающую среду зависят от начальной энергии нейтрона, которая может меняться в пределах 0,025 –300 МэВ.

**Гамма-излучение** – электромагнитное излучение (длина волны 10–10–10–14 м), возникающее в некоторых случаях при альфа и бета-распаде, аннигиляции частиц и при возбуждении атомов и их ядер, торможении частиц в электрическом поле. Проникающая способность гамма-излучения значительно больше, чем у вышеперечисленных видов излучений. Глубина распространения гамма-квантов в воздухе может достигать сотен и тысяч метров. Ионизирующая способность (косвенная) значительно меньше, чем у вышеперечисленных видов излучений. Большинство гамма-квантов проходит через биологическую ткань, и только незначительное количество поглощается телом человека.

**Тормозное излучение** – фотонное излучение с непрерывным энергетическим спектром, испускаемое при уменьшении кинетической энергии заряженных частиц. Воздействие на окружающую среду такое, как и гамма-излучения.

**Характеристическое излучение** – фотонное излучение с дискретным энергетическим спектром, возникающее при изменении энергетического состояния электронов атома. Воздействие на биологическую ткань аналогично гамма-излучению.

**Аннигиляционное излучение** – фотонное излучение, возникающее в результате аннигиляции частицы и античастицы (например, позитрона и электрона). Воздействие на биологическую ткань аналогично гамма-излучению.

**Рентгеновское излучение** – фотонное излучение (длина волны 10–-9–10–-12 м), состоящее из тормозного и (или) характеристического излучения, генерируемого рентгеновскими аппаратами, и возникающее при некоторых ядерных реакциях. В отличие от гамма-излучения оно обладает такими свойствами как отражение и преломление.

## Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом

Альфа-частицы, бета-частицы, выброшенные из ядра, обладают значительной кинетической энергией и, воздействуя на вещество, с одной стороны производят его ионизацию, а с другой проникают на определенную глубину. Взаимодействуя с веществом, они теряют эту энергию, в основном, в результате упругих взаимодействий с ядрами атомов или электронами, отдавая им всю или часть своей энергии, вызывая ионизацию или возбуждение атомов (т.е. перевод электрона с более близкой на более удаленную от ядра орбиту). Ионизация и проникновение на определенную глубину имеют принципиальное значение для оценки воздействия ионизирующего излучения на биологическую ткань различных видов излучений. *Зная свойства различных видов излучений проникать через разные материалы, последние можно использовать как для защиты человека, так и некоторых объектов, приборов и т.д.*

Результаты взаимодействия ионизирующего излучения с веществом зависят: от массы, заряда потока частиц и их энергий; от вида фотонов и их энергий; от типа и плотности вещества; от значения энергий внутримолекулярных сил облучаемого вещества.

Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом зависит от соотношения масс и энергий частиц и может носить упругий или неупругий характер.

С учетом выше сказанного можно сделать некоторые выводы:

* заряженные частицы, проходящие через вещество, взаимодействуют как с орбитальными электронами атома, так и с его ядром;
* при взаимодействии с орбитальными электронами, энергия частиц растрачивается на ионизацию атомов, если она не менее 35 эВ и на возбуждение атомов (перевод электрона с ближней орбиты на более удаленную), если она менее 35 эВ;
* в процессе ионизации атома образуются заряженные частицы (свободные электроны), а атомы, потерявшие один или несколько электронов, превращаются в положительно заряженные ионы;
* при взаимодействии с ядром заряженная частица может или тормозиться электрическим полем ядра и менять свое направление движения или поглощаться ядром. В первом случае происходит испускание тормозного излучения, во втором случае заряженная частица (при достаточно большой энергии) поглощается ядром, при этом выбрасываются элементарные частицы и фотоны. Поглощение частицы ядром обычно происходит, если энергия частицы превышает 1,02 МэВ.

Процесс взаимодействия, при котором исчезают первоначальные и появляются новые частицы, называют ядерной реакцией. Рассмотрим взаимодействие различных видов излучений с веществом.

#### Гамма-излучение

Взаимодействие гамма-квантов с веществом может сопровождаться *фотоэффектом*, *комптоновским* рассеянием и образованием *электрон-позитронных пар*. Вид эффекта зависит от энергии гамма-кванта:

***Ек* = hν – Еи**, (1)

где: **h –** постоянная Планка; **ν –** частота излучения; **Еи**– энергия ионизации соответствующей атомной оболочки (энергия связи выбитого электрона из атома).

**Фотоэффект** возникает при *Е* = 10 эВ–1 МэВ, то есть при относительно малых значениях энергий. В этом случае вся энергия гамма-кванта передается орбитальному электрону, и он выбивается из орбиты (рис.3).

Выбитый электрон называется фотоэлектроном. В результате его отрыва в атоме появляется свободный уровень, который заполняется одним из наружных электронов. При этом, либо испускается вторичное мягкое характеристическое излучение (процесс флюоресценции), либо энергия передается одному из электронов, который покидает атом (**электрон Оже**). Флюоресцентное излучение наблюдают в материалах с большим атомным номером. В материалах с низким атомным номером преобладает образование электронов Оже. Вероятность фотоэффекта увеличивается с ростом атомного номера материала и уменьшается с ростом энергии фотона.

С ростом энергии гамма-квантов явление фотоэффекта становится все меньше, а при энергии 100–200 кэВ начинает преобладать **Комптон эффект.**

**Комптоновским рассеиванием** называется процесс взаимодействия фотонного излучения с веществом, в котором фотон в результате упругого столкновения с орбитальным электроном теряет часть своей энергии и изменяет направление своего первоначального движения, а из атома выбивается электрон отдачи (комптоновский электрон) (рис.4).

Энергия комптоновского электрона равна:

**Е = hν – hν**\ (2)

**Образование электронно-позитронных пар**. Если энергия гамма кванта превышает **1,02 МэВ**, то он поглощается ядром, а из последнего одновременно вылетают электрон и позитрон (рис.5). Таким образом, гамма кванты способны косвенно ионизировать вещество. Возникшей паре передается вся энергия гамма кванта за вычетом энергии покоя пары, равной 1,022 МэВ.

Следует отметить, что позитрон нестабилен в присутствии электронов среды. Он быстро исчезает за счет аннигиляции с одним из электронов. В этом случае испускается 2 фотона с энергией по 0,511 МэВ.

Рассмотрим, проникающую способность гамма-квантов.

Как уже отмечалось, гамма-квант образуется при переходе ядра в более низкие энергетические состояния. Не имея массы, они не могут замедляться в среде, а лишь поглощаются или рассеиваются.

**γ ≈**

**≈**

**γ\**

Электрон Оже

*Рис. 3. Схема фотоэффекта*

**γ≈**

**γ1**

**е-**

*Рис.4. Схема Комптон эффекта*



* При прохождении через вещество их энергия не меняется, но уменьшается интенсивность излучения по следующему закону (рис.6):

**I = Iо е–-****µх** (2)

где: **I = Еγn/t; n/t** – число гамма-квантов, падающих на единицу поверхности в единицу времени (плотность потока гамма-квантов); **m–** коэффициент поглощения; **х** – толщина поглотителя (вещества), см; **Iо –** интенсивность квантов до прохождения поглотителя, МэВ/с.

В формуле (2) величину **µ** можно найти в таблицах, ноона не несет прямой информации о степени поглощения гамма лучей веществом.

В практических расчетах удобно пользоваться и такой табличной величиной, как "толщина слоя половинного ослабления". Толщина слоя половинного ослабления – это такая толщина слоя материала, проходя которую интенсивность излучения гамма-квантов уменьшается в 2 раза. Запишем уравнение (2) в виде:

**Iо /I = е– µх** (3)

Полагая Iо/I = 2 и логарифмируя правую и левую части уравнения (3), получим: ln2 = md, d = 0,693/m.

Тогда, формула (3) примет вид:

**I = Iо е– 0,693х/d** (4)

Толщина слоя половинного ослабления **d** берется из таблиц, но если они отсутствуют, то эта величина может быть вычислена приближенно по плотности материала **ρ**: **d = 13/r,** (5) где: **13 см** – слой воды, ослабляющий гамма-излучение в 2 раза; **r –** плотность материала, г/см3. Для некоторых материалов величины **d** представлены в таблицах.

**х**

**I0**

**I**

**γ≈**

**γ■≈**

*Рис. 6. К оценке ослабления гамма-излучений веществом*

Выражение (4) можно преобразовать следующим образом:

**Косл = I0/I = ехр (0,693х/d),** (6)

где **Косл**– коэффициент ослабления гамма-излучения проходящего через преграду толщиной **х** и значением слоя половинного ослабления для данного материала **d** (рис.6). Выражение (6) можно упростить, полагая, что 0,693 = Ln2, получим:

**Косл = 2х/d** (7)

Расчеты показывают, что проникающая способность гамма-излучения в воздухе – десятки и сотни метров, в твердых телах – многие сантиметры, в биологической ткани человека часть гамма-квантов проходят через человека насквозь, другие поглощаются.

#### Бета-излучение

В отличие от фотонов заряженные частицы теряют свою энергию в конденсированной фазе сравнительно небольшими порциями в результате многократных столкновений с электронами среды.

Прохождение бета-частиц через вещество сопровождается упругими и неупругими соударениями с ядрами и электронами тормозящей среды.

Упругое рассеяние бета-частиц на ядрах более вероятно и осуществляется при относительно низких энергиях электронов **Еβ < 0,5 МэВ (**рис.7). Упругое рассеяние бета-частиц на электронах в **Z** раз (**Z** – величина заряда ядра) менее вероятно, чем на ядрах (рис.8). Возможен в редких случаях и сдвиг ядер атомов кристаллической решетки (рис.9).

При энергии бета-частиц выше энергии связи электрона c ядром (до ≈ 1 МэВ) основным механизмом потерь энергии является неупругое рассеяние на связанных электронах, приводящее к ионизации и возбуждению атомов (рис.10).

При больших энергиях электронов главным механизмом потерь энергии является радиационное торможение, при котором возникает тормозное излучение.

*Рис.7. Упругое рассеяние бета-частиц на ядрах атомов*

**е–**

**е–**

**е–**

**е–**

*Рис.8. Упругое рассеяние бета-частиц на электронах атома*

**е–**

*Рис.9. Вариант смещения ядра атома с кристаллической решетки*

**е–**

**β–**

**β–**

*Рис.10. Ионизация атома бета-частицами (неупругое взаимодействие)*

Одним из вариантов неупругого взаимодействия является К–захват.

Таким образом, процессы взаимодействия бета-частиц со средой характеризуются радиационным торможением и относительно большой потерей энергии или значительным изменением направления их движения в элементарном акте. Вследствие этого взаимодействия интенсивность пучка бета-частиц уменьшается почти по экспоненте с ростом толщины поглощающего слоя **х**, т.е. для бета-частиц справедлива формула (3).

Путь бета-частиц в веществе представляет ломаную линию, а пробег бета-частиц одинаковых энергий имеет значительный разброс. Это связано с тем, что масса бета-частиц крайне мала, поэтому вероятность упругого рассеяния на ядрах больше, чем у тяжелых частиц. В таблице 2 показана средняя глубина пробега бета-частиц в воздухе, биологической ткани и для примера в алюминии.

* Итак, бета-частицы не имеют точной глубины проникновения, так как обладают непрерывным энергетическим спектром. Для грубой оценки глубины пробега бета-частиц пользуются приближенными формулами. Одна из них:

**Rср/Rвозд = rвозд/rср**(7)

где: Rср – длина пробега в среде; Rвозд – длина пробега в воздухе, Rвозд = 450 Eb; rвозд и rср – плотность воздуха и среды соответственно; Eb – энергия бета-частиц.

#### Альфа-излучение

* Энергия альфа-частиц находится в пределах 4–10 МэВ, скорость примерно 20000 км/с. Имея большую массу и значительную энергию, они ее расходуют в основном на неупругое рассеяние на электронах атомов. Таким образом, альфа-частицы обладают большой ионизирующей способностью. В редких случаях альфа-частица может проникнуть в ядро и вызвать ядерную реакцию. Полная ионизация, создаваемая альфа-частицами на всем пути в среде, составляет примерно 120–150 тысяч пар ионов.

**Таблица 2 Пробеги бета-частиц**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Максимальная энергия бета-частиц, Е, МэВ | Воздух, см | Биологическая ткань, мм | Алюминий, мм |
| 0,01 | 0,13 | 0,002 | 0,0006 |
| 0,02 | 0,52 | 0,008 | 0,0026 |
| 0,03 | 1,12 | 0,018 | 0,0056 |
| 0.04 | 1,94 | 0,030 | 0,0096 |
| 0,05 | 2,91 | 0,046 | 0,0144 |
| 0,06 | 4,03 | 0,063 | 0.0200 |
| 0.07 | 5,29 | 0,083 | 0,0263 |
| 0,08 | 6,93 | 0,109 | 0,0344 |
| 0,09 | 8,20 | 0,129 | 0,0407 |
| 0,1 | 10,1 | 0,158 | 0,050 |
| 0,5 | 119 | 1,87 | 0,593 |
| 1,0 | 306 | 4,80 | 1,52 |
| 1,5 | 494 | 7,80 | 2,47 |
| 2,0 | 710 | 11,1 | 3,51 |
| 2,5 | 910 | 14,3 | 4,52 |
| 3,0 | 1100 | 17,4 | 5,50 |
| 5,0 | 1900 | 29,8 | 9,42 |
| 10 | 3900 | 60,8 | 19,2 |

Удельная ионизация изменяется от 25 до 60 тысяч пар ионов на 1 см пути в воздухе. Удельная ионизация увеличивается к концу пробега альфа-частиц. Это связано с тем, что при прохождении через вещество энергия альфа-частицы, а значит, и ее скорость уменьшается. В результате увеличивается вероятность ее взаимодействия с электронами атома. Это приводит к увеличению ионизации вещества, достигая максимума в конце пробега.

Альфа-частицы, имея двойной электрический заряд и большую массу буквально "продираются" через атомы вещества. Вследствие сильных потерь энергии альфа-частицы проникают на незначительную глубину.

В отличие от фотонов и бета-частиц длина пробега альфа-частиц экспоненциальному закону не подчиняется. Поэтому пользуются империческими формулами. Так, например, для воздуха при 0°С и давлении 760 мм рт. ст. (0,1Па), длина пробега альфа-частиц с энергией от 3 до 8 МэВ может быть рассчитана по **формуле Гейгера**:

**Ra = (Ea2/3) /3, (см)** (8)

Длина пробега **Rα** альфа-частиц в воздухе при температуре 15°С и давлении **0,1** **Па** определяется по формулам:

**Ra = 0,318 Ea2/3 , (см) – если Ea = (4–7) МэВ**; (9)

**Ra = 0,56 Ea2/3 , (см) – если Ea < 4 МэВ**. (10)

где: Ea– энергия альфа-частиц.

Пробег альфа-частиц в веществе, отличном от воздуха определяют по **формуле Брэгга**:

**Ra = 10–4(M Ea3)1/2 /r, см** (11)

где**: М** – атомная масса; **r** – плотность вещества, г/см3.

Расчет по приведенным формулам показывает, что пробег альфа-частиц в воздухе не превышает 10 см, а в биологической ткани 120 мкм, т.е. реальную опасность альфа частицы представляют при попадании их во внутрь организма.

В таблице 3 показана длина пробега альфа-частиц в воздухе, биологической ткани и алюминии. Алюминий взят в качестве примера, так как именно металлы чаще всего применяются для защиты человека и электронных схем от ионизирующих излучений.

* Сравнительная характеристика способности проникновения излучений через различные вещества с учетом толщины преграды поясняется рис.11.

**Таблица 3 Пробеги альфа-частиц в воздухе, биологической ткани и алюминии**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Энергия альфа частиц Еα, МэВ | Воздух, см | Биологическая ткань, мкм | Алюминий, мкм |
| 4,0 | 2,5 | 31 | 16 |
| 4,5 | 3,0 | 37 | 20 |
| 5,0 | 3,5 | 43 | 23 |
| 6,0 | 4,6 | 56 | 30 |
| 7,0 | 5,9 | 72 | 38 |
| 8,0 | 7,4 | 91 | 48 |
| 9,0 | 8,9 | 110 | 58 |
| 10 | 10,6 | 130 | 69 |

Гамма и рентгеновские лучи

Альфа- излучение

Бета-излучение

Нейтроны

**Бумага Орг. стекло Бетон Свинец**

*Рис.11. Проникающая способность разных видов  
 ионизирующего излучения*

## Характеристики ионизирующих излучений. Единицы измерения

Для установления закономерностей распространения и поглощения ионизирующих излучений в среде, в том числе и в биологической ткани, введены следующие основные характеристики: *энергия частиц и гамма-квантов, плотность потока частиц (фотонов), флюенс-частиц (фотонов), поглощенная доза, мощность поглощенной дозы, керма, экспозиционная доза фотонного излучения, мощность экспозиционной дозы, эквивалентная доза, мощность эквивалентной дозы, эффективная доза, полувековая эквивалентная доза, коллективная эквивалентная доза и др.*

Рассмотрим только некоторые характеристики, которые будут использованы на практических занятиях.

***Энергия***частиц или гамма-квантов – ***Е*** выражается в **Джоулях** или э**лектрон-вольтах (эВ)**. Величина Джоуль используется в системе СИ, **электрон вольт (эВ)** – внесистемная единица.

**1эВ = 1,6.10–19Дж** (12)

где: **1эВ** – это энергия, которую приобретает электрон, ускоренный разностью потенциалов в **1В.**

***Плотность потока частиц*** (гамма-квантов) **j –** выражается числом частиц (гамма-квантов), падающих на единицу поверхности в единицу времени. Поверхность расположена нормально к направлению движения частиц. Единица измерения – частица/м2 с.

***Флюенс*** частиц (фотонов) характеризует полное число частиц, прошедших через единичную поверхность за все время облучения:

**Ф = jt** (13)

Единица измерения флюенса – частица/м2.

* Исторически получилось так, что сначала были открыты гамма-лучи. Было замечено, что они имеют свойство ионизировать воздух. Поэтому для характеристики поля было введено понятие экспозиционная доза.

***Экспозиционная доза*** рентгеновского и гамма-излучения характеризует их способность создавать в веществе заряженные частицы. Выражается отношением суммарного электрического заряда ионов одного знака **Q,** образованного излучением в некотором объеме воздуха к массе **dm** в этом объеме:

**Х = *d*Q/*dm*** (14)

Единица измерения в системе СИ – Кулон/кг, внесистемная единица – Рентген.

**1 Рентген** – это доза фотонного излучения, при прохождении которого через 1см3 сухого воздуха при температуре 0°С, давлении 1013гПа (760 мм рт. ст.), образуется 2.109 пар ионов, несущих электрический заряд в одну электростатическую единицу количества электричества данного знака.

***Доза в 1Р накапливается за 1 час на расстоянии 1м от источника радия массой в 1г, т.е. активностью в 1Ки.***

Между единицами существует следующая зависимость: **1Р = 2,58·10–4 Кл/кг**; **1Кл/кг = 3,876.103 Р.**

Учитывая, что экспозиционная доза накапливается во времени, на практике используется и понятие мощность экспозиционной дозы или уровень радиации.

***Мощность экспозиционной дозы*** – отношение приращения экспозиционной дозы *dХ* за интервал времени *dt* к этому интервалу:

** = *d*х/*dt*** (15)

Единицы измерения: в системе СИ – А/кг; внесистемная единица – Р/с, Р/**ч, мР/ч, мкР/ч** и т.д.

* После того, как были открыты бета-излучение и альфа-излучение, стал вопрос оценки этих излучений при взаимодействии с окружающей средой. Экспозиционная доза для оценки оказалась непригодной. Поэтому была предложена, казалось бы, универсальная характеристика – поглощенная доза.

***Поглощенная доза*** – количество энергии ***Е***, переданное веществу излучением любого вида пересчете на единицу массы **m** любого вещества:

**D = *dE*/*dm*, (Дж/кг).** (16)

**1Дж/кг = 1Грей.** Внесистемная единица – рад (радиационная адсорбционная доза). **1Грей = 100 рад.** Можно использовать и дробные значения единиц, например: мГр, мкГр, мрад, мкрад и др.

Доза в органе или биологической ткани (DT) – средняя поглощенная доза в определенном органе или ткани человеческого тела:

**DT = WТ/*m*T** (17)

где **WТ** – полная энергия, переданная ионизирующим излучением ткани или органу; **mT –** масса органа или ткани; **DT –** средняя поглощенная доза в массе ткани ***dm.***

Вредное воздействие ионизирующих излучений на человека зависит не только от полученной дозы, но и от времени, за которое она получена, поэтому введено понятие мощность поглощенной дозы.

***Мощность поглощенной дозы*** – отношение приращения поглощенной дозы ***d*D** за время ***dt:***

** = Р = *d*D/*dt*** (18)

Единицы измерения мощности дозы: рад/с, Гр/с, рад/ч, Гр/ч и т.д.

Мощность поглощенной дозы в ряде случаев можно рассматривать как величину постоянную или изменяющуюся по экспоненте, т.е.:

**Р = соnst или Р = Рое – 0,693 t/T** (19)

* Замечено, что при облучении одной и той же энергией биологической ткани человека, (т.е. при получении одной и той же дозы), но различными видами лучей последствия для здоровья будут разными. Например, если при облучении альфа частицами вероятность заболеть раком очень высокая, то при облучении бета- частицами значительно меньше, а при облучении гамма-лучами еще меньше. Поэтому для биологической ткани была введена характеристика – эквивалентная доза.

***Эквивалентная доза*** **(НТ.R)**– поглощенная доза в органе или ткани, умноженная на соответствующий коэффициент качества излучения **К** данного вида излучения **R.** Введена для оценки последствий облучения биологической ткани малыми дозами (дозами, не превышающими 5 предельно-допустимых доз при облучении всего тела человека), т.е. 250 мЗв/год. Ее нельзя использовать для оценки последствий облучения большими дозами. Доза эквивалентная равна:

**НT.R = DT.R • WR**, (20)

где**: DT.R –** поглощенная доза биологической тканью излучением **R**; **WR** – коэффициент качества для отдельных видов излучений **R (**альфа-частиц, бета-частиц, гамма-квантов и др.), учитывающий относительную эффективность различных видов излучения в индуцирования биологических эффектов (табл.4). Формула (20) справедлива для оценки как внешнего, так и внутреннего облучения только отдельных органов и тканей или равномерного облучения всего тела человека. При воздействии различных видов излучений одновременно с различными взвешивающими коэффициентами эквивалентная доза определяется как сумма эквивалентных доз для всех этих видов излучения **R**:

**НТ = Σ НТ.R**(21)

* Установлено, что при одной и той же поглощенной дозе биологический эффект зависит от вида ионизирующих излучений и плотности по тока излучения.

Единица измерения эквивалентной дозы в системе СИ: **Зиверт** (Зв).

**Зиверт** – единица эквивалентной дозы излучения любой природы в биологической ткани, которая создает такой же биологический эффект, как и поглощенная доза в 1 Гр образцового рентгеновского и гамма-излучения.

Существует и внесистемная единица – **бэр** (биологический эквивалент рада), которая постепенно изымается из пользования. **1 Зв = 100 бэр.**

**Таблица 4 Коэффициенты качества излучения**

|  |  |
| --- | --- |
| Вид излучения и диапазон энергии | Коэффициенты качества WR |
| Фотоны всех энергий | 1 |
| Электроны всех энергий | 1 |
| Альфа-частицы | 20 |
| Нейтроны с энергией: |  |
| < 10 кэВ | 5 |
| от 10 кэВ до 100 кэВ | 10 |
| > 100 кэВ до 2 Мэв | 20 |
| > 2 МэВ до 20 МэВ | 10 |
| > 20 МэВ | 5 |
| Протоны с энергией более 2МэВ, кроме протонов отдачи | 5 |
| Альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра | 20 |
| Примечание. Все значения относятся к излучению, падающему на тело, а в случае внутреннего облучения – испускаемому при ядерном превращении. | |

***Мощность эквивалентной дозы –*** отношение приращения эквивалентной дозы ***d*H** за время ***dt*:**

** = *d*H/*dt***(22)

Единицы измерения мощности эквивалентной дозы **м Зв/с, мкЗв/с, бэр/с, мбэр/с** и т.д**.**

В случае неравномерного облучения тела человека формула (20) не может быть использована, так как биологический эффект может оказаться другим. Поэтому введена "эффективная доза".

***Эффективная доза* (Е)** – это такая доза при неравномерном облучении тела человека, которая равна эквивалентной дозе при равномерном облучении всего организма, при которой риск неблагоприятных последствий будет таким же, как и при неравномерном облучении тела человека.

Учет неравномерного облучения производится с помощью коэффициента радиационного риска (взвешивающий коэффициент), который учитывает радио чувствительность различных органов человека:

**Е = SHiWTi**, (23)

где **Нi -** эквивалентная доза в данном **i**-том органе, биологической ткани; **WTi -** взвешивающий коэффициент для тканей и органов, учитывающий чувствительность разных органов и тканей при возникновении стохастических эффектов радиации в **i-м** органе; сумма рассматривается по всем тканям **т**.

Взвешивающий коэффициент характеризует отношение стохастического риска поражения какого-либо органа или ткани к риску поражения всего организма при равномерном облучении всего тела. Риск поражения всего организма принимают равным 1, т.е. сумма i-х коэффициентов риска равна 1. Рекомендуемые МКРЗ значения **WTi** приведены в таблице 5. Единицы измерения те же, что и эквивалентной дозы.

**Таблица 5 Взвешивающие коэффициенты WT*\****

|  |  |
| --- | --- |
| Ткань или орган | Коэффициент WTI |
| Половые железы | 0,20 |
| Красный костный мозг | 0,12 |
| Толстый кишечник | 0,12 |
| Легкие | 0,12 |
| Желудок | 0,12 |
| Мочевой пузырь | 0,05 |
| Молочные железы | 0,05 |
| Печень | 0,05 |
| Пищевод | 0,05 |
| Щитовидная железа | 0,05 |
| Кожа, клетки костных поверхностей | 0,01 |
| Остальные органы | 0,05 |

Подчеркнем, что и эквивалентная и эффективная доза являются величинами, которые предназначены для применения в радиационной безопасности для оценки вероятности стохастических эффектов.

Отметим, что **1Р** соответствует **0,873 рада** в воздухе и **1Р** соответствует **0,95 рада** в биологической ткани.

***Полувековая эквивалентная доза***. Поглощенная доза при внешнем облучении формируется в то самое время, когда ткань или орган находятся в поле излучения. Однако при внутреннем облучении формирование суммарной поглощенной дозы растягивается во времени, и она накапливается постепенно по мере радиоактивного распада радионуклида и его выведения из организма. Распределение во времени поглощенной дозы зависит от типа радионуклида, его физико-химической формы, характера поступления и ткани, в которой он откладывается. Для учета этого распределения и введено понятие ***полувековая эквивалентная доза.*** Она представляет собой временной интеграл мощности эквивалентной дозы в определенной ткани (органе). В качестве предела интегрирования МКРЗ установила 50 лет для взрослых и 70 лет для детей (рис.12).

***Полувековая эффективная доза*** может быть получена, если умножить полувековые эквивалентные дозы в отдельных органах на соответствующие весовые множители **WT** и затем их просуммировать.

***Коллективная эквивалентная доза* (Sт)** в ткани **Т** применяется для выражения общего облучения конкретной ткани у группы лиц на основе таблицы 5.

***Коллективная эффективная доза* (S)** относится, в целом, к облученной популяции. Она равна произведению средней эффективной дозы на число лиц в облученной группе. В определении коллективной эквивалентной и коллективной эффективной доз не указано время, за которое она получена. Поэтому обычно указывается и время, за которое получена доза для группы лиц. Единицы коллективных доз – **чел\*Зв** и **чел\*бэр.**

**Мощность эквивалентной дозы**

С длинным эффективным периодом полувыведения

С коротким эффективным периодом полувыведения

**Годы**

**50 л**

*Рис.12. Мощность эквивалентной дозы в органе (ткани) после поступления радионуклида с коротким и длинным периодом полувыведения*

## Основные способы обнаружения и измерения ионизирующих излучений

Для решения задач радиационной безопасности необходимо знать основные характеристики ионизирующих излучений. Известно, что все ионизирующие излучения взаимодействуют со средой и вызывают изменения ее физических и химических свойств. Это и используется для обнаружения и измерения характеристик ионизирующих излучений.

Наиболее распространенные способы регистрации: фотографический, химический, полупроводниковый, сцинтилляционный, биологический, ионизационный.

**Фотографический –** основан на потемнении фотоэмульсии под воздействием ионизирующих излучений (разновидность химического).

**Химический** – основан на измерении концентрации ионов воды, которые появились в результате ее облучения ионизирующими излучениями. Можно использовать свойство некоторых веществ изменять свой цвет под воздействием излучений.

**Полупроводниковый** – основан на том, что некоторые полупроводники изменяют свое сопротивление под воздействием ионизирующих излучений.

**Сцинтилляционный –** основан на том, что некоторые вещества под воздействием ионизирующих излучений испускают фотоны видимого света.

**Биологический** – основан на исследовании состава крови и структуры зубов.

**Ионизационный –** основан на ионизации газов.