

# 1. ПРОХОЖДЕНИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ СКВОЗЬ ВЕЩЕСТВО

## 1.1 Терминология: взаимодействие ионизирующих излучений со средой

**Энергия излучения**, переданная веществу, - разность между суммарной энергией всех заряженных и незаряженных частиц (без учета энергии покоя), входящих в данный объем вещества, и суммарной энергией всех частиц, выходящих из этого объема, плюс изменение энергий, связанное с массой покоя частиц при ядерных превращениях, происходящих в объеме.

**Сечение взаимодействия ионизирующих частиц** (сечение взаимодействия) - вероятность взаимодействия ионизирующих частиц с одним атомом, электроном, ядром атома или всеми атомами (электронами, ядрами), находящимися в данном объеме вещества.

**Примечание.** Вероятность взаимодействия характеризуется площадью поперечного сечения такой воображаемой сферы, условно приписываемой бомбардируемой частице (атому, электрону, ядру), проходя через которую бомбардирующие частицы участвуют в реакциях или процессах взаимодействия определенного типа с бомбардируемой частицей. Это сечение взаимодействия часто называют парциальным.

**Полное сечение взаимодействия** - сумма всех сечений взаимодействия  $\sigma$ , ионизирующих частиц данного вида, соответствующих различным процессам или реакциям:  $\Sigma = \sum \sigma_i$ .

**Примечание.** Указанные сечения взаимодействия  $\sigma_i$ , отнесенные к одному атому, электрону или ядру атома, называют микроскопическими, а отнесенные ко всем атомам (электронам, ядрам атомов), находящимся в единице объема вещества (т. е. к концентрации  $C$  частиц-мишеней), называют макроскопическими:  $\Sigma_i = \sigma_i \cdot C$ .

Например, если микроскопическое сечение взаимодействия для одного электрона  $\sigma_e$ , см<sup>2</sup>, или одного атома  $\sigma$ , см<sup>2</sup>, то макроскопические сечения взаимодействия  $\Sigma$ , см<sup>-1</sup>:

$$\Sigma = \sigma_e \rho Z (N_A/A) \quad \Sigma = \sigma \rho C (N_A/A).$$

где  $\rho$  - плотность вещества;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  - постоянная Авогадро (число молекул в моле вещества);  $Z$  - атомный номер;  $A$  - атомная масса.

**Линейный коэффициент ослабления** - полное макроскопическое сечение взаимодействия косвенно ионизирующих частиц или отношение доли  $u$  и  $dN/N$  косвенно ионизирующих частиц, испытавших взаимодействие при прохождении пути  $dl$  в веществе к длине этого пути:

$$\mu = \mu / \rho \quad (dN/dl)$$

**Примечание.** Массовый коэффициент ослабления излучения  $\mu_m$ , на единице массы вещества выражается через линейный коэффициент  $\mu$  и атомный коэффициент  $\mu_a$ :

$$\mu_m = \mu_a \cdot C / \rho = \mu_a (N_A/A).$$

**Слой половинного ослабления излучения** - толщина слоя вещества, ослабляющего узкий (или широкий) пучок мононаправленного излучения в 2 раза:  $\Delta_{1/2}$ .

**Длина релаксации** - толщина  $l$  слоя вещества, ослабляющего пучок мононаправленного излучения в  $e$  раз ( $e$  - основание натуральных логарифмов):  $l = \Delta_{1/2} / 0,693$ .

**Примечание.** Для нейтронов обычно используют длину релаксации, измеренную в геометрии широкого пучка.

**Линейный коэффициент передачи энергии**  $\mu_{tr}$  - отношение доли энергий  $d\omega/\omega$  косвенно ионизирующего излучения (исключая энергию покоя частиц), которая преобразуется в кинетическую энергию заряженных частиц при прохождении элементарного пути  $dl$  в веществе, к длине этого пути:

$$\mu_{tr} = (1/\omega) (d\omega/dl)$$

**Примечание.** Массовый коэффициент передачи энергии  $\mu_{tr,m}$  выражается через линейный:  $\mu_{tr,m} = \mu_{tr} / \rho$ , где  $\rho$  - плотность вещества.

**Линейный коэффициент поглощения энергии**  $\mu_{en}^*$  - произведение линейного коэффициента передачи энергии  $\mu_{tr}$  на разность между единицей и долей  $g$  энергии вторичных заряженных частиц, переходящей в тормозное излучение в данном веществе:  $\mu_{en} = \mu_{tr} (1 - g)'$

**Примечание.** Массовый коэффициент поглощения энергии  $\mu_{en,m}$  выражается через линейный:

$$\mu_{en,m} = \mu_{en} / \rho = \mu_{tr,m} (1 - g).$$

## 1.2 Типы взаимодействия излучения с веществом

Процесс прохождения **ионизирующего излучения**, несущего большой запас энергии, через вещество, оставляет свой след в виде изменений структуры вещества.

**Ионизирующее излучение (радиация)** - поток частиц или квантов электромагнитного излучения, взаимодействие которого с веществом приводит к ионизации и возбуждению его атомов и молекул. К ионизирующему излучению относятся потоки электронов, позитронов, протонов, дейтронов,  $\alpha$ -частиц и др. заряженных частиц, а также потоки нейтронов, рентгеновское и гамма-излучение.

При прохождении через вещество частицы взаимодействуют с атомами, из которых оно состоит, т.е. электронами и атомными ядрами (или нуклонами ядер). Характер взаимодействия излучения с веществом зависит от его вида, энергии, плотности потока, а также от физических и химических свойств самого вещества. Ядерные реакции с веществом активно происходят при взаимодействии с нейтронным излучением. Для других типов ионизирующих излучений возникновение ядерных реакций

маловероятно. Существенно заметное протекание ядерных реакций на ядрах атомов вещества возможно лишь при значительных потоках  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц,  $\gamma$ -квантах больших энергий (более 1,02 МэВ) и при наличии в веществе ядер с большими сечениями конкретных ядерных реакций (например, фотоядерных). В большинстве же случаев энергия ионизирующего излучения расходуется главным образом на взаимодействие с электронными оболочками всех атомов вещества.

Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом бывает двух типов: упругое и неупругое.

**Упругое рассеяние** частиц – процесс столкновения частиц, в результате которого меняются только их импульсы, а внутреннее состояние остается неизменным.

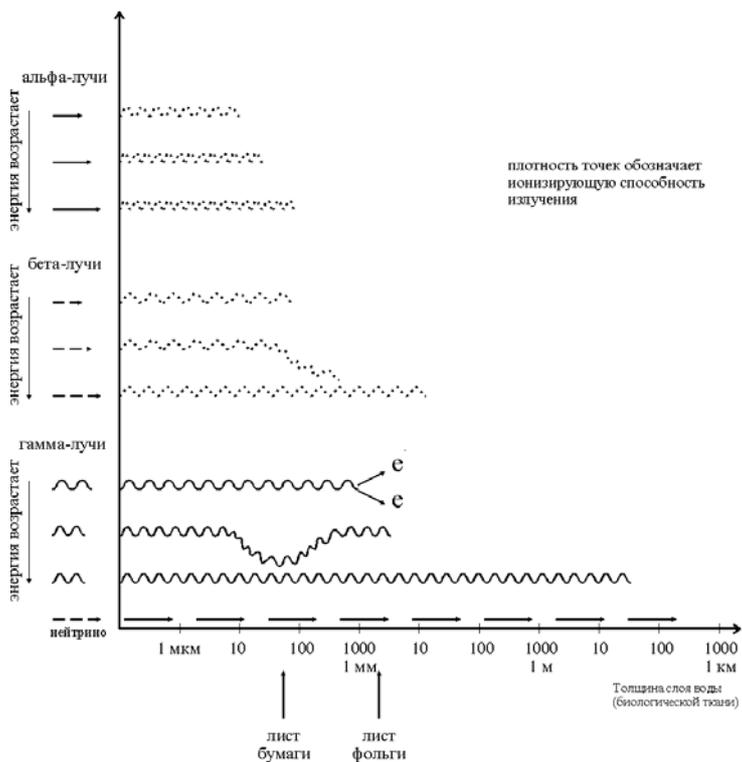
**Неупругое рассеяние** частиц – столкновение частиц, приводящее к изменению их внутреннего состояния, превращению в другие частицы или дополнительному рождению новых частиц.

Ионизирующие излучения в виде  $\alpha$ - и  $\beta$ -частиц при неупругом взаимодействии с электронными оболочками атомов среды (вещества) сопровождается потерей энергии ионизирующего излучения на ионизацию и возбуждение атомов среды, т.е. оказывает прямое ионизирующее действие на вещество, в котором распространяется. Взаимодействие  $\beta$ -излучения с электронными оболочками атомов среды (вещества) иногда называют косвенно ионизирующим излучением.

Количественно ионизирующее действие излучения характеризуют удельной ионизацией. Отметим, что удельная ионизация, создаваемая  $\gamma$ -излучением, приблизительно в  $5 \cdot 10^4$  раз меньше удельной ионизации от  $\alpha$ -частиц и 50 раз меньше удельной ионизации от  $\beta$ -частиц такой же энергии. Для количественной характеристики энергии ионизирующего излучения, поглощенной в единице массы облучаемого вещества, введена величина, называемая поглощенной дозой ионизирующего излучения. В зависимости от поглощенной дозы ионизирующего излучения нарушается структура вещества, в частности, степень действия ионизирующего излучения на конструкционные материалы и другие объекты.

От характера взаимодействия ионизирующего излучения с конкретным веществом зависит проникающая способность ионизирующего излучения. Эта величина имеет важное техническое значение для решения ряда задач:

прогностического расчета изменения свойств конструкционных материалов, расчета защиты от ионизирующего излучения, регистрации излучения и др.



**Рис. 1.** Схема, иллюстрирующая ионизирующую способность и проникновение различных видов излучений в вещество (биологическая ткань, вода)

### 1.3 Ионизация и возбуждение

Ионизация и возбуждение – первый результат действия излучения на вещество.

**Ионизация** – превращение атомов или молекул в положительные ионы в результате отрыва одного или нескольких электронов. Ионизации также могут подвергаться положительные ионы, что приводит к увеличению кратности их заряда. Энергия, необходимая для отрыва электрона, называется энергией ионизации. Ионизация происходит при поглощении электромагнитного излучения (фотоионизация), при нагревании

газа (термическая ионизация), при воздействии электрического поля (полевая ионизация), при столкновении частиц с электронами, ионами, атомами (столкновительная ионизация) и др. Нейтральные атомы и молекулы могут в особых случаях присоединять электроны, образуя отрицательные ионы.

**Возбужденное состояние** квантово-механической системы – неустойчивое состояние с энергией, превышающей энергию основного состояния.

Энергия излучения, проходящего через вещество, теряется при столкновениях главным образом с электронами. Электрон в атоме движется и удерживается на том или ином расстоянии от ядра благодаря действию двух равных, но противоположных сил – силы притяжения между отрицательно заряженным электроном и положительным ядром и центробежной силой отталкивания, возникающей в результате движения вокруг ядра. Если электрон при столкновении с частицей излучения получил значительное ускорение, он может преодолеть силу притяжения к ядру и покинуть атом и молекулу.

Молекула при этом превращается в положительный ион. Процесс потери электрона атомом или молекулой называют ионизацией, а ядерные излучения по этой причине часто называют ионизирующими. Если же ускорение недостаточно для ионизации, результатом столкновения явится изменение «орбиты» такого электрона, увеличение расстояния электрона от ядра, т.е. увеличение потенциальной энергии электрона, «возбуждение» атома или молекулы. Получившуюся при этом молекулу называют электронно-возбужденной или просто возбужденной. Такой процесс могут вызывать не только ионизирующие излучения, но и свет.

Ионы, выбитые электроны и возбужденные молекулы - вот что в первый момент оставляют на своем пути излучения. Этот первый результат действия излучения на молекулу можно символически записать так:  $M \Rightarrow M^+ + e$ ,  $M \Rightarrow M^*$ , понимая под  $M$  молекулу, электрон которой удален в результате столкновения с частицей излучения;  $M^+$  - ион, получившийся при этом, который называют молекулярным, а  $M^*$  - возбужденная молекула, символ  $\Rightarrow$  обозначает действие излучения. Время жизни этих первичных продуктов действия излучения на вещество крайне мало -  $10^{-12}$  -  $10^{-6}$  сек и лишь в некоторых случаях несколько больше, однако их существование надежно доказано, а поведение изучается экспериментально.

Доказательством образования заряженных частиц - ионов и электронов - является тот факт, что вещества, обычно являющиеся изоляторами - воздух, стекло, пластики - в поле излучения становятся проводниками электричества и, в тем большей степени, чем больше интенсивность излучения. Стоит облучение прекратить, и проводимость резко упадет.