

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
"Полоцкий государственный университет"

**Н.А. ОПАРИНА, О.Н. ПЕТРОВИЧ**

# **РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ  
для студентов технических специальностей

Новополоцк 2003

УДК 621.039 (075)

Одобен и рекомендован к изданию  
методической комиссией радиотехнического факультета

Кафедра физики

Авторы:

Н.А. ОПАРИНА, ст. преподаватель  
О.Н. ПЕТРОВИЧ, ассистент

Рецензенты:

С.А. ХОРЕВА, доктор биол. наук, профессор  
(кафедра экологии БНТУ)  
И.Н. КЛЫШКО, канд. техн. наук, доцент

ISBN 985-418-127-8

© УО "Полоцкий государственный университет", 2002

## 1. АТОМНОЕ ЯДРО

### 1.1. Состав ядра

В 1911 году Резерфорд предложил ядерную модель атома: подавляющая часть массы атома сосредоточена в его центральной части – в ядре. Ядро весьма мало по размеру. Диаметр атома  $D_a \sim 10^{-10}$  м, диаметр ядра  $D_{я} \sim 10^{-15}$  м.

Установлено сложное строение ядра. В 1932 году впервые была высказана идея о том, что ядра атомов состоят из *протонов и нейтронов*. Эти частицы получили название *нуклонов – "ядерных частиц"*.

**Масса.** Масса нуклонов значительно превышает массу электрона. Так, масса протона  $m_p = 938.28 \text{ МэВ} = 1836.1 \cdot m_e$ ; масса нейтрона  $m_n = 939.57 \text{ МэВ} = 1838.6 \cdot m_e$  ( $m_e = 0.511 \text{ МэВ} = 9.11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$ ).

Разность масс протона и нейтрона равна  $(m_n - m_p) = 1.3 \text{ МэВ} = 2.5 m_e$ .

В ядерной физике массу ядерных частиц, ядер, атомов часто измеряют не в килограммах, а в **атомных единицах массы (а.е.м.)**. За одну атомную единицу массы принимают 1/12 часть массы нейтрального атома углерода, которую, естественно, можно выразить и в килограммах ( $1 \text{ а.е.м.} = 931,502 \text{ МэВ} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$ ). Разность масс нейтрона и протона в атомных единицах массы составляет  $(m_n - m_p) = 0.00139 \text{ а.е.м.}$

**Энергия.** Масса определяет имеющийся в частице (ядре, атоме) запас энергии. Это следует из установленной Эйнштейном взаимосвязи между массой  $m$  и энергией  $E$

$$E = m \cdot c^2 \quad (1.1)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме.

Поэтому энергия покоя протона, нейтрона и электрона различна.

Отметим, что в ядерной физике, наряду с единицей энергии джоуль, рекомендованной для применения системой единиц измерения СИ, традиционно используется и особая единица измерения энергии – **электронвольт (эВ)**.

Один электронвольт равен энергии, приобретаемой электроном, прошедшим ускоряющую разность потенциалов один вольт ( $1\text{эВ} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ ). Один электронвольт – малая величина энергии. Поэтому используются бо-

лее крупные единицы энергии: килоэлектронвольт ( $1 \text{ КэВ} = 10^3 \text{ эВ}$ ), мегаэлектронвольт ( $1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}$ ), гигаэлектронвольт ( $1 \text{ ГэВ} = 10^9 \text{ эВ}$ ).

Массу частиц в ядерной физике также измеряют в единицах энергии. Формулу (1.1) иногда пишут в виде

$$\mathbf{E} = (931 \cdot m) \text{ МэВ}, \quad (1.2)$$

здесь  $m$  измеряется в а.е.м., а энергия получится в МэВ.

**Электрический заряд.** Многие ядерные частицы несут в себе электрический заряд. Его выражают часто в единицах заряда электрона  $e$ . Заряд протона  $q_p = +1 e$ . Заряд нейтрона равен нулю.

**Спин.** Понятие спина было введено для объяснения некоторых особенностей поведения электрона. Первоначально предполагали, что электрон вращается вокруг своей оси подобно волчку, а значит обладает собственным моментом импульса – спином (по-английски spin означает "верчение"). Однако это понятие о спине оказалось лишь грубой аналогией с классическим волчком. Сейчас считают, что спин – внутреннее, неотъемлемое свойство, подобное массе, заряду. Спином обладают многие ядерные, элементарные частицы, в том числе нейтроны и протоны. Модуль собственного момента импульса протона или нейтрона (и электрона) зависит от особого квантового числа  $s$ , которое называют спиновым квантовым числом (или просто спином). Число  $s$  для протона и нейтрона (а также электрона) одинаково и равно  $1/2$ .

**Магнитный момент.** Из курса общей физики (электричество) известно, что с любым электрическим макро- или микроком связана особая величина – магнитный момент  $\mu$ , определяющая намагниченность вещества. Вращающийся заряженный волчок также должен обладать магнитным моментом. Ну, а поскольку, протон, подобно электрону, есть "заряженный вращающийся волчок", то у него должен быть магнитный момент  $\mu_p$ .

Согласно опытным данным

$$\mu_p = +2.79 \cdot \mu_{\text{я}} \quad (1.3)$$

где  $\mu_{\text{я}}$  – ядерный магнетон ( $\mu_{\text{я}} = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5.05 \cdot 10^{-27} \text{ Дж/Тл}$ ).

Ядерный магнетон в 1836 раз меньше магнетона Бора, следовательно собственный магнитный момент протона примерно в 660 раз меньше, чем магнитный момент электрона.

Оказалось, что в целом незаряженный электрически нейтрон также имеет магнитный момент  $\mu_n$ , отличный от нуля и равный

$$\mu_n = -1.91 \cdot \mu_{\text{я}} \quad (1.4)$$

Отношение  $\mu_p / \mu_n = -3/2$ .

Существование магнитного момента у нейтрона объясняется тем, что нейтрон обладает сложной неоднородной структурой: в центре его находится положительный заряд, а на периферии – отрицательный заряд (в целом же сумма зарядов равна нулю).

В свободном состоянии нейтрон нестабилен (период полураспада примерно 12 мин) – он самопроизвольно распадается на протон, электрон и антинейтрино:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$

## 1.2. Характеристики ядра

Важнейшей характеристикой ядра является зарядовое число (заряд)  $Z$  и массовое число  $A$ . Зарядовое число  $Z$  равно количеству протонов, входящих в состав ядра, заряд которого равен  $+Ze$ . Число  $Z$  определяет порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева, поэтому его также называют атомным номером ядра. Массовое число  $A$  есть суммарное количество нуклонов в ядре. Понятно, что число нейтронов в ядре равно  $N = A - Z$ .

Эти характеристики ядра отражают в их символических обозначениях, которые записываются в виде

$${}^A_Z X; {}_Z X^A$$

где  $X$  – обозначение химического элемента.

Например, для ядер гелия –  ${}^4_2\text{He}$ , для ядер урана –  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

Ядра с разными  $A$ , но одинаковыми  $Z$  называются **изотопами**. Большинство химических элементов имеет по несколько изотопов. Так, например, олово имеет десять изотопов.

Ядра с одинаковым числом  $A$ , но различными  $Z$  называют **изобарами**. Ядра с одинаковым числом  $N$ , но различными  $Z$  называют **изотонами**. Существуют радиоактивные ядра с одинаковыми  $Z$  и  $A$ , отличающиеся периодами полураспада. Они называются **изомерами**.

В настоящее время известно около 350 устойчивых и 2000 неустойчивых радиоактивных ядер.

В природе встречаются элементы с атомным номером  $Z$  от 1 до 92, исключая технеций ( $Tc$ ;  $Z = 43$ ) и прометий ( $Pm$ ;  $Z = 61$ ). Остальные элементы с  $Z$  от 93 до 113 были получены искусственно (трансурановые).

**Размер ядра.** В первом приближении ядро можно считать шаром, радиус которого довольно точно определяется формулой

$$R_{\text{я}} = 1.3 \cdot 10^{-15} \cdot A^{\frac{1}{3}} \text{ м} = 1.3 \cdot A^{\frac{1}{3}} \Phi \quad (1.5)$$

где  $\Phi$  (ферми) – название единицы длины,  $1 \Phi = 10^{-15} \text{ м}$ .

Из формулы (1.5) следует, что объем ядра определяется числом нуклонов, плотность ядерного вещества (масса единицы объема) во всех ядрах примерно одинакова. Плотность вещества ядер имеет порядок  $10^{17} \text{ кг/м}^3$ . При такой плотности шар радиусом 200 м обладал бы массой Земли.

**Спин ядра.** Спины нуклонов складываются в результирующий спин ядра. Спин нуклона равен  $1/2$ . Поэтому квантовое число спина ядра  $I$  будет полуцелым при нечетном числе нуклонов  $A$ , целым или нулем при четном  $A$ . Этот факт был решающим при переходе от протонно-электронной к протонно-нейтронной модели ядра. Ядро азота  ${}^{14}_7\text{N}$ , если следовать протонно-электронной модели, должно состоять из 21 частицы и иметь полуцелый спин, так как спин каждой равен  $1/2$ .

Экспериментально измеренный спин ядра азота оказался равен 1, этот факт получил название "азотной катастрофы". В протонно-нейтронной модели ядро азота состоит из 7 протонов и 7 нейтронов, то есть из четного числа частиц, поэтому его спин должен быть целым.

Для четно-четно стабильных ядер ( $Z$  и  $N$  четные) спин всегда равен нулю, для нечетно-нечетных ядер ( $Z$  и  $N$  нечетные) спин целочисленный и отличный от нуля. Например, для  ${}^6_3\text{Li}$  спин равен 3, для остальных стабильных нечетно-нечетных ядер ( ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^{10}_5\text{B}$ ,  ${}^{14}_7\text{N}$ ) равен 1.

Опыты показывают, что спин ядер  $I$  не превышает нескольких единиц (для известных стабильных ядер  $9/2$ , за исключением ванадия-50, спин которого равен 6). Это указывает на то, что спины нуклонов могут располагаться антипараллельно.

Собственные магнитные моменты нуклонов не аддитивны, так как опыт дает для магнитного момента дейтрона  $\mu_d = 0.86$  (если бы была аддитивность, то  $\mu_d = 2.79 - 1.91 = 0.88$ ), что говорит о нецентральности сил, действующих между нуклонами.

### 1.3. Энергия связи ядра

Точные измерения показали, что масса ядра всегда меньше суммы масс нуклонов, составляющих ядро. Разность  $\Delta M$  между суммой масс нуклонов и массой  $M_{\text{я}}$  ядра можно выразить формулой

$$\Delta M = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_{\text{я}} \quad (1.6)$$

Разность  $\Delta M$ , определяемая формулой (1.6), называется **дефектом массы**. В соответствии с законом (1.1) разности масс  $\Delta M$  соответствует энергия, которую называют **энергией связи**  $E_{\text{св}}$  нуклонов в ядре. Она равна той работе, которую нужно совершить, чтобы разделить нуклоны ядра и удалить друг от друга на бесконечное расстояние, при котором нуклоны перестанут взаимодействовать. Таким образом, между массами ядра и нуклонов и энергией связи существует следующее соотношение

$$E_{\text{св}} = \Delta M \cdot c^2 = (Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_{\text{я}}) \cdot c^2 \quad (1.7)$$

Поскольку масса ядра  $M_{\text{я}}$  незначительно отличается от массы атома  $M_{\text{а}}$ , то формула для энергии  $E_{\text{св}}$  может быть записана так

$$E_{\text{св}} = (Z \cdot m_{\text{H}} + (A - Z) \cdot m_n - M_{\text{а}}) \cdot c^2, \quad (1.8)$$

где  $m_{\text{H}}$  – масса атома водорода, отличающаяся от массы протона  $m_p$  на величину массы  $m_e$  электрона. Формула (1.5) наиболее удобна для применения ввиду легкости отыскания в справочниках необходимых справочных значений.

Во многих случаях пользуются понятием **удельной энергии связи**  $\varepsilon$ , характеризующей среднюю энергию связи одного нуклона в ядре. Величина  $\varepsilon$  равна отношению энергии  $E_{\text{св}}$  нуклонов в ядре к числу нуклонов  $A$

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{св}}}{A} = \frac{\Delta M \cdot c^2}{A} \quad (1.9)$$

На рис. 1 показана экспериментальная кривая зависимости удельной энергии связи от числа нуклонов  $A$  для известных стабильных ядер. Из графика можно заключить, что сильнее всего связаны нуклоны в ядрах с массовыми числами  $A$  порядка **50 – 60** (для элементов от **Cr** до **Zn**). Энергия связи  $\epsilon$  для таких ядер достигает **8.7 МэВ/нукл.** С последующим ростом  $A$  величина  $\epsilon$  постепенно уменьшается (для самого тяжелого природного элемента **U** она составляет **7.5 МэВ/нукл.**). Энергия связи  $\epsilon$  относительно мала и для легких ядер, например, для дейтрона она равна  $\epsilon = 1.1$  МэВ/нукл.

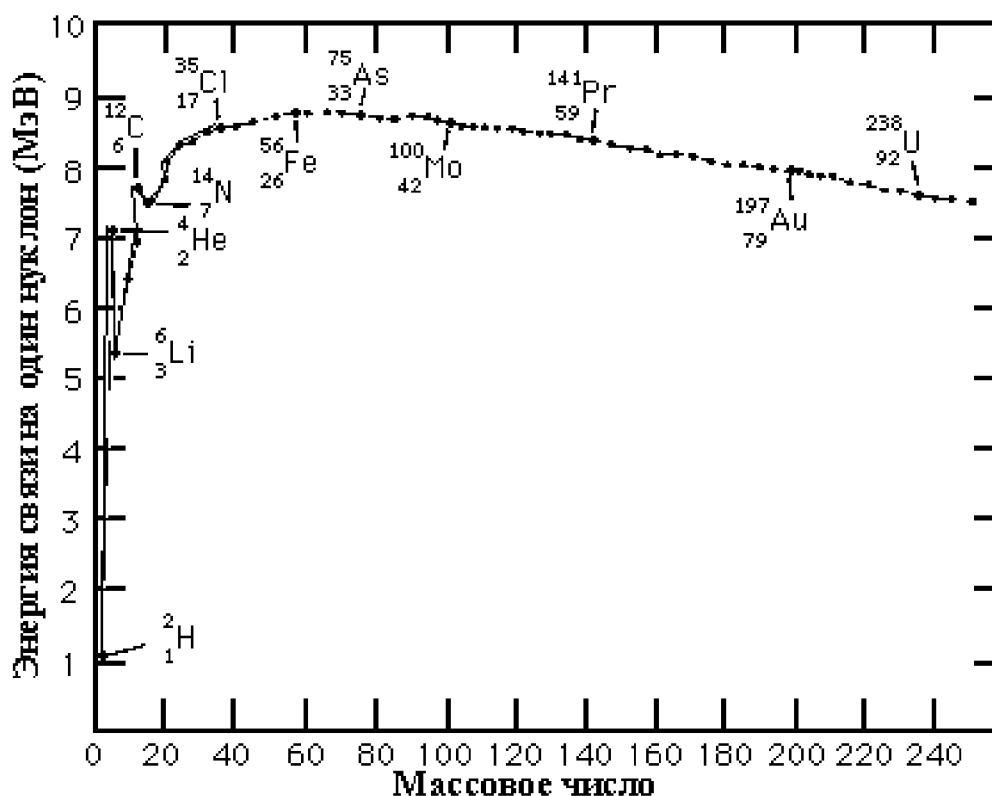


Рис. 1. Зависимость удельной энергии связи от массового числа

Чем больше удельная энергия связи  $\epsilon$ , тем прочнее, устойчивее ядро. Для сравнения можно привести значение энергии электрона в атоме водорода, равное **13 эВ**.

Представленная на рис. 1 зависимость удельной энергии связи от массового числа делает энергетически выгодными два противоположных процесса:

- **деление** тяжелых ядер на более легкие;
- **синтез** (слияние) легких ядер в более тяжелое.

Оба процесса должны сопровождаться выделением энергии.



## 1.4. Ядерные силы

Большие величины энергий связи нуклонов свидетельствуют о колоссальных силах, которые удерживают в ядре протоны и нейтроны, несмотря на существование электростатических кулоновских сил отталкивания протонов. Например, энергия, связанная с кулоновской силой отталкивания протонов в ядре гелия, составляет величину **1 МэВ**.

Устойчивость ядер означает, что между нуклонами действуют особые силы, осуществляется особое взаимодействие. Это взаимодействие называется **сильным**, осуществляющие же его силы называются **ядерными силами сильного взаимодействия**. Отличительные особенности ядерных сил:

1. Ядерные силы являются **короткодействующими**. Их радиус действия  $10^{-15}$  м. Эти силы имеют характер притяжения. Однако на расстояниях, меньших  $10^{-15}$  м, притяжение нуклонов сменяется отталкиванием.

2. Ядерные силы между двумя протонами, двумя нейтронами, между протоном и нейтроном имеют одинаковую величину. Это свойство называется **зарядовой независимостью**. Это подтверждается тем, что у зеркальных ядер одинаковые спины и почти одинаковые энергии связи. Зеркальными называются ядра с одинаковыми массовыми числами  $A$ , каждое из которых получается заменой всех протонов нейтронами, а всех нейтронов – протонами. Примеры зеркальных ядер  ${}^3_1\text{H} - {}^3_2\text{He}$ ,  ${}^7_4\text{Be} - {}^7_3\text{Li}$ ,  ${}^{11}_5\text{B} - {}^{11}_6\text{C}$ ,  ${}^{13}_6\text{C} - {}^{13}_7\text{N}$ , при этом более тяжелое ядро в каждой из этих пар радиоактивно.

3. Ядерные силы зависят от **взаимной ориентации** спинов нуклонов. Например, энергия связи дейтрона, в котором спины составляющих это ядро протона и нейтрона параллельны, равна **2.23 МэВ**. При антипараллельных спинах устойчивого состояния дейтрона вообще нет.

4. Ядерные силы обладают свойством **насыщения**. Насыщение проявляется в том, что удельная энергия связи нуклонов в ядре при некотором увеличении числа нуклонов не растет, а остается примерно постоянной, т.е. каждый нуклон в ядре взаимодействует с ограниченным числом нуклонов.

5. Ядерные силы являются **нецентральными**. Их нельзя представить направленными вдоль прямой, соединяющей центры взаимодействующих нуклонов. Нецентральность ядерных сил вытекает, например, из факта зависимости этих сил от ориентации спинов нуклонов и из факта неаддитивности собственных магнитных моментов нуклонов.

## 1.5. Модели ядра

К настоящему времени предложено много моделей ядра, каждая из которых объясняет лишь некоторые свойства ядер, но ни одна из них не объясняет всю совокупность опытных фактов.

Например, когда-то существовала модель ядра, состоящего из протонов и электронов (иначе как объяснить стабильность системы только из положительных протонов?).

### 1.5.1. Капельная модель ядра

В ней устанавливается аналогия с каплей жидкости: практически одинаковая плотность вещества в разных ядрах, малая сжимаемость, способность делиться на мелкие части.

Объем ядра и полная энергия связи ядер пропорциональны числу нуклонов в ядре. Это свидетельствует о слабой сжимаемости ядерного вещества и насыщенном характере ядерных сил, т. е. означает, что нуклон, находящийся в ядре, взаимодействует лишь с небольшим числом других нуклонов. Таким образом, ядро можно сравнить с каплей несжимаемой жидкости и использовать эту аналогию при рассмотрении вопроса об энергии связи ядра.

На основе жидкокапельной модели с помощью полуэмпирических расчетов были получены полезные выражения, связывающие полную энергию связи (или массу) с нуклонным составом ядра (то есть с  $Z$  и  $A$ ). Ниже приведено одно из таких соотношений – формула Вейцзеккера:

$$E_{\text{св}} = 14.0 \cdot A - 13.1 \cdot A^{2/3} - 0.585 \cdot Z(Z-1) \cdot A^{-1/3} - 18.1 \cdot (A - 2Z)^2 \cdot A^{-1} + \delta A^{-1} \quad (1.10)$$

В этом выражении полная энергия связи – в МэВ. Первый член отражает тот факт, что полная энергия связи пропорциональна числу нуклонов  $A$ . Это свидетельствует о том, что ядерные силы имеют короткий радиус действия и насыщенный характер. Однако на нуклоны, расположенные на поверхности ядра, такие силы не действуют, и поэтому следует учитывать уменьшение энергии связи, пропорциональное поверхности ядра. Этот учет производится с помощью второго (отрицательного) члена, пропорционального объему ядра –  $A^{2/3}$ . Кулоновские силы отталкивания являются дальнедействующими и проявляются между всеми протонами в ядре, то есть каждый из  $Z$  протонов взаимодействует с остальными  $Z-1$

протонами, что приводит к уменьшению энергии связи – это обстоятельство учитывается третьим членом. Так как среднее расстояние между протонами пропорционально радиусу ядра, то в третий член вводится еще коэффициент  $A^{-1/3}$ .

Кулоновский член приобретает тем большее значение, чем больше протонов содержит ядро. Поэтому при  $Z > 20$  все стабильные ядра содержат больше нейтронов, чем протонов. Таким образом, выражение для энергии связи должно содержать отрицательный член, величина которого возрастает при увеличении разности  $(N-Z) = (A-2Z)$ , а поскольку эффект уменьшения энергии связи наблюдается в одинаковой степени как при избытке нейтронов, так и при избытке протонов, то четвертый член (член симметрии) записывается в виде  $(A-2Z)^2$ . Множитель  $A^{-1}$  означает, что вклад в энергию связи, вызванный образованием нейтронно-протонных пар, линейно зависит от вероятности нахождения такой пары в данном объеме, а эта вероятность обратно пропорциональна объему ядра.

И, наконец, последний, пятый член отражает тот экспериментальный факт, что энергия связи ядра при данном  $A$  зависит от того, будут ли  $Z$  и  $N$  четными или нечетными. Наиболее стабильными оказываются так называемые четно-четные ядра ( $Z$  и  $N$  четные). Параметр  $\delta$  называется коэффициентом спаривания.

Средняя энергия связи  $\varepsilon$ , приходящаяся на один нуклон, для всех элементов, за исключением нескольких наиболее легких, почти одинакова. В области легких элементов значение  $\varepsilon$  для четных  $A$  заметно больше среднего значения  $\varepsilon$  для соседних нечетных  $A$ . Такая же закономерность наблюдается для больших массовых чисел. Среди наиболее легких ядер наблюдается нерегулярное изменение энергии связи на один нуклон. В частности, энергии связи таких ядер, как  ${}^4_2\text{He}$ ,  ${}^{12}_6\text{C}$ ,  ${}^{16}_8\text{O}$  очень высоки (см. рис. 1). Это обстоятельство имеет важное значение, особенно при рассмотрении астрофизических аспектов образования элементов и солнечной энергии.

Хотя среднее значение энергии связи в расчете на один нуклон является медленно меняющейся функцией массового числа, энергия связи, вносимая при присоединении к ядру одного дополнительного протона или нейтрона, может существенно изменяться при переходе от одного ядра к другому.

Например, энергии связи дополнительного нейтрона в ядрах  ${}_{20}^{44}\text{Ca}$ ,  ${}_{20}^{45}\text{Ca}$ ,  ${}_{20}^{46}\text{Ca}$ ,  ${}_{20}^{47}\text{Ca}$ ,  ${}_{20}^{48}\text{Ca}$  равны соответственно 11.13; 7.36; 10.31; 6.46; 9.23.

Видно, что здесь очень четко проявляется эффект, связанный с четностью или нечетностью массового числа. В некоторых случаях целесообразно рассматривать энергию связи в ядре целой группы нуклонов, например,  $\alpha$ -частицы или более сложного ядра. Энергию связи  $\alpha$ -частицы ( ${}_{2}^{4}\text{He}$  с массой 4.00260) в  ${}_{92}^{235}\text{U}$  (масса 235.04393) можно вычислить, зная массы этих ядер и массу ядра  ${}_{90}^{231}\text{Th}$  (231.03635). Она оказывается равной  $231.03635 + 4.00260 - 235.04393 = -0.00498$  а.е.м., или -4.64 МэВ. Отрицательная энергия связи означает, что ядро  ${}_{92}^{235}\text{U}$  термодинамически неустойчиво по отношению к распаду на  ${}_{90}^{231}\text{Th}$  и  ${}_{2}^{4}\text{He}$ . Энергия связи  $\alpha$ -частиц отрицательна для всех ядер с  $A \geq 140$ .

### 1.5.2. Оболочечная модель ядра

Согласно представлениям этой модели, нуклоны в ядре, как и электроны в атоме, образуют определенные оболочки и подоболочки. Эта модель удачно объяснила существование особо устойчивых ядер, у которых число протонов либо нейтронов (либо оба эти числа) равны

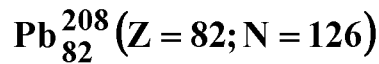
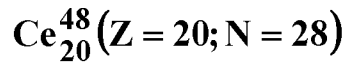
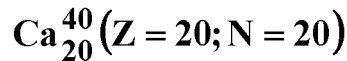
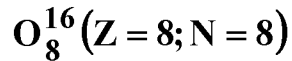
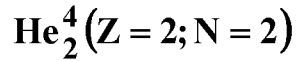
$$2, 8, 20, 28, 40, 50, 82, 114, 126, 184 \quad (1.11)$$

Эти оболочки имеют для ядер такое же значение, как заполненные оболочки атомов, отличающихся особой стабильностью, только число электронов в оболочках таких атомов составляет другой ряд значений (2, 10, 18, 36, 54, 86).

Числа ряда (1.11) получили название **магических**. И ядра с таким числом протонов или нейтронов называли *магическими*. Такие ядра оказываются более стабильными по отношению к различным видам радиоактивного распада. Хорошо известен тот факт, что все три природных радиоактивных семейства (урана, тория и актиния) заканчиваются стабильными изотопами свинца ( $Z = 82$ ). Наиболее тяжелые стабильные нуклиды  ${}^{208}\text{Pb}$  и  ${}^{209}\text{Bi}$  содержат по 126 нейтронов. Теоретически предсказано существо-

вание магического сверхтяжелого ядра  $^{298}\text{114}$ . Изотопы  $^{289}\text{114}$  и  $^{287}\text{114}$  этого сверхтяжелого элемента были в 1999 году открыты в Дубне.

Ядра, у которых и число протонов, и число нейтронов являются магическими, назвали **дважды магическими**. К их числу относятся пять ядер



В частности, особенная устойчивость ядра  $^4_2\text{He}$  проявляется в том, что эта составная частица испускается тяжелыми ядрами при радиоактивном распаде.

Существует ряд других моделей ядра: **оптическая, прямых ядерных реакций, коллективная** и т.д. Каждая из моделей объясняет ту или иную сторону явлений.

## 2. РАДИОАКТИВНОСТЬ

### 2.1. Явление радиоактивности

В начале 1896 года сразу после открытия В.К. Рентгеном X-лучей французский физик Анри Беккерель в процессе проверки гипотезы о флуоресцентной природе рентгеновского излучения обнаружил, что ураново-калиевая соль самопроизвольно, спонтанно, без внешних воздействий испускает жесткое излучение. Позже Беккерель установил, что данное явление, названное им радиоактивностью, т. е. лучевой активностью, целиком связано с присутствием урана, который стал первым радиоактивным химическим элементом. Через несколько лет подобные свойства были обнаружены и у тория, затем у полония и радия, открытых Мари и Пьером Кюри, а в дальнейшем – у всех химических элементов, номера которых больше 82. С появлением ускорителей и ядерных реакторов у всех химических элементов были обнаружены радиоактивные изотопы, большинство из которых практически не встречаются в естественных условиях.

Анализируя проникающую способность радиоактивного излучения урана, Э. Резерфорд обнаружил две составляющие этого излучения: менее проникающую, названную  $\alpha$ -излучением, и более проникающую, названную  $\beta$ -излучением. Третья составляющая урановой радиации, самая проникающая из всех, была открыта позже, в 1900 году, Полем Виллардом и названа по аналогии с резерфордовским рядом  $\gamma$ -излучением. Резерфорд и его сотрудники показали, что радиоактивность связана с распадом атомов (значительно позже стало ясно, что речь идет о распаде атомных ядер), сопровождающимся выбросом из них определенного типа излучений. Этот вывод нанес сокрушительный удар по господствовавшей в физике и химии концепции неделимости атомов.

**Радиоактивность – это самопроизвольное превращение неустойчивых ядер одного химического элемента в ядра других элементов, сопровождающееся испусканием радиоактивных излучений ( $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -лучей) и некоторых элементарных частиц.**

Радиоактивность ядер, существующих в природных условиях, называется естественной. Радиоактивность ядер, полученных в результате ядерных реакций, называется **искусственной**. Принципиальной разницы

между искусственной и естественной радиоактивностью нет. Законы радиоактивного превращения в обоих случаях одинаковы.

Было установлено, что есть три вида радиоактивных излучений:

**$\alpha$ -лучи** – тяжелые частицы с малой проникающей способностью (впоследствии было установлено, что это ядра гелия  ${}^4_2\text{He}$ );

**$\beta$ -лучи** – легкие частицы с большей чем у  $\alpha$ -лучей проникающей способностью (позже было выяснено, что ими могут быть электроны и позитроны);

**$\gamma$ -лучи** – жесткое проникающее электромагнитное излучение.

Опытным путем были установлены некоторые особенности радиоактивных лучей. Они обладали способностью вызывать **ионизацию** газов, обладали **химическим** действием, возбуждали в ряде твердых тел и жидкостей **флуоресцентное** свечение, вызывали изменение физико-механических свойств.

Такое широкое их действие связано с тем, что радиоактивное излучение переносит **энергию и импульс**.

## 2.2. Закон радиоактивного распада

Радиоактивные превращения ядер, происходящие самопроизвольно, часто называют **распадом** или **радиоактивным распадом**. Атомное ядро, претерпевающее радиоактивный распад, называют **материнским**. Ядро, возникшее в результате распада, называют **дочерним**.

Опыты показали, что никакие внешние условия (большие давления, высокие температуры и магнитные поля) не могут повлиять на характер и скорость распада. Радиоактивный распад – статистический процесс.

Нельзя указать, какое из имеющихся ядер распадется в данный момент времени или в какой момент времени распадется определенное ядро.

Так как процесс распада – самопроизвольный, то естественно предположить, что число ядер  $dN$ , которые распадаются за интервал времени  $dt$ , пропорционально полному количеству радиоактивных ядер  $N$  и интервалу времени  $dt$

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt, \quad (2.1)$$

где  $\lambda$  – характерная для радиоактивных ядер константа, называемая **постоянной распада**.

Знак минус в уравнении (2.1) показывает уменьшение количества радиоактивных ядер.

Разделяя в уравнении (2.1) переменные и интегрируя, получим

$$dN/N = -\lambda \cdot dt; \Rightarrow \ln N = -\lambda \cdot t + \ln C,$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

Если в начальный момент времени  $t = 0$  число ядер было равно  $N_0$ , то  $\ln N_0 = \ln C$ . Окончательно получаем

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t; \Rightarrow \ln(N/N_0) = -\lambda \cdot t; \Rightarrow N = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (2.2)$$

где  $e$  – основание натурального логарифма;  $N$  – число нераспавшихся ядер в момент времени  $t$ .

Формула (2.2) выражает закон **радиоактивного распада**. Формулировка его проста: **число нераспавшихся ядер убывает со временем по экспоненте**.

**Постоянная распада**. Из соотношения (2.1) следует, что постоянная распада  $\lambda$  представляет собой относительное уменьшение числа радиоактивных ядер за единицу времени

$$\lambda = -(dN/N) / dt \quad (2.3)$$

Иными словами, постоянная распада характеризует долю ядер, распадающихся за единицу времени, т.е. определяет скорость радиоактивного распада. В системе СИ величина  $\lambda$  имеет размерность  $s^{-1}$ .

**Период полураспада**. Большое распространение имеет временная характеристика радиоактивного распада – период полураспада. **Период полураспада  $T$  – время, за которое распадается половина радиоактивных ядер**.

Это время определяется условием (принимая  $t = T$ )

$$N = N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T}; \Rightarrow e^{\lambda T} = 2 \Rightarrow T = (\ln 2) / \lambda \quad (2.4)$$

Период полураспада известных нам ядер находится в пределах от  $3 \cdot 10^{-7}$  с до  $5 \cdot 10^{15}$  лет.



### 2.3. Распад нестабильных ядер

При рассмотрении вопроса об энергиях связи ядер было получено уравнение устойчивости ядра по отношению к радиоактивному распаду: ядро оказывается энергетически устойчивым по отношению к определенному виду распада, если его масса меньше суммы масс продуктов, образующихся при ядерном превращении. При этом учитываются свойства ядерной энергии: объемной энергии, поверхностного и кулоновского членов, а также членов, учитывающих влияние симметрии и энергии образования пар нуклонов.

Однако при рассмотрении любой энергетически неустойчивой системы необходимо учитывать также скорости протекания различных процессов, так как термодинамически неустойчивая система во многих случаях может рассматриваться как вполне стабильная. Примером этого могут служить ядра с  $A > 140$ , называемые стабильными. Таким образом, весьма важной характеристикой радиоактивного распада являются скорость распада или период полураспада. Поэтому при рассмотрении характеристик радиоактивного распада ядер необходимо учитывать влияние различных факторов на скорость радиоактивного распада. К таким факторам, кроме энергетической неустойчивости ядер, рассмотренной выше, относятся и другие свойства ядер, а также составляющих их нуклонов.

Большую роль в радиоактивных превращениях ядер играют проникаемость потенциального барьера ядра, механизм формирования альфа-частиц и кластеров из нуклонов, сверхтекучие свойства ядер и др. Таким образом, при рассмотрении характеристик распада каждого ядра приходится учитывать его энергетические и квантово-механические свойства, что является достаточно сложной математической задачей.

### 2.4. Альфа-распад

Альфа-лучи представляют собой поток ядер гелия  ${}^4_2\text{He}$ . Распад протекает по следующей схеме



Здесь буквой **X** обозначен химический символ материнского ядра, буквой **Y** – химический символ дочернего ядра. Отметим, что при  $\alpha$ -распаде выполняются так называемые **правила смещения**:

**1. Закон сохранения электрических зарядов.** Заряд материнского ядра равен сумме зарядов ядер, возникающих при радиоактивном распаде

$$Z_{\text{я}} = \sum Z_i, \quad (2.6)$$

где  $Z_{\text{я}}$  – заряд материнского ядра,  $Z_i$  – заряд дочернего ядра и ядра гелия.

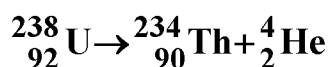
**2. Закон сохранения массовых чисел.** Массовое число материнского ядра равно сумме массовых чисел ядер, возникающих при радиоактивном распаде

$$A_{\text{я}} = \sum A_i, \quad (2.7)$$

где  $A_{\text{я}}$  – массовое число материнского ядра;  $A_i$  – массовое число дочернего ядра и ядра гелия.

Правила смещения выполняются также при других типах радиоактивного распада и всех ядерных реакциях.

Примером  $\alpha$ -распада может служить реакция превращения изотопа урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$  в изотоп тория  ${}^{234}_{90}\text{Th}$



### Основные особенности $\alpha$ -распада:

1. Скорости, с которыми  $\alpha$ -частицы вылетают из распадающегося (материнского) ядра, могут быть очень велики ( $10^7$  м/с).

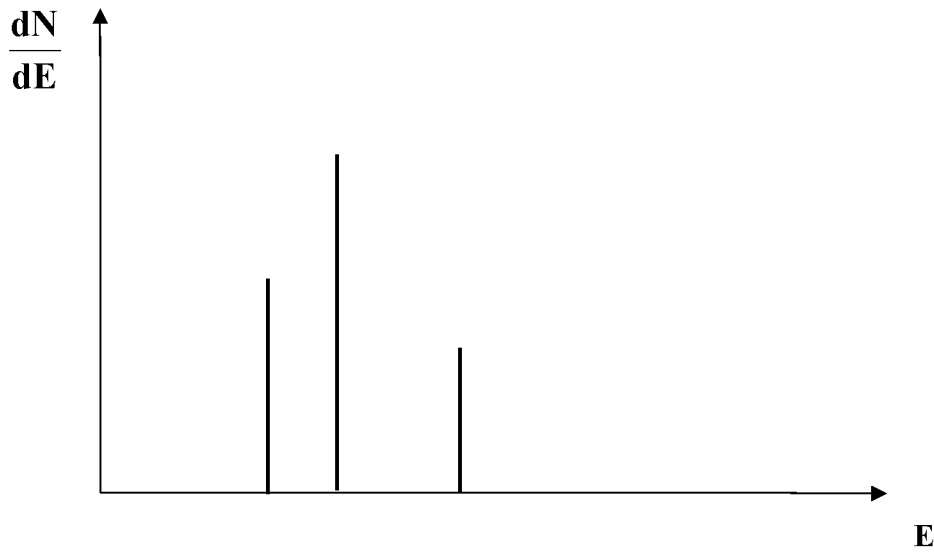
2. Кинетическая энергия  $\alpha$ -частиц почти для всех известных  $\alpha$ -активных изотопов лежит в интервале 4...9 МэВ. Среднее значение кинетической энергии примерно равно 6 МэВ. Это характерно для всех радиоактивных изотопов.

3. Известны очень редкие случаи  $\alpha$ -распада, когда кинетическая энергия  $\alpha$ -частиц очень велика и превышает 9 МэВ.

4. В большинстве случаев  $\alpha$ -частицы, вылетающие при распаде данного определенного изотопа, имеют одинаковые энергии, т.е.  $\alpha$ -частицы являются **моноэнергетическими**.

5. Некоторые ядра испускают несколько типов моноэнергетических  $\alpha$ -частиц, образуя **тонкую** структуру  $\alpha$ -спектров  $dN/dE$ .

На графике по оси абсцисс отложена энергия  $E$   $\alpha$ -частиц, по оси ординат – число частиц  $dN$  с заданной энергией  $dE$  (рис. 2).

Рис. 2.  $\alpha$ -спектр

### 2.5. Бета-распад

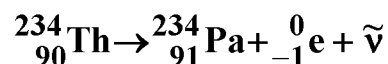
Известны три вида  $\beta$ -распада:  $\beta^-$ -распад,  $\beta^+$ -распад и  $e$ -захват (или, по иной терминологии,  $K$ -захват).

$\beta^-$ -распад. При этом распаде из материнского ядра вылетают электрон  ${}_{-1}^0e$  и антинейтрино  $\tilde{\nu}$  и образуется дочернее ядро с тем же массовым числом  $A$ , но с увеличенным на единицу атомным номером  $Z$



Отметим, что при  $\beta$ -распаде любого типа правила смещения выполняются, при этом считается, что для электрона  $A = 0$ ,  $Z = -1$ , для позитрона  $A = 0$ ,  $Z = +1$ .

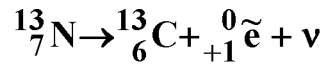
Примером  $\beta^-$ -распада может служить реакция превращения изотопа тория  ${}^{234}\text{Th}$  в протактиний  ${}^{234}\text{Pa}$



$\beta^+$ -распад. При этом распаде из материнского ядра вылетают позитрон  ${}_{+1}^0\tilde{e}$  и нейтрино  $\nu$  и образуется дочернее ядро с тем же массовым числом, но с уменьшенным на единицу атомным номером



Примером  $\beta^+$ -распада может служить реакция превращения изотопа  $^{13}\text{N}$  в углерод  $^{13}\text{C}$

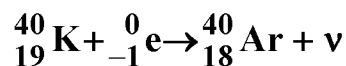


При  $\beta^+$ -распаде возможно также возникновение  $\gamma$ -лучей.

**е-захват (К-захват).** Эту своеобразную реакцию относят к  $\beta$ -распаду, хотя в этом случае процессы происходят и в ядре, и в электронной оболочке атома. Он заключается в захвате ядром одного электрона из К-оболочки (реже из L- или M-оболочки) своего атома, при этом из ядра испускается нейтрино



Место в электронной оболочке, освобожденное захваченным электроном, заполняется электронами из вышерасположенных электронов своего атома, что сопровождается выделением энергии в виде рентгеновских лучей, таким образом е-захват сопровождается рентгеновским излучением. Примером е-захвата может служить превращение изотопа калия. Примером е-захвата может служить превращение изотопа калия  $^{40}\text{K}$  в аргон  $^{40}\text{Ar}$

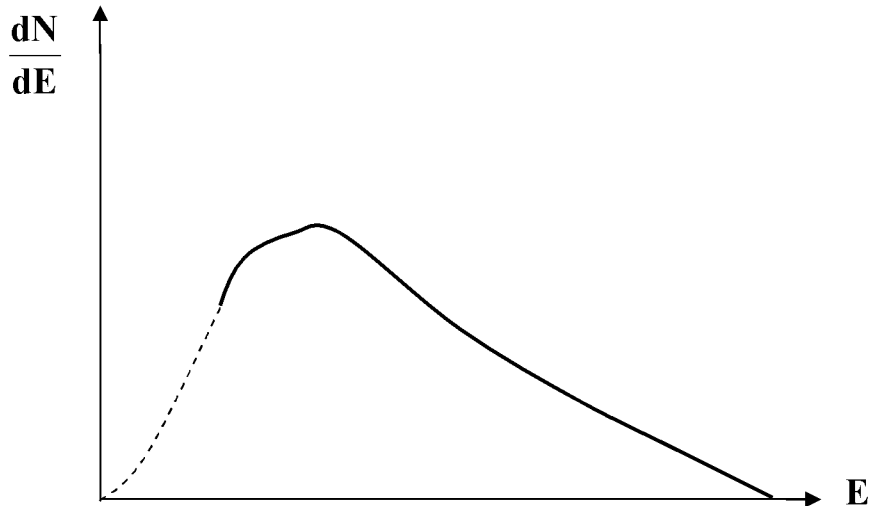


### Основные особенности $\beta$ -распада:

1. Все энергетические  $\beta$ -спектры являются непрерывными (в отличие от  $\alpha$ -спектров). Во всех случаях кривая спектра начинается с нуля и ограничена со стороны больших энергий (рис. 3). Наибольшая энергия  $E_{\text{max}}$ , которой могут обладать испущенные  $\beta$ -частицы, называется **верхней границей**  $\beta$ -спектра. Эта энергия является характеристикой источника  $\beta$ -лучей.

2. Средняя энергия испускаемых частиц обычно близка к  $1/3E_{\text{max}}$  и для естественных радиоактивных изотопов заключена в пределах 0.25 – 0.45 МэВ.

3. Изучение  $\beta$ -распада привело к открытию нейтрино, уносящего часть энергии реакции.

Рис. 3.  $\beta$ -спектр

## 2.6. Гамма-излучение

### Основные особенности $\gamma$ -излучения

1.  $\gamma$ -лучи как самостоятельный вид естественной радиоактивности не встречается и обычно сопровождает  $\alpha$ - и  $\beta$ -распады.
2.  $\gamma$ -лучи испускаются не материнским, а дочерним ядром, которое в момент своего образования оказывается возбужденным и обладает избыточной энергией по сравнению с обычным, не возбужденным состоянием.
3. Возбужденное дочернее ядро за малое время ( $10^{-14} \dots 10^{-13}$  с) переходит в нормальное (или менее возбужденное) состояние и при этом испускает  $\gamma$ -лучи.
4. Энергетический спектр  $\gamma$ -лучей дискретен. Дискретный характер спектра  $\gamma$ -лучей доказывает, что энергетическое состояние ядер также дискретно.

## 2.7. Протонная и двухпротонная радиоактивность

Открывшиеся возможности получения сильно протоноизбыточных ядер привели к экспериментальному обнаружению двух новых видов распада: протонной и двухпротонной радиоактивности. До определенного времени считалось, что в широком интервале массовых чисел для изотопов, устойчивых по отношению к  $\beta$ -распаду, испускание протона в отличие

от  $\alpha$ -распада энергетически невыгодно. Доказательством тому служил тот простой факт, что четыре нуклона в свободной  $\alpha$ -частице связаны значительно сильнее, чем в любом тяжелом ядре. Для испускания же ядром протона требуется энергия порядка нескольких мегаэлектронвольт, соответствующая его энергии связи в дочернем ядре.

Между тем при очень сильном продвижении от стабильных изотопов в сторону протонного избытка ядра становятся способными испускать протоны в основном за счет увеличивающегося вклада кулоновского члена и члена, учитывающего влияние симметрии в уравнении энергии связи ядра.

Успехи в области ускорительной техники и физических методик позволили существенно продвинуться в область суперпротоноизбыточных ядер и впервые наблюдать протонные излучатели, такие как  $^{165,166,167}\text{Ir}$ ,  $^{171}\text{Au}$ ,  $^{185}\text{Bi}$  (ядра, отстоящие на 16 – 18 нейтронов от стабильных).

Возможность существования нового типа радиоактивного распада – двухпротонного была предсказана В.И. Гольданским. Этот процесс должен наблюдаться для протоноизбыточных легких ядер ( $Z \geq 50$ ) с четным  $Z$ . Такие ядра, будучи устойчивыми к испусканию одного протона, могут оказаться нестабильными к испусканию сразу двух протонов ввиду того, что за счет спаривания нуклонов энергия связи последнего (четного) протона в ядре ( $Z^A$ ) может быть положительной в отличие от энергии связи последнего (нечетного) протона в ядре ( $(Z-1)^{A-1}$ ).

## 2.8. Кластерная радиоактивность

В 1984 году учеными Оксфордской лаборатории в Англии был обнаружен радиоактивный распад  $^{223}\text{Ra}$  с вылетом ядер  $^{14}\text{C}$ . В настоящее время радиоактивный распад с вылетом частиц, промежуточных по массе между  $\alpha$ -частицами и осколками деления ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{24}\text{Ne}$ ,  $^{28}\text{Mg}$ ,  $^{32}\text{Si}$ ), найден более чем у десяти нуклидов от радия до плутония. Этот вид радиоактивного распада получил название кластерной радиоактивности. Открытие нового вида радиоактивности поставило вопрос о месте этого явления в общей картине радиоактивного распада. При теоретическом описании этого типа распада проводилась аналогия по сравнению с двумя другими известными видами радиоактивности с испусканием составных частиц: спонтанным делением и  $\alpha$ -распадом. Исследование основных особенностей деления

ядер однозначно приводит к заключению о сильной перестройке ядра в процессе его развала на пару фрагментов сравнимой массы.

Эксперимент показывает, что два осколка деления имеют среднюю кинетическую энергию разлета намного меньше энергии кулоновского взаимодействия этих осколков в точке касания. При этом энергывыход процесса  $Q$  оказывается достаточным, чтобы при некотором значении деформации осколков процесс их разлета был надбарьерным, т. е. ядро имеет шанс разделиться на пару деформированных осколков, если перед развалом оно оказывается сильно вытянутым.

В этом подходе расчеты вероятностей кластерного распада осуществляются по одной из моделей, описывающих спонтанное деление ядер и учитывающих при этом оболочечные эффекты (испускаемые кластеры представляют собой оболочечные ядра), энергию, деформацию и жесткость ядра.

Эксперименты по изучению кластерной радиоактивности должны быть чрезвычайно чувствительны, так как вероятность такого распада чрезвычайно мала по сравнению с делением и  $\alpha$ -распадом ( $\lambda_{\text{кл}}/\lambda_{\alpha} \leq 10^{-16}$ ).

Экспериментальное обнаружение кластерной радиоактивности дало новый импульс развитию наших представлений о механизмах перестройки ядра в процессе радиоактивного распада.

## 2.9. Спонтанное деление ядер и спонтанно делящиеся изомеры

Спонтанное деление ядер – это процесс туннельного прохождения ядер через барьер деления. Этот вид радиоактивного распада был обнаружен в 1940 году российскими учеными К.А. Петржаком и Г.Н. Флеровым, изучавшими деление урана. Динамика этого процесса в какой-то степени похожа на описанную выше динамику кластерного распада. Минимум потенциальной энергии соответствует основному состоянию ядра. Внесение в атомное ядро энергии извне, например, при поглощении ядром той или иной частицы, вызывает изменение характера движения нуклонов, составляющих его.

При достаточной энергии, равной нескольким мегаэлектронвольт, движение нуклонов может стать упорядоченным. Возникнут колебания ядерного вещества. Если энергия колебания достаточно велика, атомное ядро может перейти в состояние неустойчивого равновесия. Произойдет

необратимый процесс разрыва ядра на два осколка. С определенной вероятностью такой же процесс может возникнуть у тяжелых ядер самопроизвольно, без внесения извне энергии возбуждения. Произойдет спонтанное деление – процесс туннельного прохождения через барьер деления. Исследование спонтанного деления ядер тесно связано с работами по синтезу новых трансурановых элементов.

Это объясняется тем, что по мере продвижения в область элементов с большим  $Z$  все более возрастает роль спонтанного деления. Например, для изотопа  $^{238}\text{U}$  период спонтанного деления равен  $10^{16}$  лет, а период  $\alpha$ -распада составляет всего  $4.5 \cdot 10^9$  лет. Это значит, что на  $10^6$   $\alpha$ -распадов приходится всего лишь одно спонтанное деление. Для изотопов элементов с большими атомными номерами происходит уменьшение периодов полураспада для спонтанного деления и  $\alpha$ -распада. Однако периоды спонтанного деления уменьшаются быстрее, и для некоторых изотопов элементов с  $Z \geq 100$  спонтанное деление становится уже доминирующим каналом распада. Диапазон периодов спонтанного деления очень велик.

Так, для изотопа  $^{232}\text{Th}$  установлена лишь нижняя граница периода спонтанного деления, равная  $10^{22}$  лет, а для изотопа  $^{68}\text{Fm}$  период спонтанного деления равен всего лишь  $3 \cdot 10^{-6}$  с.

В 1962 году в Дубне был обнаружен эффект спонтанного деления с минимально коротким периодом полураспада, не предсказанный теорией. Это явление было в последующем интерпретировано как изомерия формы в области делящихся ядер. Объяснение природы спонтанно делящихся изомеров появилось после теоретических работ В.М. Струтинского, в которых был предложен метод учета оболочечных эффектов при больших деформациях атомных ядер. Применение данного метода к тяжелым ядрам привело к выводу, что барьер деления имеет более сложную форму, чем предполагалось ранее на основе других моделей ядра, например, жидкокапельной. Повышенная вероятность спонтанного деления таких состояний объясняется тем, что при их делении преодолевается лишь часть барьера (его второй горб). В то же время барьер, разделяющий первый и второй минимумы, обуславливает запрет для  $\alpha$ - и  $\gamma$ -переходов в основное состояние. В настоящее время известны 34 спонтанно делящихся изомера элементов от урана до берклия.

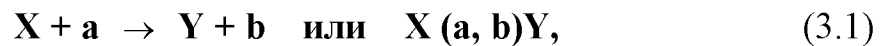


### 3. ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

**Процесс перестройки ядра, возникающий под действием  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ -лучей, ядерных частиц или других ядер, сопровождаемый генерацией новых ядер и частиц, называется ядерной реакцией.**

В лабораторных условиях ядерные реакции в основном осуществляются при бомбардировке мишени нужного вещества пучками ядерных частиц или ядер в целом, в результате чего ядра мишени и бомбардирующие ядра сближаются до расстояний порядка  $10^{-15}$  м, когда начинают проявляться ядерные силы сильного взаимодействия.

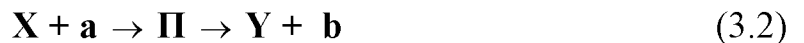
Применяется следующая символика ядерных реакций



где **a** – частица пучка, **X** – ядро мишени, **b** – вылетающая частица, **Y** – конечное ядро (продукт).

Ядерные реакции происходят при обязательном выполнении законов смещения (о них мы вели речь выше), а также других законов сохранения: **полной энергии, импульса, момента импульса** и др.

Реакция может протекать в две стадии: при налетании частицы **a** на ядро **X** образуется составное ядро **П**, а затем это возбужденное ядро испускает частицу **b**



Если испущенная частица **b** тождественна с захваченной частицей **a**, то этот двухстадийный процесс называют **рассеянием**. Рассеяние является **упругим**, если энергии частиц **a** и **b** равны, и **неупругим**, если энергии частиц **a** и **b** отличаются.

Собственно ядерная реакция происходит в том случае, если частицы **a** и **b** не тождественны.

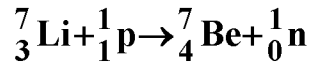
#### 3.1. Классификация ядерных реакций

Ядерные реакции подразделяют на классы, группы по различным признакам:

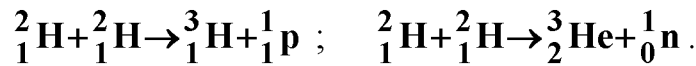
- 1 – в зависимости от природы бомбардирующих частиц  
*Реакции под действием  $\alpha$ -частиц.* Пример реакций:



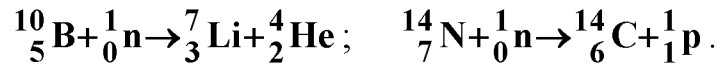
*Реакции под действием протонов.* Пример реакции:



*Реакции под действием дейтронов.* Пример реакций:

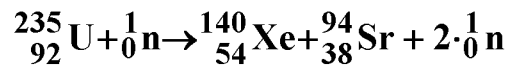


*Реакции под действием нейтронов.* Пример реакции:

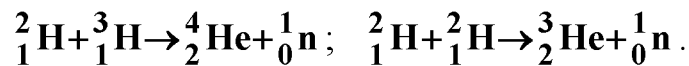


- 2 – в зависимости от характера превращения.

*Реакция деления.* Пример реакции:



*Реакция синтеза.* Пример реакции:



Кроме того, разделяют ядерные реакции, идущие на легких, средних или тяжелых ядрах (зависимость от **массового** числа  $A$ ), с выделением или поглощением энергии (**эндо-** или **экзотермические** реакции) и т.д.

### 3.2. Сечение ядерной реакции

Для того чтобы произошла ядерная реакция, нужно столкнуть бомбардирующую частицу и ядро-мишень.

Для количественной характеристики вероятности такого столкновения и осуществления последующей реакции вводится особая величина – **эффективное сечение** реакции (иногда говорят просто **сечение реакции**). Сечение реакции характеризует ее "выход" на одну бомбардирующую частицу.

Предположим, что за единицу времени на единицу площади поперечного сечения слоя вещества толщиной  $dx$ , содержащего  $N_0$  ядер мишени в единице объема, падает поток из  $n$  бомбардирующих частиц. Тогда число частиц  $dn$ , вступивших в реакцию, можно выразить формулой

$$dn = \sigma \cdot n \cdot N_0 \cdot dx \quad (3.3)$$

Величина  $\sigma$ , имеющая размерность  $\text{м}^2$ , и есть сечение реакции. Исторически сложилось, что сечение реакции измерялось в **барнах**

$$1 \text{ барн} = 10^{-24} \text{ см}^2 = 10^{-28} \text{ м}^2$$

Так как число провзаимодействовавших частиц зависит от типа реакции, то говорят о **сечении реакции деления, сечении реакции синтеза, сечении реакции захвата** и т. д.

Нужно иметь в виду, что сечение реакции не есть буквально геометрическое поперечное сечение ядра мишени, хотя по порядку величины оно и совпадает с последним. Вероятность осуществления ядерной реакции зависит от типа реакции, от вида энергии бомбардирующей частицы, типа ядер мишени и т.д. Для некоторых частиц в узком интервале энергии сечение реакции может резко возрасти – возникает явление **резонанса** (рис. 4). Такое сечение называется **резонансным** (для данной реакции).

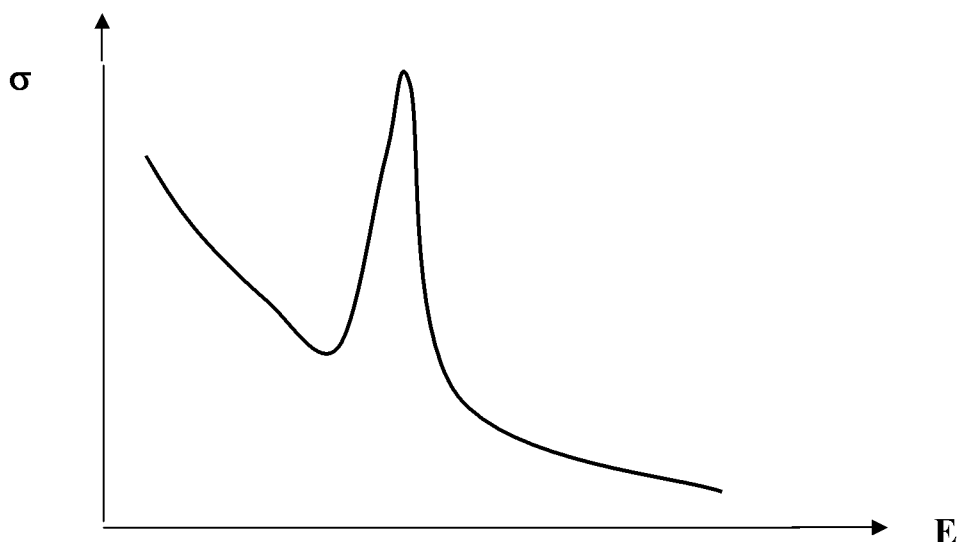


Рис. 4. Зависимость сечения  $\sigma$  от энергии  $E$  частицы-снаряда

Таблица 3.1

Сечение поглощения нейтронов некоторых ядер мишени

Изотоп мишени	Сечение, барн
$^{31}_{15}\text{P}$	0,19
$^{27}_{13}\text{Al}$	0,230
$^{197}_{79}\text{Au}$	98,0
$^6\text{B}$ (смесь изотопов)	769,0
$^{48}\text{Cd}$ (смесь изотопов)	2550,0

### 3.3. Энергия реакции

Закон сохранения энергии, выполняющийся при осуществлении ядерной реакции типа (3.1), может быть записан в виде

$$E_1 = E_2, \quad (3.4)$$

где  $E_1$  – энергия бомбардирующей частицы и конечного ядра-мишени до реакции;  $E_2$  – энергия вылетающей частицы и конечного ядра.

В развернутом виде закон сохранения энергии имеет вид

$$E_{01} + T_1 = E_{02} + T_2, \quad (3.5)$$

где  $E_{01} = M_x \cdot c^2 + m_a \cdot c^2$ ;  $E_{02} = M_y \cdot c^2 + m_b \cdot c^2$  есть энергия покоя объектов реакции, а выражения

$$T_1 = T_x + T_a; \quad T_2 = T_y + T_b$$

являются кинетической энергией объектов реакции.

В общем случае  $E_{01}$  не равно  $E_{02}$ . Разность  $(E_{01} - E_{02})$  называется энергией реакции  $Q$

$$Q = E_{01} - E_{02} = (M_x \cdot c^2 + m_a \cdot c^2) - (M_y \cdot c^2 + m_b \cdot c^2) \quad (3.6)$$

Ясно из (3.6), что

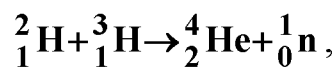
$$Q = E_{01} - E_{02} = T_2 - T_1 \quad (3.7)$$

Если  $Q > 0$ , то реакция называется **экзотермической**. Выделение энергии происходит за счет уменьшения энергии покоя в виде кинетической энергии вылетающих частиц и, возможно, конечного ядра.

Если  $Q < 0$ , то реакция сопровождается возрастанием энергии покоя за счет уменьшения кинетической энергии. Реакцию называют **эндотермической**.

Если  $Q = 0$ , то  $T_1 = T_2$  и  $E_{01} = E_{02}$ , т. е. в этом случае кинетическая энергия, энергия покоя, а значит и массы частиц равны. Такая реакция называется процессом **упругого** рассеяния.

Примером экзотермической реакции служит реакция синтеза



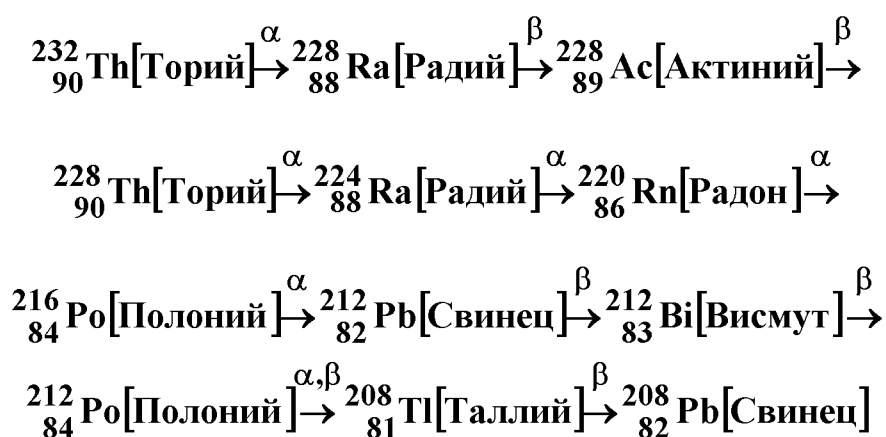
при которой выделяется энергия  $Q = 17,6$  МэВ (что составляет около 3.5 МэВ на нуклон).

Реакцию синтеза часто называют реакцией **термоядерного синтеза**. Она требует высокой температуры для того, чтобы сильно ускорить одно из ядер для преодоления кулоновского отталкивания ядер. Кроме того, эффективное сечение ядерной реакции синтеза примерно в  $10^8$  раз меньше эффективного сечения ионизации. Поэтому подавляющая часть энергии вступающих в реакцию  ${}^2_1\text{H}$  и  ${}^3_1\text{H}$  расходуется на ионизацию. Так что пока этот метод требует затраты большой энергии, часто превышающей ту, которая освобождается при синтезе.

### 3.4. Радиоактивные ряды (семейства)

Как видно из кривой зависимости удельной энергии связи  $\epsilon$  от массового числа  $A$  (см. рис. 1), тяжелые ядра имеют склонность к делению на более легкие. Если при этом массовое число  $A$  намного превышает 208 (т.е.  $A$  больше чем у свинца), то ядро переходит в стабильное путем цепи последовательных распадов, проходящих по  $\alpha$ - или  $\beta$ -типу. Цепь распадов завершается образованием стабильного изотопа и носит название **ряда** или **семейства**.

В качестве примера цепи распадов можно привести превращение тория, представленное на схеме



Тип распада каждой реакции на схеме обозначен над стрелками символами  $\alpha$  или  $\beta$ . Периоды полураспада  $T$  всех реакций цепи распадов лежат в пределах от 0.16 с для  ${}^{216}\text{Po}$  до  $1.4 \cdot 10^{10}$  лет для  ${}^{232}\text{Th}$ . Из приведенных данных видно, что в зависимости от типа распада массовые числа ядер в одной цепи меняются на 4 единицы или не меняются вовсе, а заряд

изменяется на единицу или понижается на две единицы (реализация правил смещения).

В общем случае в радиоактивном веществе существуют все элементы радиоактивного ряда и испускаются  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ -частицы.

В принципе возможны четыре радиоактивных ряда, причем ряд должен начинаться с изотопа, период полураспада которого близок к времени жизни Земли ( $5 \cdot 10^9$  лет). Они представлены в табл. 3.2.

В третьем радиоактивном ряду начальным изотопом (родоначальником ряда) был плутоний  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$  с  $T = 10^4$  лет, но он успел распасться и в естественном виде не встречается (за редчайшим исключением).

Последний четвертый ряд был предсказан теоретически. Родоначальник этого ряда также успел распасться за время существования Земли. Изотоп  ${}^{237}_{93}\text{Np}$  создан искусственно.

Таблица 3.2

## Радиоактивные семейства

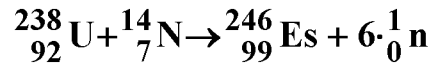
Название ряда	Начальный изотоп	Период полураспада начального изотопа	Примечание
Ряд тория	${}^{232}_{90}\text{Th}$	$1.4 \cdot 10^{10}$ лет	Содержит 11 элем. оканч. ${}^{208}\text{Pb}$
Ряд урана	${}^{238}_{92}\text{U}$	$5 \cdot 10^{10}$ лет	Содержит 15 элем. оканч. ${}^{206}\text{Pb}$
Ряд актиния	${}^{227}_{89}\text{Ac}$ , ${}^{235}_{92}\text{U}$	$10^9$ лет	Содержит 14 элем. оканч. ${}^{207}\text{Pb}$
Ряд нептуния	${}^{237}_{93}\text{Np}$	$10^6$ лет	Содержит 14 элем. оканч. ${}^{209}\text{Bi}$

## 3.5. Трансурановые элементы

Периодическая система элементов, встречающихся на Земле, заканчивается 92-м элементом – ураном. Но элементы, лежащие в таблице Менделеева "за ураном" – **трансурановые** – также когда-то существовали в природе и постепенно распались. Имея малый период полураспада, они исчезли из природы.

Элементы с  $Z > 92$  в настоящее время создаются искусственно при помощи ядерных реакций. При этом в качестве ядра-мишени берутся самые тяжелые элементы, бомбардируют же мишень легкими частицами, например, ядрами гелия, ядрами легких элементов.

Пример реакции:



Понятно, что необходимы для этих целей специальная техника или особые условия. Кроме того, стоит проблема выделения полученных трансурановых изотопов из мишени, для чего используют методы радиохимии.

В настоящее время получены элементы от  $Z = 93$  до  $Z = 113$ .

Сейчас развиваются идеи и проводятся эксперименты по обнаружению элементов с  $Z = 114$  ( $A = 298$ ) и  $Z = 126$  ( $A = 310$ ). Эти ядра должны быть стабильны, поскольку они имеют два магических числа.

Трансурановые элементы находят широкое применение. Например, имея большую величину энерговыделения на единицу своей массы за счет протекающих ядерных реакций распада (порядка 20 – 30 Вт/г), они используются в изотопных нагревателях космических аппаратов.

## 4. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ С ВЕЩЕСТВОМ

Радиоактивное излучение присутствовало в природе всегда. С развитием техногенной деятельности человека доля его увеличилась. Во многих местностях Белоруссии оно присутствует в большей или меньшей степени после чернобыльских событий.

Радиоактивное излучение влияет на свойства неорганических и органических веществ, биологических систем, поскольку оно переносит энергию, импульс и электрический заряд.

По роду взаимодействия с веществом радиоактивное излучение можно разделить на три группы:

1. **Поток заряженных частиц:**  $\alpha$ -излучение,  $\beta$ -излучение, протоны, дейтроны, различные ионы.
2. **Поток нейтральных частиц:** нейтроны, нейтрино и т.п.
3. **Электромагнитное излучение:** рентгеновское,  $\gamma$ -излучение. Характер взаимодействия радиоактивного излучения с веществом зависит от природы излучения.

### 4.1. Взаимодействие заряженных частиц с веществом

Любое вещество состоит из положительно заряженных ядер и отрицательных электронов. При падении на вещество потока заряженных частиц, например, или излучения, между падающим излучением и веществом возникает электромагнитное взаимодействие и происходит потеря энергии излучения. Механизм взаимодействия излучения с веществом различен.

#### 4.1.1. Ионизационное торможение

В этом механизме кинетическая энергия падающей заряженной частицы тратится на возбуждение и ионизацию атомов среды. Величина потерь энергии на единице длины пути падающей частицы выражается формулой

$$-\left[\frac{dE}{dx}\right]_{\text{ион}} = B \frac{4\pi \cdot e^4 \cdot Z^2}{m_e \cdot v^2} \cdot Z_a \cdot N_a \quad (4.1)$$

где  $dE$  – энергия частицы, которую она теряет при прохождении расстояния  $dx$ ;  $v$  – скорость падающей частицы;  $Z$  – атомный номер частицы;  $e$  – заряд электрона,  $Z_a$  – атомный номер вещества,  $N_a$  – число атомов в еди-



нице объема вещества;  $m_e$  – масса электрона;  $-\left[\frac{dE}{dx}\right]_{\text{ион}}$  – потеря энергии, приходящаяся на единицу длины пути, т.е. удельная потеря энергии,  $(Z_a \cdot N_a)$  – электронная плотность поглощающего вещества,  $B$  – сложная логарифмическая функция, зависящая от  $m_e, V$ , а также потенциала ионизации атомов поглощающего вещества.

Зависимость удельных потерь энергии от энергии налетающей частицы рассчитывается по формуле (4.1) (рис. 5). Участок АВ – отступление от формулы (4.1), т.к. в этом случае налетающая частица имеет маленькую скорость и, пролетая возле атома вещества, успевает захватить его электрон и сама по этой причине изменяется. Поскольку величина удельных ионизационных потерь зависит от скорости и заряда частицы, то при одной и той же энергии налетающей частицы удельная ионизационная потеря электрона и  $\alpha$ -частицы будет резко отличаться. Например, при энергиях порядка нескольких МэВ потери электрона на ионизацию, примерно в  $10^4$  раз меньше, чем для  $\alpha$ -частиц. Зависимость удельных потерь энергий на ионизацию воздуха от энергии разного рода частиц показана на рис. 6.

Иллюстрацией зависимости удельных ионизационных потерь от энергии частицы может служить кривая, приведенная ниже для  $\alpha$ -частицы на рис. 7 (по оси абсцисс отложена длина пути  $\alpha$ -частицы в веществе). Из рисунка видно, что удельные ионизационные потери при уменьшении скорости  $\alpha$ -частицы резко возрастают, т.е.  $\alpha$ -частица в большей степени ионизирует вещество в конце своего пути  $R$ .

Резкое возрастание ионизационных потерь в конце своего пути характерно для многих заряженных частиц.

Удельная ионизирующая способность тяжелых многозарядных частиц велика. Так,  $\alpha$ -частица с энергией несколько МэВ на пути в 1 см в воздухе создает 30000 пар ионов. Электрон такой же энергии – всего несколько десятков пар ионов.

#### 4.1.2. Длина пробега

**Длина пробега или просто пробег  $R$**  – это толщина слоя вещества, которую может пройти частица до полной остановки, если направление движения частицы было перпендикулярно поверхности вещества.

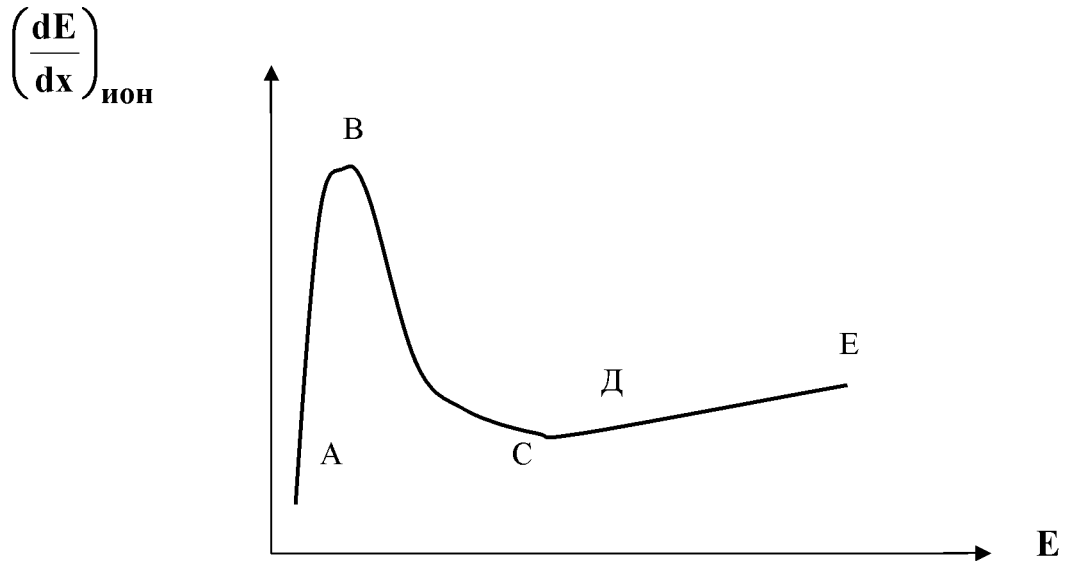


Рис. 5. Зависимость удельных потерь энергии  $\left(\frac{dE}{dx}\right)_{\text{ион}}$  от энергии  $E$  налетающей частицы

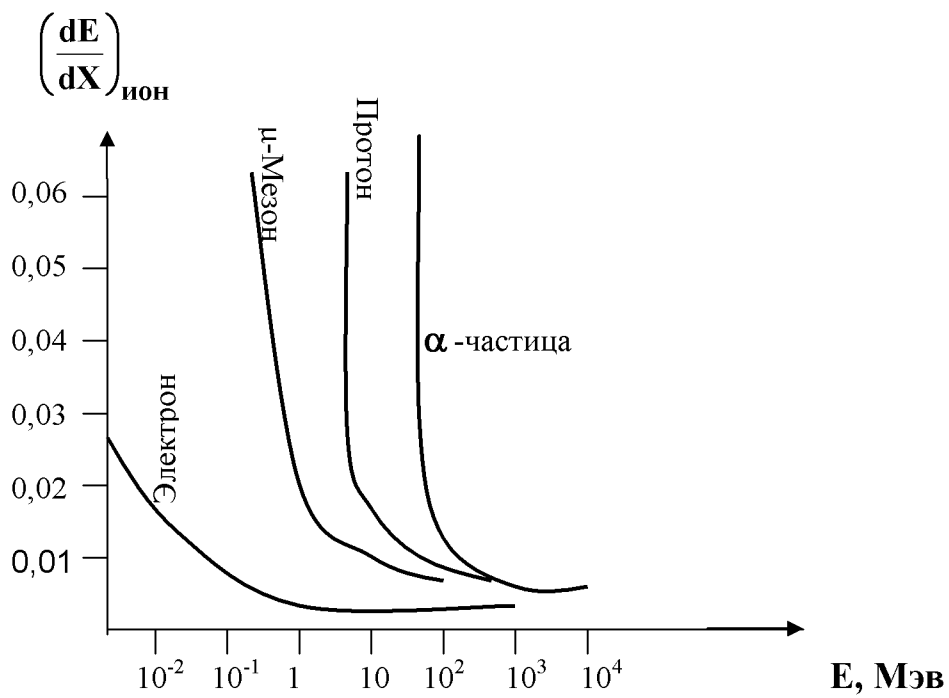


Рис. 6. Зависимость удельных потерь энергии на ионизацию воздуха от энергии разного рода частиц

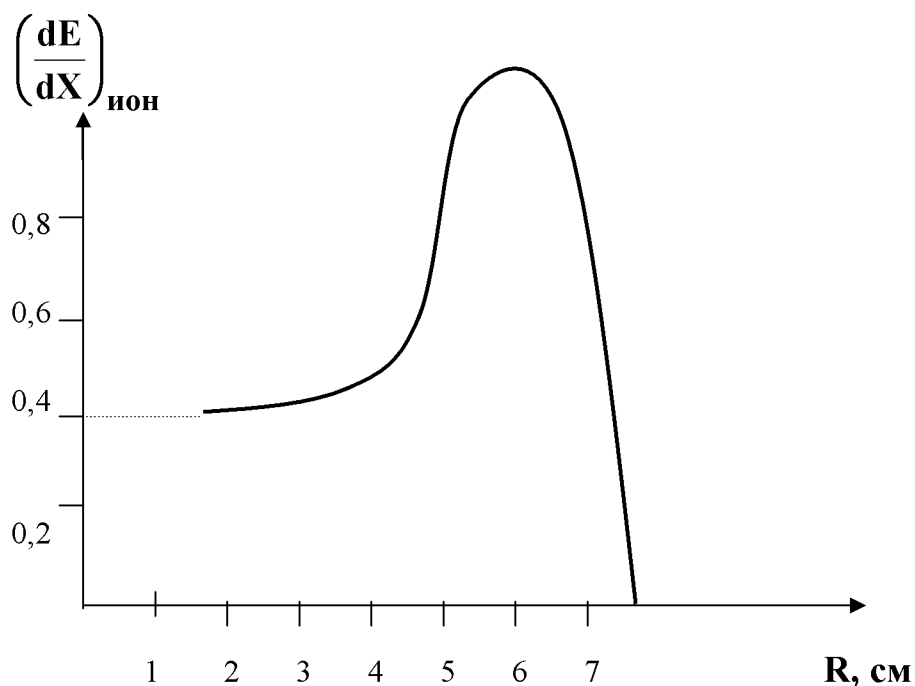


Рис. 7. Зависимость удельных ионизационных потерь от энергии  $\alpha$ -частиц

Понятия пути и пробега практически совпадают для тяжелых частиц, траектория которых почти прямая, в отличие от электронов, траектория движения которых есть ломаная сложная линия.

Конкретное аналитическое выражение для длины пробега зависит от многих факторов и может быть сложным. Поэтому, чаще пользуются эмпирическими соотношениями. Так, общая формула для пробега заряженных частиц может быть записана в виде

$$R = \alpha \cdot E^{3/2} \quad (4.2)$$

где  $\alpha$  – постоянная, зависящая от рода вещества, энергии и типа частиц.

В табл. 4.1 представлен пробег  $\alpha$ -частиц для некоторых веществ в зависимости от энергии. Видно, что пробег в алюминии и биологической ткани для  $\alpha$ -частиц в 1000 раз меньше, чем в воздухе.

Пробег электронов в некоторых веществах в зависимости от энергии показан в табл. 4.2. Сопоставляя обе таблицы, можно заключить, что пробег электронов по сравнению с пробегом  $\alpha$ -частиц в  $10^4 - 10^5$  раз больше. Например, листа бумаги достаточно, чтобы задержать все падающие  $\alpha$ -частицы, в то время как толщина листа алюминия, чтобы задержать все

падающие  $\beta$ -частицы, должна составлять примерно несколько сантиметров для энергии 7 – 10 МэВ.

Отметим, что на практике и в справочной литературе длину пробега часто выражают в иных единицах измерения –  $\text{г/см}^2$ , смысл чего можно понять из следующего соотношения

$$R(\text{г/см}^2) = R(\text{см}) \cdot \rho(\text{г/см}^3), \quad (4.3)$$

где  $\rho$  – удельная плотность вещества.

Таблица 4.1

Пробег  $\alpha$ -частиц в некоторых веществах

Е, МэВ	Воздух, см	Биологическая ткань, мкм	Алюминий, мкм
4	2.5	31	16
5	3.5	43	23
6	4.6	56	30
7	5.9	72	38
8	7.4	91	48
9	8.9	110	58
10	10.6	130	69

Таблица 4.2

Пробег электронов в некоторых веществах

Е, МэВ	Воздух, см	Алюминий, мм	Железо, мм	Медь, мм	Свинец, мм
0.01	0.22	1.30	5.43	5.11	7.27
0.10	12.61	7.0	2.69	2.48	2.73
1.00	379.7	2.03	0.76	0.70	0.67
2.00	835.3	1.67	1.50	1.57	1.38
4.00	1709.2	9.19	3.34	3.00	2.58
7.00	2100.2	15.7	5.57	4.98	4.02
10.00	4013.9	21.6	7.55	6.73	5.18

### 4.1.3. Другие виды взаимодействия

Заряженная частица при прохождении через вещество может терять энергию иными способами:

- за счет **радиационного торможения** (в этом случае движущаяся с отрицательным ускорением частица теряет энергию вследствие излучения ею электромагнитных волн);
- за счет **упругого рассеяния** на ядрах при кулоновском взаимодействии с ними;
- может произойти **ядерная реакция** в ядре, если оно захватит частицу;
- может возникнуть **излучение Вавилова – Черенкова**.

Однако эти виды взаимодействия заряженных частиц с веществом менее вероятны, чем ионизационное торможение.

## 4.2. Взаимодействие гамма-излучения с веществом

Гамма-излучение является электромагнитным по природе. Оно возникает при ядерных превращениях, например, при  $\alpha$  или  $\beta$ -распаде ядер.

Энергия  $E_\gamma$  квантов  $\gamma$ -излучения равна

$$E_\gamma = h \cdot \nu = h \cdot (c/\lambda) \quad (4.4)$$

где  $h$  – постоянная Планка ( $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);  $c$  – скорость света;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $\nu$  – частота излучения.

Взаимодействие  $\gamma$ -излучения с веществом качественно отличается от взаимодействия заряженных частиц. Основными видами взаимодействия  $\gamma$ -излучения с веществом являются: фотоэффект, комптон-эффект, рождение электронно-позитронных пар.

Явление **фотоэффекта** состоит в том, что энергия фотона целиком поглощается атомом, а один из электронов оболочки выбрасывается за пределы атома.

При **комpton-эффекте** происходит рассеяние  $\gamma$ -лучей электронами вещества. В результате  $\gamma$ -квант отдает часть своей энергии электрону, а значит длина волны, соответствующая этому  $\gamma$ -кванту, увеличивается.

Эффект рождения электронно-позитронных пар возможен при достаточно большой энергии  $\gamma$ -кванта. В этом случае в поле частицы веществ-

ва (ядра или электрона) происходит поглощение  $\gamma$ -кванта и одновременно в одном акте возникают электрон и позитрон. При этом ядро (или электрон вещества) получает некоторый импульс. На рис. 8 представлена зависимость различных сечений взаимодействия  $\gamma$ -квантов от энергии  $E_\nu$

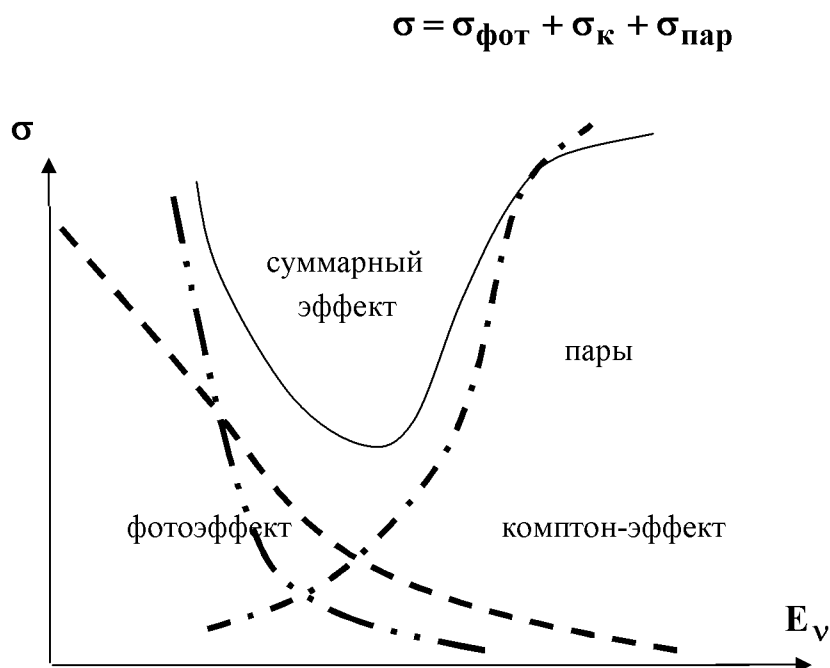


Рис. 8. Зависимость различных сечений взаимодействия  $\gamma$ -квантов от энергии  $E_\nu$

Как видим, сечения фото- и комптон-эффектов в области высоких энергий спадают практически до нуля, и основным механизмом поглощения  $\gamma$ -излучения становится процесс рождения пар. Эти три процесса поглощения  $\gamma$ -квантов значительно превалируют над другими возможными процессами, например, выбиванием нуклонов из ядра, образованием  $\mu$ -мезонных пар и др.

*Поглощение  $\gamma$ -излучения веществом.* Электромагнитное излучение при прохождении через вещество поглощается им. Характер этого поглощения носит экспоненциальный вид в отличие от поглощения заряженных частиц, когда существует определенная связь между энергией частицы и длиной пробега, которая имела фиксированное значение.

Установлено, что интенсивность моноэнергетического пучка лучей при прохождении вещества изменяется по закону

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau \cdot x} \quad (4.5)$$

где  $I_0$  – интенсивность падающего пучка  $\gamma$ -лучей;  $I$  – интенсивность прошедшего пучка  $\gamma$ -лучей;  $\tau$  – линейный коэффициент поглощения;  $x$  – толщина слоя вещества.

Линейный коэффициент поглощения можно представить в виде суммы  $\tau = (\tau_{\text{ф}} + \tau_{\text{ком}} + \tau_{\text{пар}})$  в соответствие с тремя основными механизмами поглощения  $\gamma$ -квантов в веществе. Понятно, что линейные коэффициенты поглощения  $\tau, \tau_{\text{ф}}, \tau_{\text{ком}}, \tau_{\text{пар}}$  зависят от вещества и энергии  $\gamma$ -квантов. Это проиллюстрировано в табл. 4.3 на некоторых примерах.

Часто пользуются не линейным  $\tau$ , а массовым коэффициентом поглощения  $\tau^*$ , равным  $\tau^* = \tau/\rho$ , где  $\rho$  – плотность вещества ( $[\tau^*] = \text{кг/м}^2$ ). Тогда закон (4.5) можно записать в виде

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau^* \cdot x^*} \quad (4.6)$$

Таблица 4.3

Линейные коэффициенты поглощения  $\gamma$ -лучей  
для некоторых веществ в зависимости от энергии квантов

Вещество	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1 МэВ	3 МэВ	6 МэВ
Сосна	0.67	0.0452	0.0253	0.0175
Ткани человека	1.00	0.0699	0.0393	0.0274
Песок	2.20	0.1400	0.0825	0.0578
Бетон портланд	2.40	0.1540	0.0878	0.0646
Бетон баритовый	3.50	0.2130	0.1270	0.1100
Стекло свинцовое	6.40	0.4390	0.2570	0.2570
Сталь (1 % С)	7.83	0.4600	0.2760	0.2340
Висмут	9.80	0.7000	0.4090	0.4400
Свинец	1.35	0.7700	0.4700	0.4900

### 4.3. Взаимодействие нейтронов с веществом

Поскольку нейтрон в целом электрически нейтрален, то нейтроны при прохождении через вещество ведут себя иначе, чем заряженные частицы и  $\gamma$ -кванты. Нейтроны непосредственно не могут вызвать ни ионизации, ни возбуждения атомов вещества.

Взаимодействие нейтронов с веществом происходит в том случае, когда каждый нейтрон приближается к ядру и в действие могут вступить ядерные силы сильного взаимодействия. В зависимости от того, попадет нейтрон непосредственно в ядро или нет, его взаимодействия с ядрами делятся на два класса:

- *упругое потенциальное рассеяние* (нейтрон в ядро не попадает);
- *ядерные реакции различного типа* (при попадании нейтрона в ядро).

При взаимодействии нейтронов с веществом важную роль играет энергия нейтронов, по которой нейтроны классифицируют следующим образом: **холодные, тепловые, надтепловые, промежуточные, быстрые, сверхбыстрые.**

**Холодные нейтроны.** Энергия нейтронов  $E < 5 \cdot 10^{-3}$  эВ.

**Тепловые нейтроны** – нейтроны, находящиеся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Их энергия лежит в интервале  $5 \cdot 10^{-3} - 0.1$  эВ.

**Надтепловые нейтроны** – нейтроны с энергией, при которой отсутствует термодинамическое равновесие с окружающей средой. Наименьшее значение энергий этих нейтронов при нормальной температуре среды  $0.1 - 0.2$  эВ.

**Промежуточные нейтроны.** Нейтроны с энергией в интервале от энергетической границы надтепловых нейтронов до **200 КэВ.**

**Быстрые нейтроны.** Нейтроны с энергией **0.2 – 20 МэВ.**

**Сверхбыстрые нейтроны.** Нейтроны с энергией  $E > 20$  МэВ.

Нейтроны иногда делят на две группы – **медленные и быстрые.** Их разделяет граница энергии **1 МэВ.**

Отметим, что разделение нейтронов на группы и классы носит условный характер. Четкой границы между ними нет.

#### 4.3.1. Упругое рассеяние

Нейтроны упруго рассеиваются на ядрах легких элементов. Упругое рассеяние возникает при столкновении нейтрона массой  $m_n$  и кинетической энергией  $E_{n_0}$  с ядром массой  $M_j$ . Применим к этому случаю законы сохранения импульса и энергии. Пусть импульс нейтрона до столкновения  $P_{n_0}$ , после столкновения  $P_{n_1}$ , импульс ядра после столкновения  $P_j$ , кинетическая энергия нейтрона до столкновения  $E_{n_0}$ , после столкновения  $E_{n_1}$ , кинетическая энергия ядра после столкновения  $E_j$ .



тическая энергия ядра  $E_{\text{я}}$ . Построенный на трех векторах импульсов замкнутый треугольник выражает закон сохранения импульса нейтрона и ядра.

Находим из теоремы косинусов

$$P_{n_1}^2 = P_{n_0}^2 + P_{\text{я}}^2 - 2 \cdot P_{n_0} \cdot P_{\text{я}} \cdot \cos \varphi \quad (4.7)$$

Одновременно запишем закон сохранения энергии

$$E_{n_0} = E_{n_1} + E_{\text{я}} \quad \text{или} \quad \frac{P_{n_0}^2}{2m_n} = \frac{P_{n_1}^2}{2m_n} + \frac{P_{\text{я}}^2}{2M_{\text{я}}} \quad (4.8)$$

Из уравнений (4.7) и (4.8) находим

$$E_{\text{я}} = \frac{4m_n \cdot M_{\text{я}}}{(m_n + M_{\text{я}})^2} \cdot E_{n_0} \cdot \cos^2 \varphi \quad (4.9)$$

Последнее уравнение преобразуем, введя  $\chi = \frac{M_{\text{я}}}{m_n}$

$$E_{\text{я}} = \frac{4 \cdot \chi}{(1 + \chi)^2} \cdot E_{n_0} \cdot \cos^2 \varphi \quad (4.10)$$

Как видно, если  $\chi$  составляет порядка сотен, то энергия  $E_{\text{я}}$  невелика. Значение энергии  $E_{\text{я}}$  будет максимальным при  $\chi = 1$ , т.е. при равенстве масс нейтрона и ядра. Это осуществляется при рассеянии нейтронов на водородосодержащих веществах, поскольку в этом случае нейтрон быстро теряет энергию. Поэтому такие водородосодержащие среды, как вода, парафин и другие применяют для замедления нейтронов.

### 4.3.2. Ядерные реакции на нейтронах

При попадании нейтрона в ядро в нем происходит реакция, началом которой, как правило, является образование составного ядра в возбужденном состоянии



где  ${}^A_Z Y^*$  – символ возбужденного составного ядра.

Возбужденное ядро не является устойчивым и распадается с испусканием одной или нескольких частиц. При этом энергетически возможны

несколько типов ядерных реакций, вероятность которых может быть различной.

Можно отметить следующие типы реакций: **радиационный захват нейтрона, реакции с образованием протона, реакции с образованием  $\alpha$ -частицы, реакции с образованием двух или более нейтронов.** Некоторые реакции на нейтронах уже отмечались в п. 3.1. Возможны ядерные реакции иного типа, например, магнитное взаимодействие нейтрона с электронами и ядром и т.д. Вероятность осуществления того или иного типа взаимодействия, реакция характеризуется сечением взаимодействия, типы которых у нейтрона разнообразны: сечение упругого рассеяния, сечение неупругого рассеяния, сечение захвата, сечение ядерной реакции и т.п.

Сечение взаимодействия для конкретных в таблице Менделеева ядер зависит от энергии нейтронов. В общем случае сечение взаимодействия достаточно плавно зависит от энергии нейтрона в определенной области энергий, обнаруживая часто скачки, пики резонансного взаимодействия.

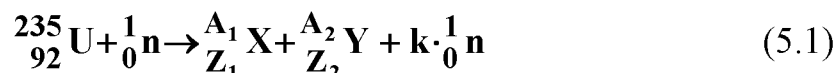
Пучок нейтронов при прохождении через вещество ослабляется. Характер этого ослабления является экспоненциальным, как это было и для  $\gamma$ -лучей (формула 4.5).

В отличие от  $\alpha$  и  $\beta$ -частиц, для которых введенная ранее величина пробега соответствовала полной остановке частиц, для нейтронов вводится понятие **длины релаксации**. **Длина релаксации  $\lambda$  – это толщина вещества  $x=\lambda$ , пройдя которую поток нейтронов уменьшается в  $e$  раз ( $e = 2.718$ ).** Длина релаксации зависит от энергии нейтронов и типа ядер. Понятие длины релаксации вводится и для  $\gamma$ -лучей.

## 5. ОСНОВЫ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

### 5.1. Реакция деления

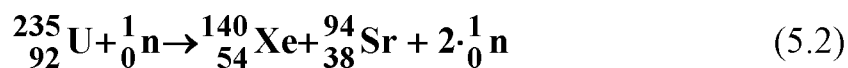
В первой главе мы отметили энергетическую выгодность деления тяжелых ядер на более легкие. Отметим также, что этот процесс постоянно проходит в природных условиях и носит название самопроизвольного (спонтанного) распада ядер. Однако процесс деления тяжелых ядер может быть инициирован извне, например, облучением нейтронами или другими частицами. Опыты показали, что происходящая реакция имеет общий вид



Записанная реакция показывает, что налетевший на тяжелое материнское ядро  ${}_{92}^{235}\text{U}$  нейтрон вызвал появление двух осколков  ${}_{Z_1}^{A_1}\text{X}$ ,  ${}_{Z_2}^{A_2}\text{Y}$  и нескольких нейтронов. Понятно, что выполняются правила смещения.

Осколки деления могут иметь любую массу, но наиболее вероятна такая ядерная реакция, при которой массы осколков деления примерно относятся как 2:3.

Типичный пример реакции деления



В качестве материнского ядра может быть использовано любое тяжелое ядро, а не только  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , как это записано в примерах (5.1, 5.2). Реакция деления является экзотермической. При этом выделяется при каждом акте деления ядра урана 200 МэВ ( $3 \cdot 10^{-11}$  Дж) энергии. Последнее нетрудно рассчитать, воспользовавшись численными значениями удельной энергии связи материнского и осколочных ядер (для ядра урана и удельная энергия связи 7.6 МэВ, для осколков обычно 8.5 – 8.75 МэВ в зависимости от типа осколков).

Кроме отмеченных выше, для реакций деления характерны следующие свойства:

1. Осколочные ядра X, Y являются радиоактивными и в свою очередь распадаются, испуская нейтроны, электроны и  $\gamma$ -лучи.

Испускаемые в этом случае нейтроны называются **запаздывающими** в отличие от нейтронов, излучаемых при первичном акте деления (эти нейтроны называются **мгновенными** или **вторичными**).

2. Мгновенные нейтроны вылетают в момент деления за время  $10^{-12}$  с. Запоздывающие нейтроны испускаются после первичного деления в течение нескольких десятков секунд.

3. Число мгновенных нейтронов при каждом акте деления меняется от одного до трех. В среднем на один акт деления приходится 2.5 нейтрона.

4. Мгновенные нейтроны имеют сравнительно широкий энергетический спектр 0 – 7 МэВ; средняя же энергия одного мгновенного нейтрона равна 2 МэВ, чему соответствует скорость  $2 \cdot 10^7$  м/с.

5. Ядерная реакция деления характеризуется сечением ядерной реакции, зависящим от характеристик материнского ядра и энергии первичного нейтрона, вступающего в реакцию. Так ядра  $^{235}\text{U}$  делятся под действием и быстрых и медленных нейтронов, а ядра  $^{238}\text{U}$  делятся только быстрыми нейтронами с энергией, большей 1.5 МэВ. При меньших энергиях нейтроны поглощаются ядром  $^{238}\text{U}$  без последующего деления (это **радиационный захват**).

## 5.2. Цепная реакция деления

Описанные выше свойства ядерной реакции деления позволяют понять принципы реализации **цепной реакции деления**. Эта реакция **саморазвивающаяся**. Суть этой реакции заключается в непрерывно увеличивающихся актах деления тяжелых ядер за счет вторичных нейтронов. Началом такой разветвляющейся цепи ядерных реакций деления является какая-то принудительно или случайно произошедшая одна реакция типа (5.1, 5.2), в результате чего появилось в среднем 2.5 вторичных нейтрона.

Цепная реакция даже в большом количестве ядер завершается очень быстро. На самом деле, пусть имеется кусок урана-235 массой 1 кг.

Зная, что молярная масса  $^{235}\text{U}$   $\mu = 235$  кг/кмоль и число Авогадро  $N_A = 6.03 \cdot 10^{26}$  1/кмоль, нетрудно записать для числа атомов (ядер)  $N$  в куске массой  $m$  следующее соотношение:

$$N = \frac{m}{\mu} \cdot N_A \quad (5.3)$$

Рассчитаем число ядер  $N$

$$N = \frac{1 \cdot 6.03 \cdot 10^{26}}{235} = 2.5 \cdot 10^{24} \quad (5.4)$$

Реакция завершается, если каждое из  $2.5 \cdot 10^{24}$  ядер расщепится под действием вторичных нейтронов. Ясно, что число вторичных нейтронов должно быть равно числу ядер  $N$ . Но образование нейтронов происходит лавинообразно: в первом акте деления образуется в среднем 2.5 нейтрона, каждый из них вызовет появление 2.5 нейтронов и т.д. Всего осуществится смена  $k$ -поколений и образуется  $2.5^k$  вторичных нейтронов, которые, по нашему предположению, вступят в реакцию. Таким образом

$$N = 2.5^k \Rightarrow 2.5 \cdot 10^{24} = 2.5^k \Rightarrow k = 61 \quad (5.5)$$

Поскольку время жизни вторичных нейтронов одного поколения (время от рождения до попадания в ядро и инициирования ядерной реакции) равно  $10^{-7} - 10^{-8}$  с, то  $k = 61$  поколений будут существовать время  $\tau = (10^{-8} - 10^{-7}) \cdot 61 = 10^{-6} - 10^{-5}$  с, т. е. все ядра, содержащиеся в 1 кг  $^{235}\text{U}$ , вступят в реакцию за время  $10^{-6} - 10^{-8}$  с. Такая цепная ядерная реакция и есть ядерный взрыв (отметим, что взрыв обычного взрывчатого вещества тоже происходит за  $10^{-6}$  с).

Ядерный взрыв 1 кг  $^{235}\text{U}$  приведет к выделению огромного количества энергии  $Q = 3 \cdot 10^{-11} \cdot 2.5 \cdot 10^{24} = 10^{14}$  Дж. Это эквивалентно сжиганию  $5 \cdot 10^6$  кг каменного угля (100 железнодорожных вагонов).

Описанное теоретическое представление о развитии цепной реакции деления является идеализированным, основанным на допущении, что каждый мгновенный (вторичный) нейтрон обязательно вызовет ядерную реакцию. В действительности это не выполняется по следующим причинам:

- часть нейтронов вылетает из куска делящегося материала вовне и не вступает в реакцию;
- часть нейтронов попадет в ядра, но не вызовет ядерной реакции деления (может осуществиться иная реакция);
- часть нейтронов обязательно будет захвачена ядрами примеси, которые всегда есть в любом веществе (например, ядра благородных металлов

**Au, Ag** и некоторых элементов **B, Cd** имеют сечение захвата нейтронов в  $10^2 - 10^4$  раз больше сечений ядерной реакции деления ядер **U, Pt** и т. д.).

Таким образом, для практической реализации цепной реакции деления необходимо создать такие условия, которые предотвратили бы выполнение вышеназванных пунктов:

1. Делящееся вещество выбрать в форме шара (в этом случае утечка нейтронов будет минимальной);

2. Вылетевшие из делящегося вещества вовне нейтроны возвратит назад применением "зеркал" – отражателей (в качестве отражателей используются вещества, ядра которых близки по массе к нейтронам; ими могут быть водородсодержащие вещества: вода, парафин и т.п.);

3. Делящееся вещество очистить от примесных ядер;

4. Спектр энергий вторичных нейтронов, имеющий область  $0 - 7$  МэВ, трансформировать таким образом, чтобы осуществлялась только ядерная реакция деления. Так, например, поскольку ядра  $^{235}\text{U}$  эффективно делятся под действием медленных нейтронов (энергия нейтрона меньше 1 МэВ), то целесообразно все нейтроны сделать медленными. Это выполняется с помощью замедлителей веществ с легкими ядрами (водородсодержащие, углеродсодержащие соединения).

Минимальная масса ядерного горючего, при которой в нем еще возможна цепная ядерная реакция, называется **критической массой**. Значение критической массы зависит от ядерно-физических характеристик используемого ядерного горючего и степени выполнения вышеназванных условий 1 – 4. Так, чистый  $^{235}\text{U}$  имеет критическую массу 47 кг, если он изготовлен в виде шара диаметром 17 см. Но если этот материал составить из шаровых сегментов, разделенных полиэтиленовыми полосками, и окружить бериллиевой оболочкой, то критическая масса снизится до 250 г (шар диаметром 3 см).

Цепная ядерная реакция практически реализована в атомной бомбе. Конструктивно она выполнена в виде двух половин ядерного заряда. Каждая из половин не имеет критической массы. Взрыв обычного заряда соединяет обе половины в единое целое, которое уже обладает критической массой, инициируя ядерный взрыв.

### 5.3. Ядерный реактор

**Типы реакторов АЭС.** Энергетические атомные реакторы классифицируются по ряду основных признаков: физическим, теплотехническим, конструктивным.

**Физические характеристики:** энергия нейтронов, вид топлива, тип замедлителя и теплоносителя, устройство активной зоны.

Существуют реакторы **на медленных и быстрых нейтронах**, отличающиеся энергией нейтронов, при которой происходит основное число делений ядерного топлива. Для того чтобы получить медленные нейтроны, в активную зону необходимо поместить материал, называемый замедлителем, назначение которого – снизить энергию нейтронов, рождающихся с высокой энергией. Отсюда вытекает **классификация по виду замедлителя** – реакторы с водяным замедлителем (простой или тяжелой водой), графитом и гидридом циркония. Какие физические особенности характерны для реакторов на быстрых и медленных нейтронах? Физическая разница между ними в том, что быстрые нейтроны при высокой скорости движения имеют малую вероятность взаимодействия с ядрами делящегося материала, что не позволяет осуществить в реакторе цепную реакцию деления на природном уране. По этой причине в реакторах на быстрых нейтронах обогащение ядерного топлива выше, чем в реакторах на медленных нейтронах.

Для отвода тепла от ядерного топлива могут применяться различные **теплоносители**: простая и тяжелая вода под давлением, с кипением или без него, газы (гелий или углекислый газ), жидкие металлы (натрий, литий, смеси натрия-калия, свинец-висмут).

Реакторы отличаются также по теплотехническим признакам – **схеме теплоотвода**. Эксплуатируются реакторы с **одно-, двух- и трехконтурными схемами теплопередачи**.

Когда АЭС только начинали создаваться, наиболее распространенными были **двухконтурные** энергетические реакторы. Их особенность заключается в том, что вся радиоактивность сосредоточивается в герметичном, так называемом первом контуре, представляющем собой систему трубопроводов и теплообменного оборудования. При нормальной эксплуатации радиоактивность за пределы первого контура никогда не выходила. В двухконтурной схеме теплоноситель первого контура (простая или тяжелая

вода, углекислый газ или гелий) по трубопроводам подводится к активной зоне реактора, нагревается в ней и поступает к парогенераторам, где отдает свое тепло так называемой питательной воде второго контура. Как правило, теплоноситель первого контура прокачивается через трубки парогенератора, а питательная вода проходит в межтрубном пространстве. Образующийся в парогенераторах пар направляется в турбогенераторы и после срабатывания в цилиндрах турбин и конденсации в виде питательной воды снова возвращается в парогенераторы. Охлаждение технологических конденсоров осуществляется технической водой по отдельной схеме, хорошо известной в тепловой энергетике.

Таким образом, двухконтурная схема реактора АЭС характеризуется наличием радиоактивного первого и нерадиоактивного второго контура, всегда отделенных друг от друга при нормальной эксплуатации так, что теплоносители нигде не смешиваются и радиоактивность из первого контура никуда не поступает. Такое техническое решение обеспечивает радиационную безопасность двухконтурных АЭС.

В случае аварийной разгерметизации трубок парогенератора радиоактивный теплоноситель начинает поступать во второй контур (это характерно для ВВЭР). Дозиметрическая система технологического контроля фиксирует появление активности во втором контуре и даёт сигнал для остановки АЭС. Во время остановки обнаруживают негерметичную трубку парогенератора и глушат ее, так как эксплуатация АЭС с перетечками теплоносителя первого контура во второй недопустима. Но существуют реакторные установки, в которых при разгерметизации трубок парогенератора теплоноситель второго контура поступает в первый, и распространения радиоактивности за пределы первого контура не происходит. Это, конечно, повышает уровень радиационной безопасности АЭС.

К двухконтурным АЭС относятся ВВЭР, канадские тяжеловодные станции "Канду", английские газографитовые, газовые высокотемпературные АЭС.

В состав первого контура входят собственно реактор, парогенератор, главные циркуляционные насосы, в состав второго контура входят турбины, технологические конденсоры, деаэратор, насос питательной воды и арматура.



**Недостатком двухконтурной схемы является высокое давление теплоносителя первого контура**, например, в современных ВВЭР оно равно 160 атм. Двухконтурные схемы АЭС полностью себя оправдали с точки зрения обеспечения надежности станции. В то же время эта конструкция требует очень большого количества металла. Поэтому разработчики пошли на упрощение: в реакторах типа АМБ и РБМК стали использовать **одноконтурную схему**, в которой давление теплоносителя первого контура снижено почти в 2 раза по сравнению с двухконтурными ВВЭР. Применение одноконтурных схем в ядерной энергетике позволило уменьшить количество единиц оборудования первого контура и, следовательно, удешевило станцию.

**Одноконтурная схема АЭС** устроена следующим образом: вода под давлением поступает в технологические каналы активной зоны реактора, в которых находятся ТВЭЛы. В технологических каналах вода нагревается, частично превращаясь в пар. Затем пароводяная смесь из каналов поступает в барабан-сепаратор для отделения пара от влаги. Осушенный пар направляется в турбины. Отработанный пар поступает в технологический конденсор турбины, где происходит его конденсация, и после деаэраторов теплоноситель закачивается в реактор.

В состав первого контура РБМК входят технологические каналы, барабан-сепаратор, турбины, технологические конденсоры, циркуляционные насосы. Параметры первого контура контролируются несколькими контрольно-измерительными системами. Имеется система контроля герметичности технологических каналов. **Недостатком одноконтурной схемы является реальная возможность радиоактивного загрязнения турбогенераторов. В связи с небольшим, но постоянным выносом радиоактивности из технологических каналов реактора в паровой тракт турбины затруднено их профилактическое обслуживание.**

**Трехконтурная схема** включает в себя один радиоактивный и два нерадиоактивных контура. Такие схемы применяются в реакторах с жидкометаллическим теплоносителем, а также в атомных станциях промышленного теплоснабжения.

Существует деление реакторов по конструктивному исполнению – **корпусные, каналные и канално-корпусные**. Корпусные реакторы характеризуются тем, что тепловыделяющие сборки, образующие актив-

ную зону, размещаются в металлическом корпусе с герметизирующей съемной крышкой. Корпуса, которые используются в ВВЭР, находятся под давлением до 160 атм; давление, под которым находятся корпуса реакторов на быстрых нейтронах, не превышает 10 атм. В канальных реакторах, к которым относятся РБМК, корпусов нет, сборки тепловыделяющих элементов размещаются в технологических каналах, расположенных через определенные промежутки в графитовом замедлителе. Считалось, что отсутствие корпуса давления в реакторах типа РБМК является преимуществом по сравнению с ВВЭР, поскольку изготовление корпусов давления – довольно сложная в техническом отношении задача.

АЭС потребляет очень немного топлива по сравнению с ТЭС. Для обеспечения работы угольной ТЭС мощностью 1 млн. кВт требуется примерно 4 – 5 млн. т топлива в год. Это топливо необходимо добыть, обогатить и привезти, что дает дополнительную нагрузку на железнодорожный транспорт, загрязняет территорию, примыкающую к железнодорожному пути. В настоящее время примерно 40 % грузооборота железных дорог приходится на перевозку угля. В то же время единовременная загрузка топливом АЭС с реактором типа ВВЭР электрической мощностью 1 млн. кВт составляет 66 т двуокси урана. В год требуется перегружать 22 т ядерного топлива.

*Итак, первое преимущество АЭС по сравнению с ТЭС – значительная разница теплотворной способности и масс потребляемого ядерного и органического топлива.*

Необходимо иметь в виду еще одно важное обстоятельство, характеризующее эксплуатацию АЭС и физические особенности энергетических реакторов, – воспроизводство топлива. При работе АЭС наряду со сжиганием ядерного топлива образуется новое топливо – плутоний, который может использоваться так же, как уран, для производства тепловой и электрической энергии. Например, в реакторах на тепловых нейтронах типа ВВЭР-1000 коэффициент воспроизводства ядерного топлива равен 0.55, т.е. на каждый килограмм сгоревшего ядерного топлива образуется 0.55 кг плутония. В реакторах на быстрых нейтронах коэффициент воспроизводства может достигать величины 1.3 – 1.5. Это значительно расширяет ресурсы ядерного топлива. Практически неограниченные ресурсы появятся в случае положительного решения проблемы термоядерной энергетики.

По состоянию на 25.01.1989 в мире эксплуатировалось 358 энергетических реакторов общей электрической мощностью 293103 МВт; в 21 стране строилось 94 реактора общей электрической мощностью 82693 МВт. В отдельных странах обеспеченность электроэнергией за счет АЭС достигла очень больших масштабов. Наибольшего результата достигли Франция и Бельгия – в этих странах на АЭС вырабатывается около 70 и 67 % всей электроэнергии соответственно. Из европейских стран следует отметить также Швецию, в которой на АЭС производится 50.3 % всей электроэнергии, Швейцарию (39.4 %), Финляндию (38.4 %). Из стран азиатского региона наибольшая выработка на АЭС на острове Тайвань (43.8 %), в Южной Корее (43.6 %), Японии (24.7 %). США занимают первое место в мире по мощности АЭС, однако выработка электроэнергии на них составляет 16.6 % суммарно произведенной электроэнергии.

#### 5.4. Устройство ядерного реактора

**Ядерный реактор – сложное техническое устройство, в котором осуществляется управляемая цепная реакция деления.** По сути дела в ядерном реакторе происходит "растянутый во времени" ядерный взрыв. Аналог этому – процесс горения (медленно протекающий взрыв). Первый в мире реактор был построен в 1942 году в США под руководством Э. Ферми, первый в Европе был построен в 1946 году в СССР под руководством И. Курчатова.

В основу работы реактора положена реакция деления тяжелых ядер нейтронами. Основную часть реактора составляют:

1. Активная зона, в которой и происходит ядерная реакция. В активной зоне находятся:

– ядерное горючее – уран-235 и плутоний-239. Содержание урана-235 в природном уране составляет 0,7 %, а содержание урана-238 – 99,3 %;

– замедлитель нейтронов (используется в реакторах на медленных нейтронах) – вещество с малой атомной массой и слабым поглощением нейтронов, например, легкая и тяжелая вода, графит, бериллий и т. д. В реакторах на быстрых нейтронах замедлитель не нужен, но для осуществления цепной ядерной реакции необходимо обогащение природного урана ураном-235 до 10 % и выше. Если ядерное горючее и замедлитель пред-

ставляют собой однородный раствор, например, солей урана в тяжелой воде, то такой реактор является **гомогенным**.

Если топливо распределено в массе твердого замедлителя (например, графита), то такой реактор является **гетерогенным**. При этом ядерное горючее размещено в тепловыделяющих элементах (ТВЭЛх), представляющих собой тонкие длинные трубки.

2. Съем выделяющегося в ТВЭЛх тепла производится с помощью теплоносителя. Последним часто является вода, омывающая ТВЭЛы, хотя используются и другие вещества: газ, жидкие металлы (калий, натрий), нефть и др.

3. Активная зона помещена в корпус, который играет роль отражателя нейтронов и биологической защиты работающего персонала от радиоактивного облучения.

4. Регулировка скорости ядерной реакции деления в реакторе осуществляется с помощью регулирующих стержней, которые работающий персонал вручную или механически вводит в пространство между ТВЭЛами. Регулирующие стержни изготовлены из материала с большим сечением захвата нейтронов, например, **Cd**, и являются "ловушками" для нейтронов. Если регулирующие стержни полностью опущены в активную зону, то все нейтроны улавливаются ими и цепная реакция не идет (реактор заглушен). Если стержни полностью изъяты из активной зоны, то нейтроны не улавливаются, ядерная реакция будет нерегулируемой (произойдет взрыв). В промежуточном случае регулирующие стержни частично опущены в активную зону, положение их вручную или автоматически меняется таким образом, чтобы на один акт деления ядра в среднем приходился один нейтрон (или чуть больше). Это так называемый коэффициент размножения нейтронов **k**. Необходимым условием протекания цепной ядерной реакции деления является условие  $k > 1$ . Причем, если  $k < 1$ , то реакция затухает, если  $k = 1$ , то реакция стационарна (рабочий режим реактора), если  $k > 1$ , то скорость ядерной реакции нарастает вплоть до ядерного взрыва.

Ядерная реакция в делящемся веществе, имеющем критическую массу, завершается за  $10^{-6}$  с. Поэтому никакие регулирующие стержни за такое малое время не смогли бы сыграть своей роли, если бы началась цепная реакция деления (чтобы управлять ядерной реакцией, они должны были бы перемещаться абсолютно безынерционно и с мгновенной скоростью). По-

чему же регулирующие стержни успевают управлять ядерной реакцией? Дело в том, что в развитии ядерной реакции участвуют мгновенные (вторичные) и запаздывающие нейтроны. Именно благодаря запаздывающим (до нескольких десятков секунд) нейтронам и возможно управление ядерной реакцией.

5. В любом реакторе имеются и стержни аварийной защиты, роль которых заключается в экстренном прекращении ядерной реакции в случае интенсивного, быстротечного ее развития, чреватого аварией, взрывом. Они применяются и в случае возможного разрушения, например, ТВЭЛов.

Стержни аварийной защиты изготовлены из сильно поглощающего нейтроны вещества. Они экстренно должны опускаться в активную зону, часто под действием своего веса. Как правило, в аварийном случае должна срабатывать автоматика.

### **5.5. Энергетические ядерные реакторы отечественных АЭС**

В бывшем СССР был освоен серийный выпуск корпусных водородных энергетических реакторов мощностью 440 МВт.

Эти реакторы установлены на Нововоронежской, Кольской, Ровенской, Армянской и других станциях.

Корпусной реактор типа ВВЭР представляет собой вертикальный толстостенный цилиндрический сосуд с самоуплотняющейся сферической крышкой, рассчитанный на давление 18 МПа (180 атм). Корпус реактора имеет диаметр 4.5 м, высоту 11 м. Он сварен из цельнокованных стальных обечаек.

Активная зона реактора, размещаемая в корпусе, имеет диаметр 2.9 м, высоту 2.5 м и состоит из 349 шестигранных кассет, из которых 276 заполнены ядерным топливом (ТВЭЛы), остальные 73 кассеты выполняют функции управления и защиты реактора. Каждая рабочая кассета содержит 126 цилиндрических ТВЭЛов, равных высоте активной зоны реактора с толщиной стенки 0.6 мм (диаметр ТВЭЛа 9.1 мм). Стенки кассет толщиной 2 мм и оболочки ТВЭЛов выполнены из сплава циркония с 1 % ниобия.

Ядерным топливом является спеченный  $UO_2$ , обогащенный до 3.3 % ураном-235. Общая загрузка ураном составляет 42 т. В среднем ежегодно необходимо менять 1/3 кассет. Для ТЭС такой же мощности требуется

около 750 тысяч тонн мазута в год, для перевозки же мазута нужны 10 тысяч цистерн.

Реактор ВВЭР – двухконтурный. В качестве теплоносителя и замедлителя используется вода, которая под давлением 125 атм прокачивается через активную зону реактора, отводит тепло от ТВЭЛов и переносит его в парогенератор, где образуется пар, направляемый в турбину. Температура воды на выходе из реактора 270 °С.

Созданы у нас и реакторы большей мощности – ВВЭР-1000. Активная зона реактора имеет диаметр 3.12, высоту 3.5 м и состоит из 151 кассеты.

В каждой кассете имеется 317 ТВЭЛов и 14 регулирующих стержней. Общая загрузка ураном составляет 66 тонн. Давление воды 160 атм, ее температура на выходе из реактора 289 °С.

Другой тип реакторов – реактор большой мощности канальный РБМК, где замедлителем является графит, а теплоносителем – вода. Канальный реактор в отличие от ВВЭР не имеет прочного многотонного (200 – 500 т) внешнего корпуса. ТВЭЛы помещают в трубы-каналы, через которые прокачивается вода под давлением. Между этими каналами помещается замедлитель нейтронов – графит.

Реакторы РБМК – одноконтурные. В них теплоноситель (вода) превращается в пар непосредственно в реакторе. Проходя через сепараторы, пар очищается от радиоактивных веществ и подается на турбину.

РБМК-1000 размещается в бетонной шахте 21.6x21.6 и высотой 25.5 м. Графитовая кладка цилиндрической формы имеет массу 1700 т. Она состоит из отдельных, собранных в колонны блоков, с вертикальными цилиндрическими отверстиями вдоль всей высоты кладки, в которые устанавливаются 1693 технологических канала. Имеется также 211 каналов системы управления и защиты. Конструкционные материалы – нержавеющая сталь и сплав Zr – 2.5 % Nb. В каждом технологическом канале размещается кассета с двумя тепловыводящими сборками, каждая из которых состоит из 18 ТВЭЛов длиной 3.5 м. Таким образом, высота активной зоны реактора составляет 7 м, диаметр 11.8 м. В качестве ядерного топлива используется UO<sub>2</sub> обогащенный ураном-235 до 2 %. Общая загрузка ураном составляет 192 т. Давление пара на выходе из реактора 65 атм, а температура 280 °С.

Недостатки этого типа реакторов:

1. Большие габариты реактора и графитовой кладки делают его аккумулятором тепловой энергии, что замедляет спад тепловой мощности реактора после срабатывания аварийной защиты.

2. Большой паровой объем в контуре охлаждения существенно замедляет темп падения давления теплоносителя при аварийном разрыве трубопровода.

Сконструированы и успешно работают реакторы типа БН-350, БН-600. Реакторы этого типа работают на быстрых нейтронах (отсюда и аббревиатура "БН"), что дает возможность использовать в качестве ядерного горючего оксиды, гидриды и карбиды на основе изотопа урана-238. Этот изотоп более распространен на Земле, чем изотоп урана-235. Поэтому реакторы этого типа более перспективны, чем реакторы типа ВВЭР и РБМК.

Содержание в естественном уране урана-235 в настоящее время составляет 0.72 %. Это соотношение выполняется всюду на Земле. Правда,  $2 \cdot 10^9$  лет тому назад в смеси изотопов урана урана-235 было 3 %, а через  $2 \cdot 10^9$  лет в будущем этого изотопа будет только 0.2 %. Это объясняется тем, что период полураспада урана-235 меньше периода полураспада урана-238. Меньшее содержание урана-235 в одном из месторождений урановой руды в Африке (0.64 против 0.72 % ныне на Земле) позволяет говорить, что здесь когда-то "работал" природный ядерный реактор, что и привело к выгоранию урана-235.

### **5.6. Влияние реакторного облучения на свойства конструкционных материалов**

Конструкционные материалы реактора находятся в экстремальных условиях:

- в реакторе, особенно в его активной зоне, существует высокая плотность нейтронов –  $(10^{15} - 10^{17} \text{ н} / (\text{с} \cdot \text{см}^2))$ ;
- развиваются высокие температуры (в центре ТВЭЛов она превышает  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) и имеется большой градиент температур  $2000 \text{ град/см}$ ;
- материалы эксплуатируются в коррозионной среде (например, в среде жидких щелочных металлов);

- материалы подвергаются также механическим воздействиям.

Эти факторы приводят к сильному изменению большинства структурных, механических и физико-химических свойств всех конструкционных материалов, часто носящему необычный характер.

Некоторые изменения таковы:

- металлические материалы становятся хрупкими (иногда как стекло) – это **эффект радиационного охрупчивания**;
- металлические и неметаллические материалы увеличиваются в размерах – это **эффект радиационного распухания**; возможно распухание до 20 – 30 %;
- распухание часто носит **анизотропный** характер, т. е. в одних направлениях материал получает приращение длины больше, чем в других; часто в одних направлениях материал растет, а в других сокращается.

## 5.7. Радиационная безопасность АЭС

### 5.7.1. Защитные барьеры

При использовании ядерной энергии есть определенные правила, пренебрежение которыми ведет к трагическим последствиям. Безопасность АЭС обеспечивается правильным выбором площадки для строительства станции (вдали от крупных населенных пунктов и в местности, благоприятной по геологическим показателям), санитарно-защитной зоной вокруг АЭС. Станция должна быть оснащена высококачественными системами безопасности. Все работы по проектированию, строительству, монтажу и эксплуатации АЭС должны проводиться на высоком профессиональном уровне.

По существу безопасность АЭС обеспечивается рядом проектно-конструкторских решений, предусматриваемых в проектах реакторов и АЭС. Эти решения определяют для существующих АЭС следующие защитные барьеры:

1. *Оболочка ТВЭЛ.* Оболочка тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) является первым защитным барьером против распространения активности за пределы АЭС. В качестве оболочки ТВЭЛ могут использоваться циркониево-алюминиевые сплавы, нержавеющая сталь и некоторые другие конструкционные материалы.



Оболочка должна герметизировать топливо и надежно отделять его от теплоносителя, чтобы исключить их взаимодействие и вынос продуктов деления в парогенераторы или промежуточные теплообменники в течение всего периода эксплуатации ТВЭЛов в реакторе.

2. *Корпус реактора и первый контур.* Вторым защитным барьером против выделения радиоактивности во внешнюю среду для двух- и трехконтурных АЭС являются корпус реактора, промежуточные теплообменники или парогенераторы и трубопроводы первого контура. Для одноконтурного реактора, например, РБМК, не имеющего корпуса, таким защитным барьером являются технологические каналы и трубопроводы первого контура. Для остальных типов реакторов с двух- и трехконтурными схемами теплоотвода наличие корпуса, оборудования и коммуникаций первого контура позволяет обеспечить надежную герметизацию теплоносителя и исключить вынос высокоактивных продуктов деления за пределы первого контура при нормальной эксплуатации реактора.

3. *Защитная оболочка.* Защитная оболочка служит для предупреждения выброса радиоактивных веществ в окружающую среду в случае разгерметизации первого контура, а также для предохранения реактора от механического разрушения. В одном из вариантов защитная оболочка может размещаться непосредственно в крышке реактора и включать в себя только корпус реактора. В этом случае за пределами защитной оболочки находятся трубопроводы первого контура и парогенератор или промежуточные теплообменники. В другом варианте защитная оболочка содержит внутри себя центральный зал реактора, сам реактор, оборудование и коммуникации первого контура и рассчитана на избыточное давление 5 атм.

Защитные оболочки могут изготавливаться из нержавеющей стали или предварительно напряженного бетона. В большинстве своем зарубежные АЭС имеют защитные оболочки (контейнмент). Аварии на зарубежных АЭС и в Чернобыле свидетельствуют о необходимости иметь в качестве надежного барьера против выхода активности защитные оболочки (контейнмент). Пожалуй, можно считать доказанным, что ядерная энергетика, а тем более вновь вводимые АЭС не могут существовать без защитных оболочек, достаточно прочных и плотных, чтобы предупредить выход радиоактивности в окружающую среду в аварийной ситуации.

4. На АЭС имеются другие защитные барьеры в виде контрольных, управляющих, обеспечивающих и локализирующих систем безопасности: системы внутриреакторного контроля, управления реактором, контроля герметичности, аварийная защита реактора, система диагностики оборудования, дозиметрический контроль, система аварийного расхолаживания, газгольдеры выдержки сбросных газов и т.д.

Остановимся на устройстве и назначении отдельных систем. Система управления и защиты служит для регулирования работы реактора и его срочной остановки в случае аварийного отклонения контролируемых параметров от номинальных значений. В эту систему входят датчики контроля нейтронного потока, электронная аппаратура, стержни, поглощающие нейтроны, и исполнительные устройства в виде электромеханических приводов для перемещения стержней. В случае аварийного увеличения нейтронного потока от датчиков появляется сигнал, по которому поглощающие стержни аварийной защиты вводятся в активную зону.

Однако нельзя исключать ситуации, когда во время аварии эти каналы окажутся поврежденными, например, разрушенными или изогнутыми. Тогда стержни не смогут войти в активную зону реактора и прекратить цепную реакцию деления. На этот случай правилами проектирования предусмотрены по меньшей мере две независимые системы воздействия на реактивность (желательно основанные на различных принципах действия).

Мы сталкиваемся с новым понятием, которое пока не встречалось, – *реактивностью*. В первом приближении – это отношение числа избыточных нейтронов к числу нейтронов в стационарном состоянии реактора. Система защиты реактора, как видно из предыдущего описания, служит именно для регулирования числа избыточных нейтронов. В стационарном состоянии реактора это число должно быть равно нулю.

Все реакторы АЭС оснащены системами аварийного охлаждения активной зоны для отвода остаточного тепловыделения от ТВЭЛов вследствие образования в них продуктов деления. Необходимость такой системы обусловлена определенной вероятностью обесточивания АЭС, остановки главных циркуляционных насосов, хотя проектом всегда предусматриваются меры по резервированию энергоснабжения.

Пассивные системы безопасности могут работать без подвода энергии извне. Такова, например, система аварийного расхолаживания реакто-

ра с естественной циркуляцией теплоносителя. Она работает следующим образом: при потере энергоснабжения насосов срабатывает аварийная защита реактора, он отключается, прекращается вынужденная циркуляция теплоносителя. Однако за счет остаточного тепловыделения в ТВЭЛх активной зоны реактора теплоноситель нагревается, что вызывает, начиная с некоторой граничной температуры, естественную его циркуляцию, следовательно, отвод тепла и поддержание температуры ТВЭЛов на безопасном уровне. Можно привести также ряд других примеров. Наряду с внутренними свойствами безопасности и пассивными системами и устройствами большое значение имеют проектно-конструкторские решения, направленные на повышение уровня безопасности АЭС. Они могут быть самыми разнообразными. В качестве примера можно назвать следующие:

- наличие защитного кожуха вокруг корпуса реактора или трубопроводов первого контура;
- специальные амортизаторы на трубопроводах первого контура для компенсации напряжений, возникающих при землетрясении;
- разбрызгивающие устройства в реакторе ВВЭР для охлаждения активной зоны в случае ее обезвоживания;
- использование систем автоматического тушения пожара (для реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем);
- размещение корпуса реактора в шахте, которая может быть заполнена водой в случае аварии;
- использование прочной и плотной обстройки вокруг реактора, т.е. помещение в герметичные боксы оборудования первого контура, содержащего радиоактивный теплоноситель, разгерметизация которого не приведет к выбросу радиоактивных веществ в окружающую среду.

Однако трагический опыт Чернобыля показал, что физики разработали ядерный реактор, который, как оказалось, может выйти из-под контроля. Поэтому задача развития безопасной ядерной энергетики, проведение фундаментальных исследований по этой тематике в последние годы привлекают повышенное внимание.

Достаточно давно известен вариант безопасной атомной энергетики, основанной на работе **ядерного реактора в подкритическом режиме**, для чего требуется облучение реактора потоком нейтронов. Эти нейтроны могут быть получены с помощью интенсивных пучков протонов или более

тяжелых ядер. В последние годы работа в этом направлении значительно активизировалась как в области фундаментальных исследований, так и в разработке конкретных проектов установок, производящих энергию.

Как известно, источником энергии реактора служит процесс деления тяжелых ядер нейтронами.

Пусть для некоторого ядра  $A$  мы имеем достаточно большое эффективное сечение процесса деления.

При этом, как мы уже отмечали, при делении наряду с двумя большими осколками  $A_1$  и  $A_2$  могут вылететь несколько нейтронов. Среднее число этих дополнительных нейтронов называется коэффициентом размножения и обозначается символом  $k$ . Тогда реакция идет по схеме



Родившиеся в процессе (5.6) нейтроны, в свою очередь, реагируют с ядрами  $A$ , что дает новые реакции деления и новое, еще большее число нейтронов. Если  $k > 1$ , такой цепной процесс происходит с нарастающей интенсивностью и, вообще говоря, приводит к взрыву с выделением огромного количества энергии. Однако процесс этот можно контролировать. Во-первых, не все нейтроны обязательно попадут в ядро  $A$ : они могут выйти наружу через внешнюю границу реактора, могут поглотиться в веществах, которые специально вводятся в реактор. Таким образом, величину  $k$ , характеризующую процесс, можно уменьшить до некоторой  $k_{эф}$ , которая равна единице или лишь незначительно ее превышает. Тогда можно успевать отводить производимую энергию и работа реактора становится устойчивой. Тем не менее в этом случае реактор работает **в критическом режиме**. неполадки с отводом энергии привели бы к нарастающей цепной реакции и катастрофе.

Разумеется, во всех действующих системах предусмотрены меры безопасности, направленные на предотвращение этой возможности, однако аварии, пусть с очень малой вероятностью, могут происходить и, к сожалению, происходят.

Как выбирается рабочее вещество для атомного реактора? Необходимо, чтобы в топливных элементах присутствовали ядра изотопа с большим эффективным сечением деления. В табл. 5.1 приведены значения этого сечения для некоторых изотопов при реакциях с достаточно быстрыми

нейтронами (с энергиями порядка мегаэлектрон-вольт), мы видим две группы значений сечений: большие ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ) и малые ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ).

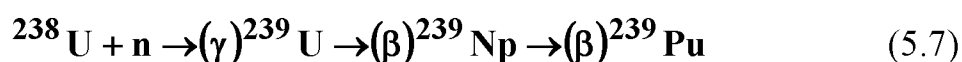
Таблица 5.1

Эффективное сечение деления быстрыми нейтронами для некоторых изотопов

Изотоп	$\sigma_{\text{эф}}$ , барн
$^{232}\text{Th}$	0.006
$^{233}\text{U}$	2.784
$^{235}\text{U}$	1.972
$^{238}\text{U}$	0.025
$^{239}\text{Pu}$	1.781

Таким образом, для реального осуществления процесса деления следует использовать такие изотопы, как ( $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ).

Изотоп  $^{235}\text{U}$  в небольшом количестве содержится в природном уране, состоящим в основном из  $^{238}\text{U}$ , поэтому в качестве ядерного топлива обычно используют уран, обогащенный изотопом  $^{235}\text{U}$ . При этом в процессе работы реактора вырабатывается значительное количество еще одного расщепляющегося изотопа –  $^{239}\text{Pu}$ . Плутоний получается в результате цепочки реакций



где  $\gamma$  означает излучение фотона, а  $\beta$  –  $\beta$ -распад.

Необходимо отметить также, что изотопы  $A_1$  и  $A_2$ , получающиеся в процессе деления, как правило, являются радиоактивными с временами полураспада от года до сотен тысяч лет, так что отходы атомных электростанций, представляющие собой выгоревшее топливо, очень опасны и требуют специальных мер для хранения. Здесь возникает проблема **геологического хранения**, которое должно обеспечивать надежность на миллионы лет вперед.

Таким образом, несмотря на очевидную пользу современной атомной энергетики, основанной на работе ядерных реакторов в критическом режиме, она имеет и серьезные недостатки. Это, во-первых, риск аварий, аналогичных чернойбыльской, во-вторых, проблема радиоактивных отходов.

Предложение использовать для атомной энергетики реакторы, работающие в подкритическом режиме, полностью решает первую проблему и в значительной степени облегчает решение второй.

### 5.7.2. Ядерный реактор в подкритическом режиме как усилитель энергии

Представим себе, что мы собрали атомный реактор, имеющий эффективный коэффициент размножения нейтронов  $k_{эф}$  немного меньше единицы. Облучим это устройство постоянным внешним потоком нейтронов  $N_0$ . Тогда каждый нейтрон (за вычетом вылетевших наружу и поглощенных, что учтено в  $k_{эф}$ ) вызовет деление, которое даст дополнительный поток  $N_0 k_{эф}$ .

Каждый нейтрон из этого из числа снова произведет в среднем  $k_{эф}$  нейтронов, что даст дополнительный поток  $N_0 k_{эф}^2$  и т.д. Таким образом, суммарный поток нейтронов, дающих процессы деления, оказывается равным

$$N = N_0 (1 + k_{эф} + k_{эф}^2 + k_{эф}^3 + \dots) = N_0 \sum_{n=0}^{\infty} k_{эф}^n \quad (5.8)$$

Если  $k_{эф} \geq 1$ , ряд в (5.8) расходится, что и является отражением критического поведения процесса в этом случае. Если же  $k_{эф} < 1$ , ряд сходится и по формуле суммы геометрической прогрессии имеем

$$N = \frac{N_0}{1 - k_{эф}} \quad (5.9)$$

Выделение энергии в единицу времени (мощность) тогда определяется выделением энергии в процессе деления  $E_d$

$$P = N E_d k = \frac{N_0 E_0 k}{1 - k_{эф}} = R_0 P_0, \quad (5.10)$$

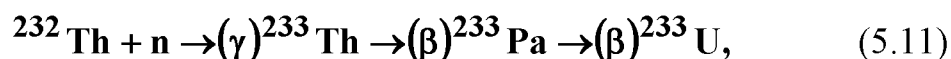
где  $k < 1$  – коэффициент, равный отношению числа нейтронов, вызвавших деление, к полному их числу. Этот коэффициент зависит от конструкции установки, используемых материалов и т.д. Он надежно вычисляется. Здесь  $P_0$  – мощность,  $R_0$  – коэффициент усиления мощности.

Осталось выяснить, как можно получить первоначальный поток нейтронов  $N_0$ . Для этого можно использовать ускоритель, дающий достаточно интенсивный поток протонов или других частиц, которые, реагируя с некоторой мишенью, порождают большое количество нейтронов. Действительно, например, при столкновении с массивной свинцовой мишенью каждый протон, ускоренный до энергии 1 ГэВ ( $10^9$  эВ), производит в результате развития ядерного каскада в среднем 22 нейтрона. Энергии их составляют несколько мегаэлектрон-вольт, что как раз соответствует работе реактора на быстрых нейтронах.

Реальный коэффициент усиления равен 21.8, значит всего 4.6 % производимой установкой энергии нужно возвращать для поддержания работы ускорителя. При этом отметим еще раз, что реактор работает только при включенном ускорителе и никакой опасности неконтролируемой цепной реакции не существует.

### 5.7.3. Воспроизводство топлива

Для производства энергии в подкритическом режиме требуется хорошо делящийся изотоп. Обычно рассматриваются три возможности:  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{233}\text{U}$ . Очень интересным оказывается последний вариант, связанный с  $^{233}\text{U}$ . Этот изотоп может воспроизводиться в реакторе при облучении интенсивным потоком нейтронов, а это и есть непременное условие работы реактора в подкритическом режиме. Действительно, представим себе, что реактор заполнен смесью природного тория  $^{232}\text{Th}$  и  $^{233}\text{U}$ . Тогда, при облучении реактора нейтронами, полученными с помощью ускорителя, как описано в предыдущем разделе, идут два основных процесса: во-первых, при попадании нейтрона в  $^{233}\text{U}$  происходит деление, которое и является источником энергии, и, во-вторых, при захвате нейтрона ядром  $^{232}\text{Th}$  идет цепочка реакций



Каждая реакция деления приводит к убыли одного ядра  $^{233}\text{U}$ , а каждая реакция (5.11) приводит к появлению такого ядра. Если сравниваются вероятности процесса деления и процесса (5.11), то количество  $^{233}\text{U}$  при работе

реактора остается постоянным, т.е. топливо воспроизводится автоматически. Вероятности процессов определяются их эффективными сечениями

$$n(^{232}\text{Th})\sigma(^{232}\text{Th}) = n(^{233}\text{U})\sigma(^{233}\text{U}) \quad (5.12)$$

где  $n$  – плотность ядер соответствующего изотопа. Сечение деления  $\sigma(^{233}\text{U}) = 2.784$  барн приведено выше, а сечение захвата нейтрона торием при тех же энергиях  $\sigma(^{232}\text{Th}) = 0.387$  барн. Отсюда получаем отношение концентраций  $^{232}\text{Th}$  и  $^{233}\text{U}$

$$\frac{n(^{233}\text{U})}{n(^{232}\text{Th})} = \frac{\sigma(^{232}\text{Th})}{\sigma(^{233}\text{U})} = \frac{0.387}{2.784} = 0.14 \quad (5.13)$$

Таким образом, если мы в качестве рабочего вещества выберем смесь из 88 % природного тория и 12 % изотопа  $^{233}\text{U}$ , то такой состав будет длительное время сохраняться при работе реактора. Положение изменится после того, как будет выработано достаточно большое количество тория. После этого нужно производить смену рабочего вещества, но  $^{233}\text{U}$  следует выделить из отработанного вещества и использовать в следующей загрузке.

При времени работы на одной загрузке порядка нескольких лет будет выработано менее 1 % всего количества тория. В проекте принята периодичность замены топлива 5 лет.

Необходимо отметить, что продукты деления  $^{233}\text{U}$ , представляющие большую радиационную опасность, с большой вероятностью участвуют в реакциях с нейтронами, в результате которых наиболее опасные продукты деления со средним временем жизни пережигаются, т. е. либо переходят в устойчивые изотопы, либо, наоборот, в очень нестабильные, которые быстро распадаются. Таким образом, отпадает необходимость геологического хранения отходов работы атомной электростанции. Это еще одно несомненное преимущество подкритического режима работы ядерного реактора. При этом, разумеется, часть потока нейтронов расходуется на пережигание отходов, что несколько понижает коэффициент усиления. Однако эти затраты, вне всякого сомнения, оправданы.



## 6. ИСТОЧНИКИ РАДИАЦИИ

### 6.1. Основные понятия радиации и ее воздействия

#### 6.1.1. Активность

Это одна из количественных характеристик радиоактивного излучения. Активность характеризует скорость ядерных превращений, т.е. это число ядерных превращений в единицу времени

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda \cdot N, \quad (6.1)$$

где  $A$  – активность;  $\lambda$  – постоянная распада;  $N$  – число ядер в момент времени  $t$ ;  $dN$  – число распавшихся ядер за время от  $t$  до  $(t + dt)$ .

За единицу активности в системе СИ принимается **беккерель (Бк)** – одно превращение в секунду. Внесистемная единица активности – кюри (Ки). Кюри – это единица активности радиоактивного препарата, при которой в 1 с происходит  $3.7 \cdot 10^{10}$  распадов (это примерно равно числу распадов 1 г изотопа  $^{226}\text{Ra}$  за 1 с). Таким образом,  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ .

Применяются и другие производные от кюри единицы:  $\text{мКи} = 10^{-3} \text{ Ки}$ ;  $1 \text{ мкКи} = 10^{-6} \text{ Ки}$  и другие.

Активность, отнесенную к единичной массе (объему или поверхности), называют соответственно **удельной массовой (объемной или поверхностной) активностью**.

Между активностью  $A$  и массой  $m$  радиоактивного вещества существует определенная связь. На самом деле, т.к.

$$m = \frac{\mu \cdot N}{N_A}; \quad m = \frac{\mu \cdot A}{\lambda \cdot N_A}, \quad (6.2)$$

где  $N_A$  – число Авогадро ( $N_A = 6.025 \cdot 10^{26} \text{ 1/(кмоль)}$ ),  $\mu$  – молярная масса изотопа в радиоактивном веществе.

Поскольку период полураспада  $T = \ln 2 / \lambda$ , то масса  $m$  радиоактивного вещества равна

$$m = \frac{\mu \cdot A \cdot T}{\ln 2 \cdot N_A} \quad (6.3)$$

Отсюда понятно, что с уменьшением  $\lambda$  или с возрастанием  $T$  масса радиоактивного вещества при одной и той же активности возрастает. Так, для  $^{131}\text{I}$ , у которого период полураспада равен 8.06 сут, масса вещества активностью 1 Ки составляет 0.008 мг, а масса  $^{238}\text{U}$  активностью 1 Ки, у которого период полураспада  $T = 4.5 \cdot 10^9$  лет, составляет около 3 т.

Понятно, что можно установить связь удельной поверхностной активности с массой радиоактивного вещества, рассеянного на этой поверхности.

Так, для  $^{137}\text{Cs}$  активностью **5 Ки/км<sup>2</sup>** (или 185000 Бк/м<sup>2</sup>) соответствует масса 0.0575 мкг, рассеянная на 1 м<sup>2</sup>, или масса 0.0575 г, рассеянная на 1 км<sup>2</sup>.

### 6.1.2. Доза облучения

Радиоактивное излучение, проходя через вещество, теряет энергию. Количество переданной веществу энергии называется **дозой**. Дозы можно рассчитывать для вещества или организма.

Используется понятие **поглощенной дозы**, т.е. энергии, поглощенной единицей массы облученного вещества.

По определению поглощенная доза **D** равна

$$D = \frac{dE}{dm} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dV}, \quad (6.4)$$

где **dm** – масса поглощающего вещества, сосредоточенная в объеме **dV**;  $\rho$  – плотность вещества; **dE** – поглощенная энергия.

В качестве единицы поглощенной дозы в системе СИ принят **грей** (Гр), т.е. 1 Гр = 1 Дж/кг.

**Внесистемная единица поглощенной дозы – рад**. Рад – единица дозы, соответствующая поглощению 1 граммом облучаемого вещества энергии в 100 эрг (эрг – "старая" единица энергии).

Связь между **радом** и **греем** такова: 1 Гр = 100 рад.

Отметим, что при вводе понятия поглощенной дозы никак не отражался факт зависимости воздействия излучения от его типа ( $\alpha$ ,  $\beta$  или  $\gamma$ ), хотя она очевидна. Известно, что при одинаковой поглощенной дозе  $\alpha$ -излучение намного (примерно в 20 раз) опаснее  $\beta$ - или  $\gamma$ -излучения. Поэтому принято сравнивать биологическое действие всех видов излучения с биологическим действием рентгеновского и  $\gamma$ -излучения.

**Коэффициент, показывающий, во сколько раз поражающее действие данного вида излучения выше, чем рентгеновского, при одинаковой дозе поглощенного излучения, называют относительной биологической эффективностью (КОБЭ) или коэффициентом качества излучения  $K$ .**

Поражающее действие  $\gamma$ -излучения и  $\beta$ -частиц при облучении биологической ткани примерно одинаково, и для них  $K = 1$ . Для  $\alpha$ -излучения  $K = 20$ , для пучка нейтронов с энергией 0,1 – 10 МэВ  $K = 10$ , для пучка нейтронов с энергией меньше 20 КэВ  $K = 3$ .

Учет поражающего действия на человеческий организм различных излучений производится вводом понятия эквивалентной дозы  $H$ , которая определяется в виде произведения

$$H = D \cdot K \quad (6.5)$$

Единица измерения эквивалентной дозы – **зиверт (Зв)**. Она меньше поглощенной единичной дозы в  $K$  раз

$$1 \text{ Зв} = 1 \text{ Гр} / K \quad (6.6)$$

Размерность зиверта – Дж/кг, т.е.  $1 \text{ Зв} = 1 \text{ Дж/кг}$ . Один зиверт соответствует одному грею для  $\beta$ -,  $\gamma$ - и рентгеновского излучений. Для других излучений выполняется соотношение (6.6). Поясним последнее на примере.

Определим, при какой поглощенной дозе  $D$  нейтронного излучения ( $K = 10$ ) эквивалентная доза  $H$  составит 1 Зв? Поскольку эквивалентная доза  $H$  есть произведение  $H = D \cdot K$ , то доза  $H = 1 \text{ Зв}$  (1 Дж/кг) будет реализована для нейтронного излучения с  $K = 10$  при поглощенной дозе 0.1 Гр, т.е. 1 Гр/10. Значит соотношение (6.5) написано верно.

Следует также учитывать неодинаковую чувствительность различных частей тела человека к одинаковой эквивалентной дозе. Например, легкие значительно чувствительней, чем костная ткань или щитовидная железа.

Поэтому дозы облучения органов и тканей следует учитывать, вводя **коэффициент радиационного риска  $r$**  (табл. 6.1). Умножив эквивалентные дозы  $H_i$  соответствующих частей тела на их коэффициенты риска  $r_i$  и просуммировав по всем органам и тканям, получим эффективную эквивалентную дозу  $H_3$ .

$$H_3 = \sum H_i \cdot r_i \quad (6.7)$$

Эта доза также измеряется в зивертах.

Коэффициенты радиационного риска

Биологическая ткань	г
Красный костный мозг	0.12
Щитовидная железа	0.03
Легкие	0.12
Молочная железа	0.15
Половые железы	0.25

Описанные выше поглощенная, эквивалентная и эффективная эквивалентная дозы выражают меру воздействия на одного человека. Можно также говорить о воздействии облучения на большой контингент людей. В этом случае оперируют понятием коллективной дозы, например, коллективной эффективной эквивалентной дозы, которая измеряется в человеко-зивертах (чел-Зв). Например, расчеты после аварии на ЧАЭС показали, что коллективная доза только от  $^{137}\text{Cs}$  на население Скандинавии и стран центральной Европы в течение года после аварии составила  $8 \cdot 10^4$  чел-Зв.

Население СССР получило дозу  $2 \cdot 10^5$  чел-Зв. Введено также понятие коллективной эффективной эквивалентной дозы, которую получают многие поколения людей, проживая на загрязненной территории – так называемую **ожидаемую коллективную эффективную эквивалентную дозу**.

Эта коллективная доза после аварии на ЧАЭС превысит  $10^6$  чел-Зв, из них 52 % приходится на европейские страны, 37 % на территорию бывшего СССР, 10 % – на Азию.

Измерение дозы облучения в живой биологической ткани – задача не простая. Легче всего провести измерение **экспозиционной** дозы.

В этом случае в качестве эквивалента ткани используют воздух и следят за его ионизацией под действием облучения. Но понятие **экспозиционной** дозы применяется только для квантованного излучения (гамма- и рентгеновского).

**Экспозиционная доза X** – это количество суммарного заряда всех ионов одного знака, которые были образованы облучением  $\gamma$ -квантами (или рентгеновскими квантами) одного килограмма воздуха.

Согласно определению

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (6.8)$$

где  $dQ$  – количество заряда всех ионов одного знака;  $dm$  – масса облучаемого воздуха.

В системе СИ единица измерения экспозиционной дозы – **Кл/кг**. Внесистемной единицей экспозиционной дозы является **рентген**, при котором суммарный заряд  $dQ$  равен одной электростатической единице электричества (это "старая" единица измерения количества электричества системы единиц измерения, называемой СГСЭ), образующаяся в  $1 \text{ см}^2$  воздуха при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $760 \text{ мм рт. ст.}$  Отметим, что  $1 \text{ Р} = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ .

## 6.2. Естественные источники радиации

Наша жизнь протекает в условиях постоянного естественного радиационного воздействия от различных источников ионизирующих излучений. **Естественный радиационный фон** – неотъемлемый фактор окружающей среды. Есть основания полагать, что в условиях естественного радиационного фона обеспечиваются оптимальные условия для жизнедеятельности растений, животных и человека.

Высказывается мнение, что в отсутствие этого фона по-другому бы протекали физико-химические процессы в живом организме и эволюционное развитие могло бы пойти по иному пути.

К **естественным источникам радиации** (рис. 9) относят **космическое излучение** и **естественные радиоактивные вещества**, присутствующие в окружающей среде (недрах, атмосфере и воде, растениях и всех живых организмах и т.д.).

### 6.2.1. Космическое излучение

**Первичное космическое излучение** представляет собой поток частиц высоких энергий, приходящих на Землю из межзвездного пространства. У ученых нет единой гипотезы, объясняющей происхождение первичного космического излучения. Одна из них связывает космическое излучение со вспышками сверхновых звезд.

Средняя энергия космических частиц  $10^{10}$  эВ, встречаются и частицы с энергией вплоть до  $10^{19}$  эВ. Современные ускорители заряженных частиц позволяют разогнать частицы до энергий порядка  $10^{12}$  эВ. **Первич-**

**ное космическое излучение** состоит из **протонов** (90 %), и  **$\alpha$ -частиц** (7 %). Присутствуют также **фотоны**, **электроны**, ядра атомов **Li, Be, B, C, N, O, F**.

**Вторичное космическое излучение** образуется при взаимодействии первичного космического излучения с нуклидами, входящими в состав воздуха. Процесс этого взаимодействия лавинообразный.

**Вторичное космическое излучение** состоит в основном из **фотонов**, **электронов**, **позитронов** и  **$\mu$ -мезонов** (энергия частиц до 600 МэВ).

Максимальная интенсивность вторичного космического излучения наблюдается на высоте 20 – 25 км. Минимум его – на уровне моря. На высоте 45 км преобладает первичное космическое излучение.

**Суммарная эквивалентная доза**, создаваемая всеми компонентами космического излучения на уровне моря, равна 0,35 мЗв/год.

### 6.2.2. Природная радиоактивность

Природную радиоактивность создают радиоактивные изотопы естественного происхождения, существующие на Земле со времени ее образования (время существования Земли  $10^9$  лет). Сохранившиеся на нашей планете радиоактивные элементы могут быть разделены на три группы:

1. Радиоактивные изотопы, входящие в состав четырех **радиоактивных семейств**, родоначальниками которых являются  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , (или  $^{239}\text{Pu}$ ),  $^{237}\text{Np}$ .

2. Генетически не связанные с ними **радиоактивные элементы, относящиеся к средней части таблицы Менделеева**. Таких радиоактивных нуклидов одиннадцать:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{96}\text{Zr}$ ,  $^{115}\text{In}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{142}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Nd}$ ,  $^{149}\text{Nd}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ ,  $^{176}\text{Lu}$ . Эти нуклиды образовались, видимо, в результате первичных процессов формирования нашей планеты. Они сохранились до наших дней благодаря большим периодам полураспада.

3. **Космогенные радионуклиды** – радиоактивные изотопы, непрерывно возникающие на Земле в результате ядерных реакций под воздействием космического излучения. К космогенным радиоактивным нуклидам относятся четырнадцать радионуклидов:  $^3\text{H}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{14}\text{C}$ ,  $^{22}\text{Na}$ ,  $^{35}\text{P}$ ,  $^{35}\text{S}$ ,  $^{36}\text{Cl}$ ,  $^{39}\text{Cl}$ ,  $^{85}\text{Kr}$  и др. Наиболее важные из космогенных радионуклидов, вносящих заметный вклад в естественный радиоактивный фон, это  $^1\text{H}^3$  (триций) и  $^6\text{C}^{14}$  (углерод-14).

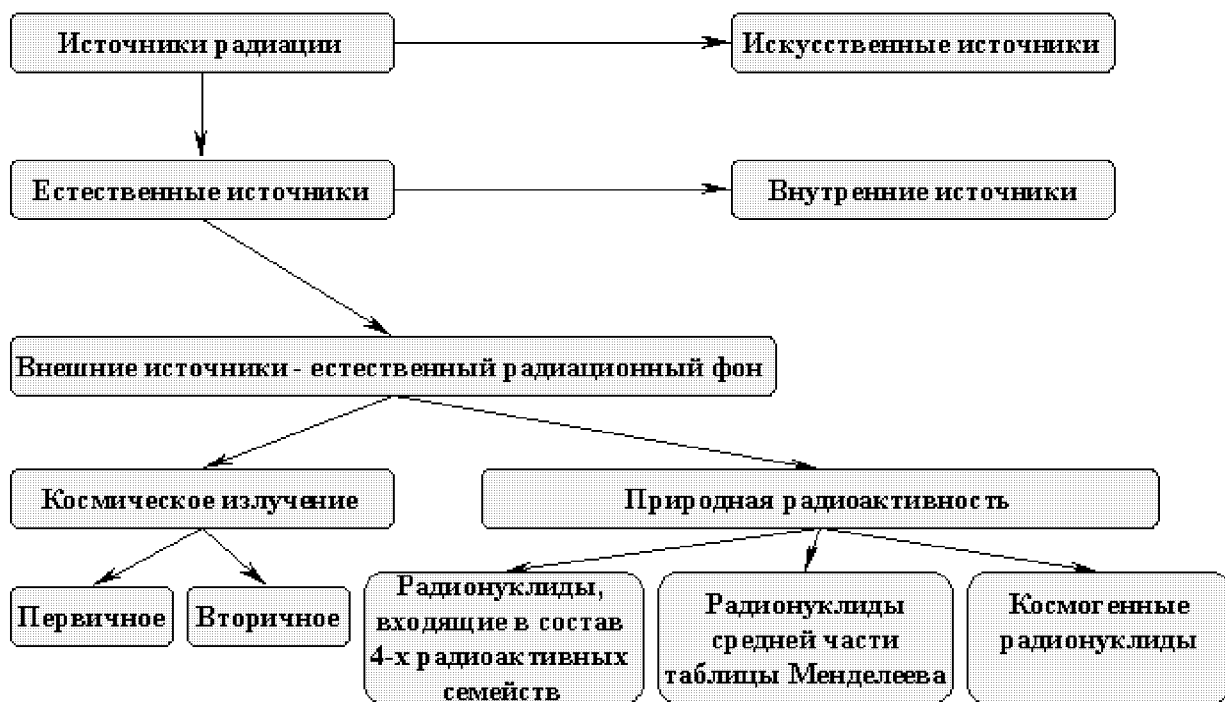


Рис. 9. Классификация естественных источников радиации

**Радон-222.** Главным источником поступления во внешнюю среду естественных радиоактивных веществ являются горные породы, возникшие в период формирования и развития планеты. В них непрерывно возникают изотопы радиоактивных семейств. Во всех семействах один из продуктов распада – газ, который называется эманацией.

В семействе урана – радия – это эманация радия или радон  ${}^{222}\text{Rn}$ , в семействе тория – эманация тория или торон  ${}^{220}\text{Th}$ , в семействе актиния – эманация актиния или актион  ${}^{219}\text{Ac}$ . Торон и актион являются изотопами инертного газа радона.

Газообразные продукты распада в заметных количествах содержатся в водоемах, воздухе и почве. Среди трех инертных газов – эманаций – важнейшая роль принадлежит радону, поскольку у него период полураспада  $T = 3.82$  сут (для торона  $T = 54.5$  с, для актиона  $T = 3.9$  с). К тому же распространённость в земной коре  ${}^{238}\text{U}$ , продуктом распада которого явля-

ется радон  ${}^{222}\text{Rn}$ , значительно больше, чем  ${}^{235}\text{U}$  и  ${}^{232}\text{Th}$ . Содержание торона в воздухе в 10 – 100 раз меньше, чем радона, доля актиона в воздухе еще меньше.

При распаде радона в воздухе появляются электрически заряженные коротко- и долгоживущие альфа- и бета-активные аэрозоли **полония, висмута и свинца**. Процесс их нейтрализации в воздухе на 90 % происходит на пылинках размером менее 5 мкм. Накопления долгоживущих аэрозолей в воздухе не происходит, так как пылинки вместе с радиоактивными изотопами оседают, что и приводит к самоочищению воздуха.

**Бета-активность воздуха** обусловлена преимущественно генетически связанными изотопами **свинца-214 и висмута-214**, **альфа-активность** – изотопами **радона и полония**.

Радон вместе со своими дочерними продуктами радиоактивного распада ответствен, примерно, за 3/4 годовой индивидуальной эффективной эквивалентной дозы, получаемой населением от земных источников радиации, и примерно половину этой дозы от всех источников радиации естественного происхождения. Большую часть этой дозы человек получает от радионуклидов, попадающих в его организм вместе с вдыхаемым воздухом, особенно в непроветриваемых помещениях (концентрация радона в закрытых помещениях в зонах с умеренным климатом примерно в 8 раз выше, чем в наружном воздухе).

Радон внутрь помещений поступает, просачиваясь через фундамент и пол из грунта и высвобождаясь из строительных конструкций; накоплению радона способствует герметизация помещений с целью утепления.

Распространяющаяся ныне тенденция удешевления строительных материалов путем применения отходов промышленного производства имеет и негативную сторону, поскольку большинство этих отходов повышено радиоактивны. При этом существенно возрастает и концентрация радона. Это необходимо принимать во внимание, так как человек значительную часть времени находится в служебных или жилых помещениях, формирование доз облучения в которых происходит под влиянием двух противоположно действующих факторов. Здания, с одной стороны, экранируют, т. е. уменьшают дозы облучения от внешних источников излучения, а с другой – увеличивают их за счет радионуклидов, содержащихся в строительных материалах, из которых построено здание, в том числе, приумно-

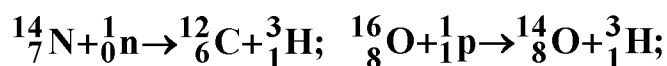


жая дозы внутреннего облучения, в основном в связи с вдыханием радона. Большинство современных строительных материалов (бетон, фосфогипс, гранит, шлак силиката кальция и др.) являются источниками радона, содержание которого внутри зданий зависит от того, из каких материалов они построены, а также от проветриваемости помещений и высоты, на которой они находятся. Концентрация радона внутри зданий в 2,5 – 200 раз выше, чем вне их.

Еще один источник поступления радона в помещение – вода и природный газ. Радон проникает в жилые комнаты после пользования душем в ванной комнате. Так, при обследовании домов в Финляндии оказалось, что в среднем концентрация радона в ванной комнате в 40 раз выше, чем в жилых помещениях (после применения душа).

**Тритий  ${}^3\text{H}$ .** Другим газообразным радиоактивным изотопом является изотоп водорода тритий ( $T = 123$  года). Тритий один из трех изотопов водорода ( ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_1\text{H}$ ). Водород занимает второе место по распространенности в земной коре, если оценку производить по числу атомов (по массе он на 9-м месте). Основные соединения водорода – вода, природный газ и нефть – обеспечивают жизнедеятельность человека. Достаточно отметить, что человеческий организм содержит примерно 70 % воды.

В естественных условиях тритий образуется в верхних слоях атмосферы под воздействием нейтронов и протонов в результате реакций



Следовательно, тритий в основном является космогенным изотопом.

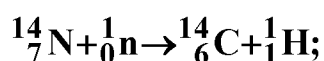
Образующийся тритий составляет молекулы водорода и воды и включается в сложный гидрологический цикл. В процессе кругооборота тритий распределяется между различными химическими соединениями. Основная же его часть (около 90 %) находится в гидросфере. Небольшая часть трития присутствует в атмосфере в виде метана и этана.

Тритий входит в состав молекул газообразного метана, который мы используем в газовых плитах на кухне. Общее содержание трития в биосфере Земли не превышает  $1.25 \cdot 10^{-12}$  МБк (340 МКв). Удельная концентрация трития в континентальных водах равна  $15 \cdot 10^{-12}$ , в поверхностных водах морей и океанов –  $2.1 \cdot 10^{-12}$  Кв/л.

Удельная активность газообразного водорода за счет трития равна  $1,44 \cdot 10^{-10}$  Ки/кг.

Тритий – чистый  $\beta$ -излучатель. В процессе его распада образуется стабильный нуклид  ${}^3_2\text{He}$ .

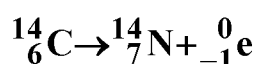
Углерод  ${}^{14}\text{C}$ . Среди известных шести изотопов углерода два –  ${}^{13}\text{C}$  и  ${}^{12}\text{C}$  – стабильны и составляют 98,892 и 1,108 % в естественной смеси. Остальные 4 изотопа  ${}^{10}\text{C}$ ,  ${}^{11}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ ,  ${}^{15}\text{C}$  – радиоактивны. Наибольший интерес из них представляет долгоживущий изотоп  ${}^{14}\text{C}$  ( $T = 5760$  лет). Его содержание в естественной смеси  $10^{-10}$  %. Изотоп является космогенным. Он образуется в верхних слоях атмосферы под воздействием нейтронов космического излучения по реакции



В результате воздействия космического излучения на азот атмосферы на Земле ежегодно возникает 10 кг изотопа  ${}^{14}\text{C}$ , а общее количество его в атмосфере планеты составляет около 80000 кг. Образующийся радиоактивный углерод  ${}^{14}\text{C}$ , соединяясь с кислородом, дает двуокись углерода, которая включается в обычный для углерода цикл обмена между атмосферой, гидросферой, почвой и органическим миром.

За многовековой период  ${}^{14}\text{C}$  распределился в стабильных изотопах углерода, и равновесная его концентрация в смеси изотопов составляет  $8 \cdot 10^{-12}$  Ки/л. Это соответствует концентрации радиоактивного углерода в атмосферном воздухе, равной  $8 \cdot 10^{-12}$  Ки/л.

Изотоп  ${}^{14}_6\text{C}$  –  $\beta$ -излучатель. В ходе распада он превращается в стабильный нуклид  ${}^{14}_7\text{N}$  по реакции



В биосфере возникло равновесие между возникающими и распадающимися радионуклидами  ${}^{14}\text{C}$ . В связи с тем, что радиоактивный углерод в далеком прошлом также находился в равновесном состоянии, было

предложено использовать это явление для определения археологических находок биологического происхождения.

Идея этого так называемого радиоуглеродного метода основана на следующем. В процессе обмена веществ живое растение усваивает из воздуха углекислый газ  $\text{CO}_2$ , который содержит, конечно же, и изотоп  $^{14}\text{C}$ .

Пока растение живет, его радиоактивность будет оставаться одинаковой. Как только растение отомрет, потребление им углекислого газа прекратится. Активность его останков начнет уменьшаться по закону радиоактивного распада. Нужно измерить активность останков растения, активность живущего в настоящее время аналогичного растения (это будет эталонная активность) и рассчитать время его гибели.

**Калий  $^{40}\text{K}$ .** Важную роль в создании естественного радиоактивного фона играет изотоп  $^{40}\text{K}$ . Калий появился на Земле в момент ее создания и содержит три изотопа:  $^{39}\text{K}$  (93,08 %) и  $^{41}\text{K}$  (6,91 %);  $^{40}\text{K}$  (0,01 %) – период полураспада  $T = 1,3 \cdot 10^9$  лет.

Это соотношение по изотопному составу сохраняется везде, где присутствует калий в природе, в том числе и в биологических объектах. В процессе радиоактивного распада 89 % ядер  $^{40}_{19}\text{K}$  испускают  $\beta$ -частицы, образуются нуклиды  $^{40}_{20}\text{Ca}$ ; в 11 % случаев происходит  $e$ -захват и образуется стабильное ядро  $^{40}_{18}\text{K}$  в возбужденном состоянии, переход из которого сопровождается  $\gamma$ -излучением.

Удельная активность природного калия высока и составляет  $8,9 \cdot 10^{-9}$  Ки/кг. Удельная активность растительных и животных продуктов по  $^{40}\text{K}$  на 2 – 3 порядка меньше.

### 6.2.3. Радиоактивность воды и горных пород

Перечисленные и все другие радиоактивные изотопы благодаря процессам метеорологического, гидрологического, геохимического и вулканического характера широко рассеиваются во внешней среде. В любом объеме вещества можно найти десятки химических элементов. Например, в воде морей и океанов в растворенном виде насчитывают до 50 элементов таблицы Менделеева. Вода выступает не только как растворитель. Она –

активный реагент и катализатор биохимических процессов, приводящих к образованию залежей полезных ископаемых.

Вода играет и "транспортную" роль, вынося из недр земной коры многие радиоактивные изотопы, перенося их вместе с частицами породы на большие расстояния и осаждая взвеси в виде твердых осадков. Вес переносимой водой рек взвеси, в том числе радиоактивных веществ, довольно значителен. Это показано в табл. 6.2. В результате процессов выноса взвешенных материалов и растворенных веществ в воде океанов содержится огромное количество естественных радиоактивных элементов. Так, в воде Тихого океана содержится около  $2.95 \cdot 10^9$  т изотопа  $^{40}\text{K}$ , что соответствует активности примерно  $2 \cdot 10^{10}$  Ки.

Таблица 6.2

## Радиоактивность твердого стока рек

Название реки	Твердый сток, $10^6$ т	Ориентировочная активность твердого стока, Ки
Волга	18	54
Дон	7	21
Дунай	84	246
Янцзы	253.2	760
Миссисипи	380	1140
Инд	446.2	1340

Радиоактивность речной воды обусловлена в основном присутствием  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ , причем содержание  $^{40}\text{K}$  колеблется в пределах от  $1 \cdot 10^{-12}$  до  $16 \cdot 10^{-12}$  Ки/л,  $^{226}\text{Ra}$  от  $2.5 \cdot 10^{-13}$  до  $2.2 \cdot 10^{-12}$  Ки/л. Радиоактивность воды озер зависит от активности воды притоков и питающих озера подземных вод. В северных районах активность воды озер близка к активности воды рек. В южных районах, где сильно испарение воды, имеет место накопление солей и соответственно увеличение активности воды до  $1 \cdot 10^{-10}$  Ки/л и более. В солевых озерах активность достигает  $1 \cdot 10^{-8}$  Ки/л.

Радиоактивность подземных вод в основном обусловлена присутствием  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{222}\text{Rn}$ .

Наименьшей активностью обладают подземные воды в осадочных породах, которые чаще всего используются для водоснабжения населения.

Удельная активность этих вод по  $^{40}\text{K}$  составляет  $2 \cdot 10^{-12}$  Ки/л, по  $^{222}\text{Rn}$   $5 \cdot 10^{-11}$  Ки/л. Наибольшей радиоактивностью обладают радиоактивные минеральные воды. Так, воды курортов Белокурихи, Железноводска содержат до  $1.3 \cdot 10^{-9}$  Ки/л изотопа  $^{222}\text{Rn}$ . Активность морской и океанской воды по  $^{40}\text{K}$  находится в пределах  $(3 - 5) \cdot 10^{-10}$  Ки/л, по  $^{222}\text{Rn}$   $(0.6 - 1.0) \cdot 10^{-12}$  Ки/л.

Большая часть естественных радиоактивных элементов содержится в горных породах, образующих толщу земной коры. Количество радиоактивных элементов в почвах в значительной мере определяется концентрацией радиоактивных веществ в материнской породе.

В южных районах имеет место накопление солей и соответственно увеличение активности воды до  $1 \cdot 10^{-10}$  Ки/л и более.

В солевых озерах активность достигает  $1 \cdot 10^{-8}$  Ки/л.

Почвы, возникшие из продуктов разрушения кислых магматических пород, содержат относительно большие количества урана, радия, тория и калия, чем почвы, образованные из ультраосновных и основных пород. Глинистые почвы за счет высокого содержания коллоидных фракций, хорошо сорбирующих и удерживающих радиоактивные изотопы, богаче радиоактивными элементами, чем песчаные.

В отдельных районах земного шара отмечаются зоны с повышенным содержанием радиоактивных элементов в горных породах и почвах. Такие зоны обнаружены в районах Памира и Тибета, на территориях Бразилии, Индии и Франции. Так, в Индии в штате Керала, на территории которого проживает около 100000 человек, в породе отмечается высокое (до 1 %) содержание тория и его дочерних продуктов. В районах Франции, Памира и Тибета отмечается высокое содержание урана и радия в породах вулканического характера.

#### **6.2.4. Радиоактивность растительного и природного мира**

Все представители растительного и животного мира радиоактивны. Эта радиоактивность обусловлена, в основном, изотопами тех химических элементов, которые активно участвуют в обмене веществ и обеспечивают функционирование всех органов и систем живой материи, например, калий, кальций, углерод, водород, кислород. Среди них наиболее высокую

радиоактивность создают изотопы  $^{40}\text{K}$  и  $^{14}\text{C}$ . Уровень содержания этих изотопов в организмах зависит от накопления стабильных изотопов. Так, например, горох сильно накапливает калий, а потому и удельная радиоактивность у него повышена (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Содержание калия и удельная радиоактивность по  $^{40}\text{K}$   
в некоторых продуктах

Продукт	Содержание калия, %	Удельная активность, $\times 10^{-9}$ Ки/кг
Пшеница	0.5	4.0
Рожь	0.6	4.8
Горох	0.9	7.4
Крупа гречневая	0.13	1.1
Картофель	0.45	3.5
Морковь	0.29	2.3
Лук	0.15	1.2
Огурцы	0.34	2.1
Лимон	0.17	1.14
Клюква	0.15	1.2
Говядина	0.37	2.3
Свинина	0.1	0.9
Рыба	0.26	2.1
Икра	0.42	3.4
Молоко коровье	0.14	1.2
Масло	0.014	0.1

Как следует из табл. 6.3, уровень естественной радиоактивности в основных продуктах питания, вызванный наличием в них изотопа  $^{40}\text{K}$  и  $^{14}\text{C}$ , довольно высок.

Отметим, что калия в растительных организмах по сравнению с его содержанием в земной коре (на единицу массы) меньше в 3 – 10 раз.

Удельная радиоактивность по углероду  $^{14}\text{C}$  растительных и животных организмов по сравнению с  $^{40}\text{K}$  на порядок меньше, а радиоактивность по тритию  $^3\text{H}$  ничтожна.

Другие изотопы, играя вместе со своими родственными стабильными изотопами в процессах обмена веществ незначительную роль, меньше концентрируются в растениях и животных (например,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$ ).

Поэтому их удельная активность невелика и имеет порядок  $10^{-12}$  Ки/кг. Например, в молоке активность по  $^{210}\text{Po}$ , вызванная естественным содержанием этого изотопа, равна  $0.09 \cdot 10^{-12}$  Ки/кг.

Суммарная радиоактивность растений и тканей животных за счет  $\alpha$ -излучателей, к которым относятся  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{210}\text{Po}$  и некоторые другие изотопы, составляет величину порядка  $10^{-11}$  и  $10^{-12}$  Ки/кг соответственно.

Названные естественные радиоактивные изотопы вместе с пищей проникают в организм человека.

### 6.2.5. Радиоактивность человека

Радиоактивность тела человека обусловлена присутствием в организме всех тех радиоактивных изотопов, встречающихся в биосфере, активным агентом которой человек является. Представление о наличии наиболее распространенных радиоактивных изотопов дает табл. 6.4.

Таблица 6.4

Содержание естественных радиоактивных изотопов  
в теле человека

Радиоактивный изотоп	Содержание радиоактивного изотопа, кг	Радиоактивность, Ки
$^{40}\text{K}$	$8.3 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-7}$
$^{14}\text{C}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$8.9 \cdot 10^{-8}$
$^3\text{H}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$7.6 \cdot 10^{-11}$
$^{238}\text{U}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1.1 \cdot 10^{-11}$
$^{238}\text{U}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$7.9 \cdot 10^{-12}$
$^{238}\text{U}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$2.4 \cdot 10^{-10}$

Радиоактивность человека, конечно, в первую очередь создается теми изотопами, которые присутствуют в биосфере и обуславливают радиоактивность растений и животных.

Эти изотопы – калий  $^{40}\text{K}$ , углерод  $^{14}\text{C}$  и тритий  $^3\text{H}$ . Названные изотопы вместе со своими стабильными изотопами обязательно входят в состав живых структур, и без них невозможно существование организма.

Суммарное содержание калия в организме взрослого человека (массой 70 кг) составляет 0.19 % (130 г).

Особенно богаты калием ткани и органы, обладающие высокой функциональной активностью (табл. 6.5).

К их числу относятся скелетная мускулатура, нервная ткань, сердце, печень, селезенка и др.

Основным "потребителем"  $^{40}\text{K}$  в организме является мышечная ткань. Ввиду того, что  $^{40}\text{K}$  встречается в природе в смеси со стабильными изотопами в количестве 0.0019 %, удельная радиоактивность органов и тканей тела человека по  $^{40}\text{K}$  определяется содержанием в них стабильного изотопа.

Как показали исследования, содержание калия, а следовательно и  $^{40}\text{K}$  в организме человека зависит от пола, возраста, массы тела, характера мышечной деятельности и т.д.

Таблица 6.5

Содержание калия в отдельных органах и тканях человека

Орган или ткань	Содержание калия, %	Удельная радиоактивность, $\times 10^{-9}$ Ки/кг
Мышцы	0.300	2.9
Головной мозг	0.330	2.4
Печень	0.215	1.7
Легкие	0.150	1.2
Жировая ткань	0.060	0.5
Костная ткань	0.061	0.5

У мужчин содержание калия обычно выше, чем у женщин; большое содержание калия обнаруживается у лиц, выполняющих тяжелую физическую работу.



Напротив, снижение содержания калия в мягких тканях сопровождается дистрофическими изменениями. Общее содержание углерода в теле взрослого человека примерно равно 12,6 кг. Учитывая равномерное распределение углерода в тканях, можно считать, что удельная радиоактивность их по  $^{14}\text{C}$  составляет  $1.4 \cdot 10^{-9}$  Ки/кг.

Количество трития в организме практически постоянно и определяется содержанием стабильного изотопа водорода (около 10,2 % в мышцах и 6,4 % в костях). Удельная активность мягких тканей человека за счет трития  $^3\text{H}$  составляет  $1.5 \cdot 10^{-11}$  Ки/кг, а костей –  $0.92 \cdot 10^{-11}$  Ки/кг.

В организме человека присутствуют и другие изотопы. Наиболее всего изучено распределение в организме радия. Этот элемент, как и кальций, накапливается преимущественно в костях.

Количество радия в организме в целом по различным оценкам находится в пределах от  $0.48 \cdot 10^{-13}$  до  $4.8 \cdot 10^{-13}$  кг, что обуславливает удельную активность порядка  $10^{-12}$  Ки/кг. Больше всего радия накапливается в костной ткани. Поэтому и удельная радиоактивность костной ткани по радю в 2 – 10 раз больше, чем радиоактивность других органов или частей тела человека.

Основная часть радиоактивного изотопа  $^{210}\text{Pb}$  (до 70 %) содержится в скелете. Удельная активность костной ткани по  $^{210}\text{Pb}$  составляет  $(13 - 110) \cdot 10^{-12}$  Ки/кг.

Следует отметить, что с воздухом в течение суток в легкие человека поступает около  $0.02 \cdot 10^{-12}$  Ки изотопа полония  $^{210}\text{Po}$ , однако **в легкие человека, выкуривающего одну пачку сигарет в сутки, этого радиоактивного изотопа поступает в сто раз больше.**

На долю тория и его  $\alpha$ -активных дочерних продуктов приходится до 40 % от суммарной  $\alpha$ -активности тела человека. Кроме того, некоторое значение в радиоактивности тканей и органов имеют радон, уран и иные изотопы.

Одним из основных источников радиоактивных элементов, поступающих в организм человека, являются пищевые продукты. Вода в этом отношении имеет второстепенное значение.

Таким образом, повсеместно в почве, горных породах, воде, воздухе, растительности, пищевых продуктах и теле человека рассеяны радиоактивные изотопы. Они обуславливают **внешнее и внутреннее** облучение человека.

### 6.2.6. Суммарные дозы внешнего и внутреннего облучения человека от естественных источников

Уровень облучения различных органов и тканей, обусловленный естественным радиационным фоном, является неравномерным.

Для его определения используется эффективная эквивалентная доза. Она приведена в табл. 6.6 для средних широт Земли.

Из этой таблицы следует, что суммарная годовая эффективная эквивалентная доза человека от естественных источников радиации равна 2 мЗв, в том числе от внешнего облучения 0.65 мЗв, а от внутреннего облучения 1.34 мЗв.

Уровни облучения различных органов и тканей естественными источниками радиации в единицах эквивалентной дозы приведены в табл. 6.7.

Таблица 6.6

Годовая эквивалентная эффективная доза  
от различных естественных источников излучения  
для регионов с нормальным радиационным фоном, мкЗв

Источник излучения	Внешнее облучение	Внутреннее облучение	Суммарное облучение
Радионуклиды земного происхождения $^{40}\text{K}$ , $^{87}\text{Rb}$	120	186	306
Радионуклиды семейства $^{238}\text{U}$	90	954	1044
Радионуклиды семейства $^{232}\text{Th}$	140	186	326
В сумме с космическим излучением	650	1341	1991

Таблица 6.7

Годовая эквивалентная доза от естественных источников радиации  
для различных органов человека, мЗв

Облучение	Гонады	Красный костный мозг	Эндост. клетки костной ткани	Легкие
Внешнее	0.63	0.63	0.63	0.63
Внутреннее	0.35	0.49	1.58	6.87
Сумма	0.98	1.12	2.21	7.5

Отсюда также видно, что наибольшему облучению подвергаются легкие (в 7 раз выше, чем гонады и красный костный мозг). Это происходит от вдыхания радона. Следует учесть, что некоторые люди получают большие дозы внутреннего облучения. К ним, например, относятся люди, питающиеся мясом северных оленей, для которых доза облучения увеличивается более чем в 100 – 1000 раз.

### 6.3. Искусственные источники радиации

Искусственная радиоактивность проявляется в результате промышленной, научной и военной деятельности человека. Рассмотрим наиболее значительные из них.

#### 6.3.1. Тепловые электростанции

Большинство тепловых электростанций работает на каменном угле, годовое потребление которого во всем мире составляет несколько миллиардов тонн, причем 70 % угля сжигается в топках электростанций, 20 % – в коксовальных печах, 10 % тратится на отопление.

В каменном угле содержатся естественные радионуклиды, в том числе:  $^{40}\text{K}$  – 50 Бк/кг (или  $1.4 \cdot 10^{-9}$  Ки/кг),  $^{232}\text{Th}$  и  $^{238}\text{U}$  – по 20 Бк/кг ( $5.4 \cdot 10^{-10}$  Ки/кг). В последнем случае приводятся усредненные значения.

В золе угля содержание нуклидов возрастает на порядок.

Рассеиваясь в атмосфере вместе с летучей фракцией золы, радионуклиды становятся источником дополнительного облучения. В районах расположения ТЭС верхний слой почвы обогащен радионуклидами  $^{232}\text{Th}$ ,

$^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ . Отмечено, что за последние 80 лет наблюдается 50-кратное увеличение концентрации  $^{226}\text{Ra}$  в промышленных центрах. Подсчеты показали, что средняя индивидуальная годовая доза облучения в районе расположения ТЭС мощностью 1 млн кВт в зависимости от степени очистки выбросов золы изменяется в пределах (6 – 60) мкЗв, что составляет (0,3 – 3) % дозы естественного фона. Представление о других источниках можно получить из табл. 6.8.

Таблица 6.8

Годовая коллективная эффективная эквивалентная доза, создаваемая естественными радионуклидами в различных областях производства

Область производства	Доза, чел-Зв
Сжигание угля: на электростанциях	2000
в жилых домах	10000
Сжигание: нефти на электростанциях	100
природного газа на электростанциях	3
Использование: фосфатных удобрений	7000
фосфогипса в жилых домах	600000

### 6.3.2. Испытания ядерного оружия

С 1945 по 1980 годы в атмосфере было произведено 450 атомных и термоядерных взрывов. При этом 90 % мощности всех взрывов было реализовано в 1952 – 1962 годах.

В результате атомного взрыва возникает сложная смесь продуктов деления из 200 различных изотопов 36 различных химических элементов, периоды полураспада которых лежат в пределах от 1с ( $^{144}\text{Xe}$ ) до  $1.7 \cdot 10^7$  лет ( $^{129}\text{I}$ ).

За время испытаний ядерного оружия в биосферу поступило следующее количество долгоживущих продуктов:

$$^3\text{H} - 2.4 \cdot 10^{20} \text{ Бк}, \quad ^{14}\text{C} - 2.2 \cdot 10^{27} \text{ Бк}, \quad ^{90}\text{Sr} - 6 \cdot 10^{17} \text{ Бк}, \quad ^{95}\text{Zr} - 1.4 \cdot 10^{20} \text{ Бк}, \\ ^{106}\text{Ru} - 1.2 \cdot 10^{19} \text{ Бк}, \quad ^{137}\text{Cs} - 9.1 \cdot 10^{17} \text{ Бк}, \quad ^{144}\text{Ce} - 3 \cdot 10^{19} \text{ Бк}, \quad ^{239}\text{Pu} - 6.5 \cdot 10^{15} \text{ Бк}$$

Отметим, что трития, углерода и цезия поступило значительно больше, чем имеется в природе. Особая роль здесь принадлежит цезию-137. Рассмотрим его свойства подробнее.

**Цезий  $^{137}\text{Cs}$ .** Цезий – химический элемент 1 группы таблицы Менделеева. Его относительная атомная масса 132.91;  $Z = 55$ .

Температура плавления  $28.5\text{ }^\circ\text{C}$ , плотность  $1.873\text{ г/см}^3$ . По ионному радиусу **Cs** ближе всего к таким щелочным металлам, как рубидий **Rb** и калий **K**. Атомы **Cs** и **Rb** могут заменять атомы **K** в кристаллической решетке минералов калия и в биологических системах. Цезий **Cs** относится к группе редких элементов. В земной коре его содержание не превышает  $7 \cdot 10^{-4}$  массовых процентов. В очень незначительных количествах он содержится всюду, в том числе в продуктах питания животного и растительного происхождения, в теле человека (содержание его здесь 1.5 мг). Цезий имеет 35 изотопов с массовыми числами 114 – 148; из них 34 изотопа являются  $\beta$ -радиоактивными и распадаются, а лишь один стабилен. Среди них наиболее примечателен  $^{137}\text{Cs}$  с периодом полураспада  $T = 30.17$  лет.

Природный **Cs** практически весь является продуктом спонтанного деления  $^{238}\text{U}$ . За время существования Земли ( $\sim 5 \cdot 10^9$  лет) в земной коре распалось около 35 млн тонн  $^{238}\text{U}$ , в результате чего образовалось громадное количество радиоактивных продуктов деления. В земной коре установилось равновесие между распадающимися радионуклидами и вновь рождающимися за счет распада  $^{238}\text{U}$ .

За год, согласно оценкам геофизиков, во всей земной коре образуется такое количество продуктов деления, которое эквивалентно продуктам деления, возникающим при взрыве одной атомной бомбы небольшой мощности.

И все "земные" радионуклиды равномерно распределены по земной коре. Расчеты показали, что равновесное содержание  $^{137}\text{Cs}$  природного происхождения в земной коре составляет 60 ПБк, а в верхнем однометровом слое земли содержится 0.8 ТБк  $^{137}\text{Cs}$ .

Как показали исследования, среднее содержание  $^{137}\text{Cs}$  на территории бывшего СССР составляло  $3.4\text{ кБк/м}^2$ . На этом фоне наблюдались значительные всплески загрязнения по  $^{137}\text{Cs}$ : наибольшие уровни загрязнения территории характерны для широтного пояса  $50\text{-}60^\circ$  северной широты; к северу и к югу от этого пояса уровень загрязнения уменьшался.

В 1963 году, которому предшествовали весьма сильные испытания ядерного оружия, годовая эквивалентная доза внешнего облучения на открытой местности достигала 0.66 мЗв, что в 2 раза больше естественного радиационного фона на открытой местности.

В эти годы резко возросло содержание радиоактивных нуклидов в продуктах питания. Динамика изменения их приведена в табл. 6.9 на примере изотопа  $^{137}\text{Cs}$ .

Таблица 6.9

Содержание  $^{137}\text{Cs}$ , ( $\times 10^{-12}$ ) Ки/кг (или Ки/л)  
в некоторых продуктах питания в СССР в 1963 – 1973 гг.

Год	Хлеб пшеничный	Говядина	Молоко	Рыба пресноводная	Картофель	Капуста
1963	250	290	210	90	63	55
1964	220	350	160	110	65	70
1965	175	250	73	900	68	57
1966	95	210	56	680	34	32
1967	53	136	38	604	25	23
1968	28	79	30	380	18	13
1969	19	44	20	143	16	12
1970	24	56	23	138	18	12
1971	25	56	27	139	15	9
1972	17	43	21	72	11	13
1973	15	28	18	76	11	10

### 6.3.3. Облучение в медицине

В настоящее время облучение населения в медицинских целях дает наибольший вклад в дозу облучения по сравнению с другими искусственными источниками излучения. В некоторых странах уровень облучения при медицинских процедурах достигает естественного радиационного фона. В первую очередь, речь идет о рентгенодиагностике. В различных странах число рентгенодиагностических обследований на 1000 человек колеблется от 300 до 900. В СССР в среднем на одного человека приходилась одна рентгенодиагностическая процедура. В табл. 6.10 приводится сравнение доз человека от различных источников облучения.

Дозы, полученные населением бывшего СССР  
от различных источников в течение года неаварийного облучения

Источники излучения	Доза, мЗв
1. Естественный природный фон в среднем (колебания фона)	2.0 (0.7 – 13)
2. Медицинская рентгенодиагностика в среднем (колебания)	1.5 (0.03 – 6)
3. Строительные материалы (кирпич, гранит, бетон и др.) в среднем (колебания)	1.0 (0.5 – 1.5)
4. Дополнительные источники облучения	0.11 – 0.16
в том числе:	
- телевидение (4 часа в день)	0.01
- ТЭС (1 МВт) на угле в радиусе 20 км	0.006 – 0.06
- АЭС (все действующие, 12 ГВт)	0.00017
- полеты на высоте 12 км	0.005
- глобальные осадки от испытаний ядерного оружия	0.025
(в т.ч. к концу 2000 года)	0.08 – 0.088
прочие	0.005-0.006

## 7. ВЛИЯНИЕ РАДИАЦИИ НА ЖИВОЙ ОРГАНИЗМ

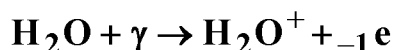
Облучение – мощный фактор воздействия на неорганические и органические вещества, что приводит к изменению большинства физических, химических и механических характеристик веществ, особенно четко проявляющееся в сложных по составу и структуре металлах и сплавах и молекулярных соединениях. Об этом говорилось в главе 4. Однако наиболее "легко" радиация воздействует на живой организм, который по своей структуре состоит из большого числа различных молекул.

### 7.1. Механизм действия радиации

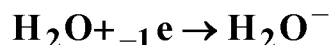
Облучение биологических объектов, состоящих из различных молекул, происходит на различном уровне, по различным механизмам.

Один из них заключается в следующем. Известно, что в биологической ткани 70 % массы приходится на воду. Поэтому влияние радиации на биологический объект является опосредствованным, сказываясь прежде всего на изменении свойств воды.

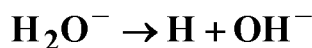
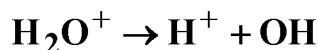
Влияние радиации, например,  $\gamma$ -квантов, на молекулу воды начинается следующей реакцией



Здесь образуется положительный молекулярный  $\text{H}_2\text{O}^+$  и электрон  ${}_{-1}\text{e}$ , которые продолжают цепи реакций



Здесь образуется отрицательный молекулярный ион  $\text{H}_2\text{O}^-$ . Возникающие ионы воды в свою очередь распадаются с образованием радикалов



Далее возможна следующая цепочка превращений







Таким образом при облучении создается высокая удельная концентрация молекул и радикалов  $\text{HO}_2$ ,  $\text{H}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{OH}$ , многие из которых обладают высокой окислительной способностью.

Возникшие радикалы и молекулы взаимодействуют с другими растворенными молекулами различных соединений (белка, ферментов), образуя вторичнорадикальные продукты, что приводит к изменению биохимических процессов в организме.

Облучение, естественно, и непосредственно действует на другие сложные молекулы – на липиды, сахара, полисахариды и т.д., вызывая появление органических кислот, формальдегидов, перекисей, нарушая различные процессы обмена, кинетики клеточного деления, многих сторон жизнедеятельности органов и систем.

Никакой другой вид энергии (тепловой, электрической, звуковой и т.д.), поглощенной биологическим объектом, не приводит к таким изменениям, какие вызывает радиация. Например, смертельная доза радиоактивного облучения в 6 Гр для человека соответствует поглощенной энергии 6 Дж/кг. Если эту энергию подвести в виде тепла, то она нагрела бы тело на 0.001 °С (или стакан воды на 0.5 °С).

**Таким образом, облучение является спусковым механизмом, нарушая не только структуру сложных молекул, но и весь сложный процесс взаимодействия биологических систем организма, ведя к нарушениям в клеточной структуре биологической ткани. Это может вызвать нарушение кинетики клеточного деления, взаимодействия клеток, изменения их генетического аппарата или гибель. Если в генетическом аппарате половых желез происходят стойкие изменения, то в результате могут возникнуть генетические изменения (мутации) у потомства. Генетические изменения заключаются в следующем.**

Известно, что основным структурным элементом ядра клетки являются хромосомы. Основу строения хромосомы составляет молекула дезоксирибо-нуклеиновой кислоты (ДНК), где заключена вся наследственная информация.

Отдельные участки ДНК, так называемые гены, ответственны за формирование какого-либо элементарного признака. Гены расположены в хромосомах в строго определенном порядке. Каждому организму присущ вполне определенный набор хромосом в каждой клетке. В частности, в каждой клетке человека содержится 23 пары хромосом. При делении клетки хромосомы удваиваются и в определенном порядке располагаются в дочерних клетках. Это обеспечивает передачу идентичных свойств от клетки к клетке.

Хромосомы, состоящие из таких огромных молекул, как ДНК, являются радиационно-чувствительным структурным элементом. Ионизирующее излучение вызывает "поломку" хромосом, разорванные концы которых часто соединяются в новых сочетаниях. Это приводит к изменению генного аппарата, т.е. к образованию дочерних клеток, не идентичных с исходными. У потомства появляются особи с другими признаками. Таким образом, облучение организма проявляется в двух аспектах: физико-химическом (он происходит на атомарном уровне – это ионизация и возбуждение) и биологическом (он происходит на молекулярном уровне – это перестройка молекул). Это сопровождается изменением всех процессов взаимодействия систем, например, процессов обмена.

## **7.2. Действие радиации на многоклеточный организм**

Как правило, существует определенная зависимость между степенью, уровнем развития организмов и их чувствительностью к радиоактивному облучению. Так, одноклеточные организмы значительно устойчивее, чем многоклеточные; особо высокой чувствительностью к радиации обладают млекопитающие.

Причины различной чувствительности живых организмов к радиации (табл. 7.1) до сих пор не выяснены. Здесь играет определенную роль температура тела, как показатель сложности строения организма.

Так, у хладнокровных организмов по сравнению с теплокровными организмами медленнее проходят процессы обмена и ниже температура тела, поэтому хладнокровные менее чувствительны к воздействию ионизирующих излучений. В некоторых организмах присутствуют повышенные концентрации веществ, обладающих защитными свойствами. Так, у насе-

комых присутствуют высокие уровни содержания каталазы, расщепляющей перекиси. У раков определенным защитным действием обладают аминокислоты, амины и мелкие полипептиды. Имеются и иные факторы, влияющие на различную радиочувствительность организмов (число хромосомных наборов, количество ДНК и др.).

Таблица 7.1

## Чувствительность некоторых организмов к радиации

Класс	Представитель	Облучение, Гр	Эффект
Простейшие	Амеба	1000	ЛД <sub>50</sub>
Ракообразные	Дафния	65	ЛД <sub>100</sub>
Рыбы	Карась	15	ЛД <sub>50/30</sub>
Земноводные	Лягушка	7	ЛД <sub>50/30</sub>
	Тритон	30	ЛД <sub>50/30</sub>
Пресмыкающиеся	Черепаша	15	ЛД <sub>50/30</sub>
Птицы	Куры	6 – 8	ЛД <sub>50/30</sub>
Млекопитающие	Кролик	8	ЛД <sub>50/30</sub>
	Крыса	6	ЛД <sub>50/30</sub>
	Обезьяна	5.5	ЛД <sub>50/30</sub>
	Человек	4.5	ЛД <sub>50</sub>

В качестве критерия радиочувствительности выбран параметр ЛД<sub>50/30</sub> (летальная доза) – гибель 50 % особей на 30-й день наблюдения или параметры ЛД<sub>50</sub> и ЛД<sub>100</sub> – гибель 50 и 100 особей в течение времени наблюдения.

Кроме выше названных имеются и другие факторы, обуславливающие различную чувствительность организмов к радиации.

### 7.3. Особенности действия радиации на человека

Весовой состав человека принимается следующим (в %): водород 10,1; углерод 11,1; азот 2,6; кислород 76,2.

Изменения в организме под действием радиации могут проявиться в виде клинических эффектов либо через сравнительно короткий промежуток времени после облучения (несколько часов, дней) – это острые лучевые поражения, либо через длительный промежуток времени (через несколько

лет или десятилетий) – это последствия. Кроме того, в организме может произойти нарушение структурных элементов, ответственных за наследственность, – эти изменения могут быть не замечены для данного индивидуума.

Поэтому при оценке опасности облучения радиационные эффекты принято делить на соматические и генетические.

**Соматические изменения** – те изменения в состоянии здоровья, которые произошли у данного индивидуума в результате облучения.

**Генетические изменения** проявляются в последующих поколениях.

Соматические изменения проявляются в виде острой или хронической лучевой болезни, локальных лучевых повреждений отдельных органов или тканей, а также в виде отдаленных реакций организма на облучение. При этом устанавливается связь между уровнем облучения и реакцией организма.

При дозе свыше 6.0 Гр развивается **крайне тяжелая форма лучевой болезни**. Через 2 – 4 часа проявляются сильные изменения в составе крови, почти полностью исчезают лейкоциты. Смерть наступает в 100 % случаев чаще всего по причине кровоизлияний и инфекционных заболеваний.

При дозе 4.0 – 6.0 Гр развивается **тяжелая форма лучевой болезни**. Летальный исход в 50 % случаев.

При дозе 2.5 – 4.0 Гр возникает **лучевая болезнь средней тяжести**. Летальный исход в 20 % случаев через 2 – 6 недель после облучения.

При дозе 1.5 – 2.0 Гр наблюдается **кратковременная форма лучевой болезни**. Она проявляется в виде выраженной, продолжающейся длительное время лимфопении. Смертельные исходы отсутствуют.

При дозе до 0.25 Гр **какие-либо изменения в состоянии здоровья непосредственно не обнаруживаются**. Нет и изменений в составе крови, которая прежде всего реагирует на облучение.

Приведенные данные относятся к случаям, когда отсутствует лечение. При надлежащем лечении в ряде случаев выздоравливали после получения дозы около 10 Гр.

В случае систематически повторяющегося облучения, когда доза облучения ниже тех, которые вызывают острую лучевую болезнь, но значительно больше предельно допустимых, может развиваться хроническая лучевая болезнь.

Наиболее характерными признаками хронической лучевой болезни являются изменения в составе крови (уменьшение числа лейкоцитов, малокровие) и ряд симптомов со стороны нервной системы.

У живых организмов, в том числе и у человека, имеются релаксационные, восстановительные функции, способные нормализовать нарушение системы и функции жизнедеятельности. Процессы восстановления идут на всех уровнях. На молекулярном уровне вновь синтезируются распавшиеся жизненно важные молекулы ферментов ДНК, РНК. На клеточном уровне восстанавливается часть разрывов хромосом, структура межклеточных мембран, выводятся и нейтрализуются токсины. Восстанавливаются поврежденные ткани.

Сущность процессов восстановления еще до конца не понята. Поэтому ясно, что острота протекания лучевой болезни зависит от времени получения дозы, от того, дробно она получается или непрерывно, растянута она во времени или получается кратковременно.

Чувствительность разных органов и тканей организма человека к облучению неодинакова.

Красный костный мозг и другие элементы кроветворной системы наиболее уязвимы и теряют способность нормально функционировать уже при дозах облучения 0.5 – 1 Гр (к счастью, они обладают способностью к регенерации). Репродуктивные органы и глаза также отличаются повышенной чувствительностью к облучению. Уже однократное облучение дозой 0.1 Гр может привести к временной стерилизации. Большинство тканей взрослого человека относительно мало чувствительны к действию радиации.

Почки выдерживают суммарную дозу около 23 Гр, полученную за 5 недель; печень – по меньшей мере 40 Гр за месяц; мочевой пузырь – 55 Гр за месяц; зрелая хрящевая ткань – до 70 Гр. Легкие гораздо более уязвимы. Помутнение хрусталика глаз наступает при дозах менее 2 Гр, далее возможна прогрессирующая катаракта.

Крайне чувствительны к облучению дети. У них возможно влияние радиации даже на костные ткани с последующими пороками в развитии скелета или вообще прекращением какого-либо развития скелета.

#### 7.4. Влияние малых доз радиации на здоровье человека

Отсутствие порогового уровня при действии радиации не исключает существования приемлемого по опасности для общества уровня облучения. Особое внимание именно к малым дозам радиации понятно: общество интуитивно защищается от возможных опасностей, и линия этой защиты выражается в установлении приемлемых уровней облучения – норм радиационной безопасности. Эти нормы отражают уровень общественного понимания и ощущения опасности. Значительное количество расчетов и нормативных ограничений по влиянию малых доз радиации получено по результатам наблюдения за жителями Хиросимы и Нагасаки в Японии, пережившими атомную бомбардировку (рис. 9). Основные проявления действия радиации после чернобыльской катастрофы: раннее появление рака щитовидной железы, появление рака в более молодом возрасте, физиологические расстройства (нарушение работы щитовидной железы), сердечно-сосудистые заболевания, аллергии, нарушения иммунной системы, хронические заболевания дыхательных путей. Выяснилось также, что действие радиации на здоровье может зависеть от его продолжительности: одна и та же доза радиации, получаемая за короткий промежуток времени, вызывает меньшие поражения, чем доза, полученная за длительный период.



Рис. 9. Вероятность заболевания людей, перенесших атомную бомбардировку

Недавно на основании наблюдений в Челябинске-65 (ПО "Маяк") было выяснено, что дети матерей, получивших во время беременности сравнительно небольшие дозы (около 0.05 Зв), имели устойчивые отклонения в соотношении роста, объема грудной клетки и веса. В табл. 7.2 приведена общая схема влияния средних и малых доз радиации на организм человека.

Таблица 7.2

Общая схема влияния средних и малых доз радиации на организм человека

Доза на вес тела, Гр	Немедленный результат	Отдаленный результат
0.1 – 0.5	У большинства нет реакции У радиочувствительных развивается лучевая болезнь	Поражение лимфоцитов и нейтрофилов. Преждевременное старение. Генетическое поражение потомства. Увеличение риска возникновения рака
До 0.1	Нет реакции	Увеличение числа небольших мутаций (связанных с астмой, аллергиями и т.п.) в потомстве. Дополнительный риск возникновения рака. Возникновение уродств в потомстве

Эта информация соответствует фактам большей радиочувствительности ранних стадий развития организма.

В табл. 7.3. представлены расчетные данные по влиянию дозы облучения на возникновение лейкемии (рака крови) в зависимости от возраста облучения (по данным жителей Хиросимы и Нагасаки, переживших атомные бомбардировки). Из этих данных видно, что вероятность заболеть раком крови при облучении эмбриона или плода еще в утробе матери в четыре раза выше, чем при таком же уровне облучения молодого человека в возрасте 11 – 24 лет. Вероятность для малыша родиться с каким-либо уродством начинается при получении матерью всего лишь 2 мЗв за время беременности на область живота.

Таблица 7.3

Вероятность развития лейкемии (рака крови) в зависимости от возраста облучения

Возраст облучения	Вероятность лейкемии на дозу в 1 Зв
В утробе матери	1.25 %
До 10 лет	0.65 %
11 лет – 24 года	0.35 %

В работе С.П. Ярмоненко указывается, что "... период наибольшей радиочувствительности эмбриона человека... начинается... с зачатия и кончается примерно 38 сутками... Облучение эмбриона человека в период первых двух месяцев ведет к 100 %-ному поражению, в период от 3 до 5 месяцев – к 64 %, в период от 6 до 10 месяцев – к 23 % поражения..." Насколько несовершенны наши знания о приемлемо опасном уровне облучения, показывают изменения научных представлений о безопасной максимальной эквивалентной дозе для профессионалов: 1925 г. – 1560 мЗв/год; 1934 г. – 300 мЗв/год; 1958 г. – 50 мЗв/год; 1990 г. – 20 мЗв/год. Таким образом, за 65 лет дозовый предел уменьшился в 78 раз. Для населения дозовый предел также уменьшился с 15 мЗв/год в 1952 г. до 1 мЗв/год в 1990 г. Сейчас в национальных законодательствах по радиационной безопасности США, ФРГ, России установлен уровень вмешательства 0.3 мЗв/год. Он в основном определяется радиационной безопасностью детей. В табл. 7.4, 7.5 представлены данные о влиянии малых доз радиации на человека. Нижнего безопасного порога действия радиации не существует, но есть приемлемые границы опасности.

Таблица 7.4

Некоторые данные по влиянию малых доз радиации на человека

Доза	Последствия облучения
0.25 Гр	При разовом внешнем облучении временная (на 2 – 6 мес.) – стерильность у женщин; при суммарном облучении за 70 лет – гибель от рака (1 человек из 100)
0.15 Гр	Разовое облучение, красный костный мозг, клинически значимое подавление кроветворения
0.1 Гр	При разовом облучении – нарушения плодовитости мужчин (снижение числа сперматозоидов) на протяжении до 1 года; уродства у новорожденных; аккумулярованная доза за 70 лет – увеличение риска смерти от лейкемии на 22 %
0.04 Гр	Аккумулярованная доза за 30 лет – повышение смертности от разных форм рака в сравнении с необлученным персоналом
0.01 Гр	Улавливаемые существующими методами изменения биохимических процессов в клетке; при использовании йода-131 с диагностическими целями – повышение частоты aberrаций в лимфоцитах; 50 – 350 наследственных аномалий в первом поколении на 1 млн новорожденных
0.002 Гр	За время беременности на область живота матери – порог вероятности возникновения уродств у новорожденного



Анализ результатов измерений на СИЧ накопления цезия-137 в организме детей Чернобыльской зоны Беларуси, нормы радиационной безопасности-96 России, национальные критерии радиационной защиты детей ФРГ, США, Англии и в 4 раза большая дозовая нагрузка детей при одинаковом со взрослыми накоплении цезия-137 в организме указывают, что дозовый предел для детей должен быть установлен 0.25 – 0.3 мЗв/год. Международные нормы радиационной безопасности (1984 г.) и Рекомендации № 60 (1990 г.) Международной комиссии по радиационной защите населения (МКРЗ) установили допустимый дозовый предел 1 мЗв/год или 70 мЗв/за жизнь (рис. 10).

Таблица 7.5

*Примеры влияния малых доз разной мощности при хроническом облучении на организм человека*

Доза	Последствия облучения
0.01 Зв на год	Снижение неспецифической резистентности организма
0.05 Зв на год	На протяжении 5 лет – сокращение продолжительности жизни (среднего человека) на 15 мес.
0.025 Зв на год	У персонала атомного центра в США на треть больше, чем предполагалось, был уровень заболеваемости раком поджелудочной железы, легких, костного мозга и множественной миеломы
0.02 Зв на год (20 мЗв на год)	Ежегодная дополнительная смерть от рака 1 человека из 1250; потеря к 70 годам полгода жизни
0.001 Зв на год (1 мЗв на год)	Потеря 18 дней жизни к 70 годам; допустимый предел дозы искусственного внешнего облучения для населения
0,0001 Зв на год (0,1 мЗв на год)	Допустимый предел дозы искусственного облучения в ряде штатов США
0,00002 Зв на год (0,02 мЗв на год)	Теоретически допустимый предел дозы искусственного облучения для населения

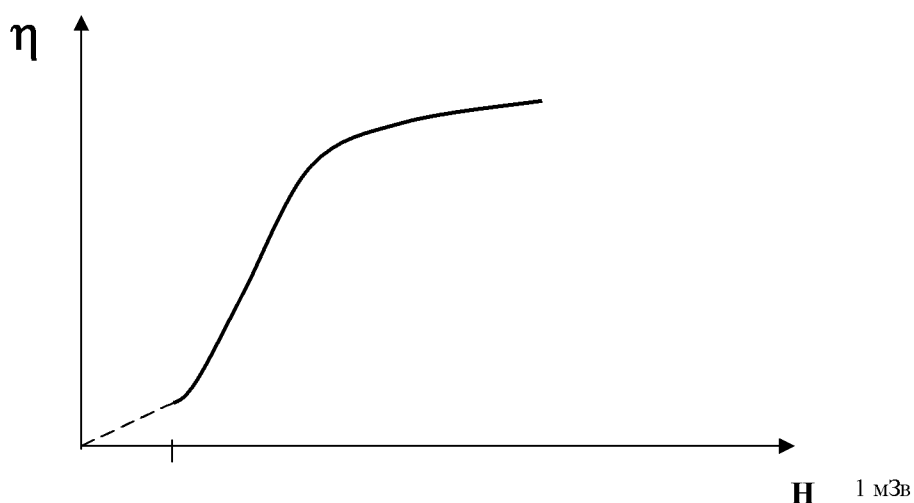


Рис. 10. Доза-эффект

## 8. РАДИАЦИОННАЯ ОБСТАНОВКА В БЕЛАРУСИ ПОСЛЕ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ КАТАСТРОФЫ

26 апреля 1986 г. на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС, расположенной в 12 км от южной границы Беларуси, произошла крупная авария, в результате которой были разрушены реакторный блок и часть здания станции. Катастрофа на четвертом блоке ЧАЭС произошла к концу рабочей кампании активной зоны реактора, когда накопление радиоактивных продуктов деления было максимальным.

В ядерном реакторе при делении ядерного горючего накапливается большое количество изотопов с массовыми числами 80 – 150 и 130 – 150. Из всех изотопов особое внимание следует уделить йоду-131, цезию-134,137, стронцию-90 и плутонию-239. Радиоактивные йод, цезий и стронций растворимы в воде и могут участвовать в пищевой цепочке человека. Йод-131 имеет период полураспада 8.05 дней, цезий-134 – 2.06 года, цезий-137 – 30 лет, стронций – 29.12 лет, плутоний – 24390 лет. Активность радиоактивных изотопов за 10 периодов уменьшается в 1000 раз до безопасных пределов.

В результате аварии и пожара на реакторе в течение 10 суток были выброшены в атмосферу продукты деления, благородные газы, реакторное топливо, графит. Более тяжелые вещества выпали вблизи самой АЭС, а легкие продукты деления в виде радиоактивных облаков были отнесены на север и запад. Самые легкие вещества были подняты на высоту более 1 км, достигли скандинавских стран и включились в глобальную циркуляцию атмосферы. Около 70 % радиоактивных веществ, выброшенных из разрушенного реактора в атмосферу, выпало на территорию Беларуси. При этом 23 % территории РБ оказалось загрязненной цезием-137 более 37 кБк/м<sup>2</sup>. Загрязнение территории Беларуси радионуклидами имеет неравномерный характер. Максимальные уровни загрязнения были обнаружены в 30-километровой зоне вокруг АЭС. Однако и за пределами зоны отчуждения есть участки с высокими уровнями загрязнения. Самыми пострадавшими от чернобыльской катастрофы областями Беларуси являются Гомельская, Могилевская и Брестская.

В первые дни после аварии значительное повышение мощности экспозиционной дозы регистрировалось по всей территории Беларуси. На-

пример, уровни радиоактивного загрязнения короткоживущими радионуклидами йода-131 во многих регионах республики были настолько высокими, что вызванное им облучение миллионов людей определяется специалистами как период "йодного удара". Высокие уровни загрязнения больших территорий Беларуси йодом-131, отсутствие йодной профилактики привели к высоким дозам облучения в первую очередь щитовидной железы, что в дальнейшем обусловило значительное повышение ее патологии.

*Однако радиационная обстановка в первый период после аварии определялась не только йодом-131, но и короткоживущими радионуклидами, такими, как молибден, технеций, лантан, барий, криптон, ксенон. Все это обусловило высокие дозы облучения, которые необходимо учитывать, оценивая величину полученной дозы облучения населением, которое проживает на загрязненных территориях, у людей, эвакуированных из зоны отселения, а также участников ликвидации последствий аварии на ЧАЭС.*

Загрязнение территории стронцием-90 более 5.5 кБк/м<sup>2</sup> было выявлено на 10 % общей площади Беларуси. Загрязнение почвы изотопами плутония более 0.37 кБк/м<sup>2</sup> охватывает 2 % территории республики. Площадь загрязненных цезием-137 сельскохозяйственных угодий с плотностью более 37 кБк/м<sup>2</sup> составляет в республике 1.6 млн. га. Более 260 тыс. га с 1990 г. исключены из пользования в сельскохозяйственном производстве. Радионуклидами загрязнено более 1685 тыс. га лесов республики.

После аварийного выброса значительная часть радионуклидов аккумулировалась в верхнем слое почвы, и теперь почва представляет собой главный источник поступления радионуклидов в сельхозпродукцию.

Радиоактивное загрязнение экосистемы в сочетании с выбросом свинца и нитратами создало условия, при которых на протяжении многих десятилетий невозможно нормальное ведение сельскохозяйственного производства и лесного хозяйства.

В загрязненных зонах и сейчас используются продукты с частных огородов, что является основным источником поступления радионуклидов в организм человека и получения людьми значительных дозовых нагрузок не только от внешнего, но, главным образом, от внутреннего облучения.

### 8.1. Радионуклиды в окружающей среде

По глубине проникновения радионуклидов в почву характерно следующее: суглинистые осушенные торфяники – супесчаные – песчаные.

Независимо от типа почв и характера ландшафтов основная масса цезия-137 сосредоточена в верхнем 5-сантиметровом почвенном слое. Наиболее интенсивно вертикальная миграция протекает в торфяниках, где радиоцезий фиксируется на глубине 25 – 30 см. Пойменные торфяники на глубине до 5 см содержат до 95 % стронция-90 и 94 % цезия-137.

Основная часть радиостронция (51 – 78 %) находится в поверхностных слоях (0 – 1 см), причем 2 – 5 % – растворимы.

*Изотопы плутония-238, 239, 240, обладавая большими периодами полураспада, также являются одними из основных дозообразующих нуклидов.*

Ближайший и долгосрочный прогнозы показывают, что самоочищение почв вследствие вертикальной миграции радионуклидов будет происходить крайне медленно. Ввиду длительного пребывания цезия-137 в пахотном горизонте почвы на десятилетия остается серьезная опасность радиоактивного загрязнения продукции растениеводства за счет корневого и аэрального поступления.

Подземные и грунтовые воды благополучны по радиационной безопасности.

В Беларуси радиоактивному загрязнению цезием-137 подверглось 24,9 % лесов.

Радионуклиды цезия-137 (2 – 10 %) и стронция-90 (50 – 80 %) на сельхозугодьях находятся в легко доступных растениям обменной и водорастворимой формах и в ближайшее время существенного самоочищения корнеобитаемого слоя почв за счет вертикальной миграции радионуклидов не предвидится. Поэтому целесообразны агрохимические меры, направленные на повышение плодородия почв, что ведет к снижению подвижности радионуклидов.

### 8.2. Свинцовое загрязнение во время чернобыльской катастрофы

Известно, что в ходе операций по прекращению работы реактора РБМК в него было сброшено с вертолетов 2400 – 6720 т свинца.

Большая часть этого свинца после его плавления, вскипания и возгонки в горящем реакторе была выброшена в атмосферу. Осаждение этого свинца произошло на значительных территориях вокруг ЧАЭС. Это стало дополнительным загрязнением как окружающей среды, так и жителей этих мест. Такое свинцовое загрязнение является дополнительным фактором, усугубляющим негативное действие радиации на организм.

### **8.3. Источники дозовых нагрузок населения после чернобыльской катастрофы**

Трагедия на Чернобыльской АЭС является крупнейшей радиационной катастрофой в мире. Радиоактивные выбросы после аварии на ЧАЭС достигли многих государств, а на территории Беларуси выпало около 70 % радионуклидов, выброшенных из аварийного реактора. В первоначальный период значительное повышение мощности экспозиционной дозы гамма-излучения регистрировалось практически по всей территории республики. Существенный вклад в дозу облучения дал йод-131. Уровни радиоактивного загрязнения радионуклидами йода-131 регистрировались во всех регионах республики. После радиоактивного распада йода-131 основную часть внешней дозовой нагрузки составлял цезий-134, 137. В настоящее время 70 – 90 % дозовой нагрузки население получает за счет внутреннего облучения при потреблении местных продуктов питания, содержащих цезий-137 выше допустимых уровней.

Коллективная эффективная эквивалентная доза облучения щитовидной железы за счет йода-131 у жителей Беларуси составила примерно 500 – 700 тыс. чел.-Зв. Коллективная суммарная доза облучения, полученная населением от цезия-137, составила приблизительно 200 тыс. чел.-Зв. Причем наибольший вклад в коллективную дозу внутреннего облучения внесли зоны с малой плотностью загрязнения 37 – 185 кБк/м<sup>2</sup>, которые необходимо считать регионами повышенного риска заболеваемости, так как отдаленные последствия воздействия ионизирующей радиации на организм человека пропорциональны суммарной дозе облучения, полученной за весь период облучения с момента аварии на ЧАЭС до настоящего времени.

Законом РБ "О социальной защите граждан, пострадавших от катаст-

рофы на Чернобыльской АЭС" 1990 г. был установлен дозовый предел для населения – 1 мЗв/год.

В настоящее время основной вклад в дозовые нагрузки населения (80 – 90 %) составляют радионуклиды цезия-137, поступающие с продуктами питания. Для обеспечения выполнения требований Закона РБ (1 мЗв/год) целесообразно проведение защитных мероприятий для снижения фактического содержания цезия-137 в молоке до 74 Бк/л, в свинине, птице, рыбе – до 185 Бк/кг, в картофеле и корнеплодах, овощах, фруктах, ягодах – до 74 Бк/кг.

С учетом установленного допустимого уровня содержания цезия-137 в детских продуктах питания (37 Бк/кг) и фактического рациона питания детей дозовый предел для детей должен быть установлен не более 0.3 мЗв/год. В связи с тем, что в семье дети потребляют продукты местного производства и у населения нет экономических возможностей обеспечить детей экологически чистыми продуктами питания, детей следует принимать за критическую группу по дозовым нагрузкам и радиационная защита должна проводиться в тех населенных пунктах, где превышает дозовый предел для детей 0.3 мЗв/год.

## 9. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МЕРАМ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ И ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Значение последствий катастрофы на ЧАЭС, несмотря на все принимаемые меры, не уменьшилось к настоящему времени, а некоторые проблемы еще более обострились. Наблюдается устойчивый рост заболеваемости населения, проживающего на загрязненных территориях. Это связано с большой коллективной дозой, которую население Беларуси получило как в момент аварии, так и продолжает получать в больших размерах за счет потребления загрязненных радионуклидами местных продуктов питания.

Экономический ущерб Беларуси от чернобыльской катастрофы за 1986 – 2015 годы оценивается в 235 млрд. долларов. Республика не в состоянии выделить необходимые финансовые ресурсы на полную программу минимизации последствий чернобыльской катастрофы, не в состоянии обеспечить население экологически чистыми продуктами питания, поэтому идет быстрый набор коллективной дозы облучения всего населения республики.

При оценке радиологических последствий чернобыльской катастрофы основополагающими факторами являются:

- цезий-137 продолжает оставаться в корнеобитаемом слое растений, а следовательно будет долго потенциально доступен для них;
- стронций-90 наполовину перешел в свободную форму, стал легко доступен для растений и в большей степени способен включаться в пищевые цепочки, поступать в организм людей и накапливаться там, увеличивая риск для здоровья;
- при малых дозах радиации и наличии свинца и нитратов их сочетательное действие с повреждающим фактором не просто суммируется, а потенцируется;
- отдаленные последствия воздействия ионизирующей радиации на организм человека определяются суммарной дозой облучения, полученной за весь период облучения с момента аварии на ЧАЭС до настоящего времени.

Главным источником поступления цезия-137 в организм человека является загрязненная выше допустимых уровней пища растительного и

животного происхождения. Основное количество цезия-137 накапливается в мышечной ткани (более 80 %). Достаточно равномерное распределение цезия-137, имеющего высокую радиотоксичность, в организме приводит к относительно равномерному облучению органов и тканей.

Стронций-90 мигрирует по пищевым цепям и накапливается в костной ткани человека. Отложившийся в костной ткани стронций-90 подвергается хроническому облучению костный мозг и органы кроветворения.

В связи с чернобыльской катастрофой особую актуальность приобретает ограничение для населения (особенно для детей) поступления радионуклидов в организм человека с мясными и молочными продуктами.

По степени накопления радионуклидов овощные культуры располагаются в следующем возрастающем порядке: капуста, огурцы, кабачки, томаты, лук, перец сладкий, чеснок, салат, картофель, морковь, свекла, редька, редис, горох, бобы, фасоль, щавель. Из плодово-ягодных культур в большей степени подвержены радиоактивному загрязнению красная и черная смородина, крыжовник, в меньшей степени – земляника садовая, клубника, малина, яблоки, груши, вишня, слива, черешня.

Для снижения поступления радионуклидов в овощи и фрукты как на приусадебных участках, так и в общественном сельскохозяйственном производстве эффективным является внесение минеральных и органических удобрений (калийных, фосфорных), известкование кислых почв.

### **9.1. Выведение радионуклидов из пищевых продуктов при технологической и кулинарной их обработке**

Сотрудники Института морфологии и экологии животных им. А.М. Северцева разработали способы частичной очистки от радионуклидов мяса, рыбы, грибов и овощей. Аналогичные рекомендации по выведению радионуклидов из пищевых продуктов при технологической и кулинарной их обработке дает Организация по продовольствию и сельскому хозяйству ООН (ФАО).

В вареном мясе (говядина, свинина, баранина и др.) остается 40 % радионуклидов от содержащихся в исходном свежем мясе, в бульоне остается 60 % от содержащегося в исходном мясе цезия-137. В вареной рыбе остается 70 % цезия-137, а в ухе (бульоне) – до 90 %. **Соли радиоцезия**



**имеют тенденцию оставаться в водной фазе.** Поэтому переработка молока является эффективным способом снижения содержания радионуклидов в конечных молочных продуктах. В исследованиях установлено, что радионуклиды цезия и стронция не связаны с жировой фазой молока. Отсюда, перерабатывая молоко на жирные молочные продукты (сливки, масло), можно существенно снизить поступление радионуклидов в пищевую цепочку.

При переработке молока на сливки переход цезия-137 составляет 4.5 – 10 % (среднее 7.5 %), на масло 0.2 – 1.0 % (среднее 0.5 %). При сепарировании молока в сливки даже в производственных условиях переходило до 2.7 – 5.2 % стронция-90. Получение на сепараторе из молока сливок и последующее разбавление их чистой кипяченой водой – эффективный способ уменьшения содержания цезия-137 в детских продуктах питания. В пахте при этом остается 95 % цезия-137 и 93 % стронция-90 и такой продукт надо исключать из откорма свиней, птицы.

При переработке молока в сыры содержание цезия-137 снижается при сычужном сбраживании до 1 – 5 %, при молочнокислом сбраживании – до 10 – 12 %, Конечно, практически все радионуклиды остаются в сыворотке. Естественно, такую сыворотку нельзя использовать для приготовления блинов и др.

Топленое масло не содержит радионуклидов.

Очистка от радионуклидов фруктов, овощей и круп весьма эффективна.

Картофель освобождают от радионуклидов вымачиванием в течение 3 – 4 часов в слегка подсоленной воде, при этом выводится до 40 % радионуклидов.

Тушение очищенной моркови снижает содержание в ней цезия-137 на 50%.

Тушение очищенной свеклы снижает содержание в ней цезия-137 до 30 %.

Консервирование снижает содержание цезия-137 в шпинате и капусте до 20 %, тушение помидор – до 50 %, очистка, промывка, кипячение лука – до 50 %.

Соление, маринование огурцов снижает содержание цезия-137 до 15 %, консервирование – до 6 % от исходного.

Основная часть активности грибов может быть выведена при варке в 2 %-ном растворе соли (до 20 %), при вымачивании как свежих, так и сухих грибов в таком же солевом растворе – до 10 – 20 %, при обваривании кипятком – до 10 – 40 %.

Помол зерна пшеницы в белую муку снижает содержание цезия-137 до 20 – 80 % от исходного, в темную муку – до 5 – 10 % (стронция-90 – до 10 – 20 %), в манную крупу – до 15 – 50 %. Помол зерна ячменя в белую муку снижает содержание цезия-137 до 20 – 60 %, помол зерна овса в белую муку – до 40 %.

## **9.2. Декорпорация радионуклидов из организма человека**

Известно, что последствия воздействия ионизирующей радиации на организм человека определяются суммарной дозой облучения, полученной с момента аварии на ЧАЭС до настоящего времени. Масштабы последствий облучения можно уменьшить только минимизацией коллективной дозы облучения за счет мер радиационной защиты.

В настоящее время 80 – 90 % дозовой нагрузки население получает при потреблении местных продуктов питания, загрязненных радионуклидами цезия-137 выше допустимых уровней.

Известно, что дети являются наиболее облучаемой частью населения (критической группой), поскольку обладают большой радиочувствительностью, как растущие организмы, а особенности их обменных процессов и структур питания создают условия накопления значительных количеств цезия-137 в организме. При одинаковых со взрослыми уровнях накопления дети получают более высокие дозы облучения (в 3 – 4 раза).

Радикальными мерами помощи детям, проживающим в загрязненных радионуклидами районах, является предоставление чистых продуктов питания, предотвращение поступления в организм радиоактивных элементов, а также широкое применение новых средств и методов сорбционной терапии, обеспечивая выведение из организма детей ранее накопленных радионуклидов.

Существуют три барьера защиты здоровья человека от радиации:

- осуществление защитных мер в цикле сельскохозяйственных технологий, направленных на снижение перехода радионуклидов из почвы в

растение (окультуривание пастбищ и сенокосов, внесение минеральных удобрений, известкование почв на сельхозугодьях и т.д.);

– снижение содержания цезия-137 в основном дозообразующем продукте – молоке за счет скармливания коровам молочного стада комбикормов с сорбентами;

– обеспечение детей, беременных женщин (группа повышенного риска) чистыми продуктами и пищевыми добавками, повышающими общую резистентность и антиканцерогенную устойчивость организма и ускоряющими выведение радионуклидов, тяжелых металлов и нитратов из их организма.

Очищение организма от радионуклидов идет через почки и желудочно-кишечный тракт. Время выведения из организма половины всего цезия-137 у взрослого человека составляет 100 – 150, у детей 15 – 90 дней (в зависимости от возраста ребенка). Процесс выведения радионуклидов из организма можно существенно ускорить, применяя энтеросорбенты в виде пищевых добавок на основе пектинов. Очищение организма идет успешнее, если регулярно пить овощные и фруктовые соки, особенно с мякотью, употреблять ягоды и фрукты, содержащие пектиновые вещества: яблоки, лимоны, мандарины, апельсины (с цедрой), слива, персики, абрикосы, крыжовник, клюква, черника, смородина, груша, вишня, черешня, дыня, арбуз. Пектины содержатся в зефире, пастиле, мармеладе.

Высокую эффективность по ускоренному выведению радионуклидов, тяжелых металлов, нитратов, пестицидов из организма человека показало применение пищевых добавок – пектиновых препаратов, изготавливаемых в Белоруссии ("Витапект"), Германии ("Медетопект"), США ("Спирулина"), Украине ("Яблопект"), с комплексом поливитаминов и микроэлементов.

Имеется заключение Минздрава Республики Беларусь о высокой эффективности такой профилактики и разрешение на применение пектиновых препаратов в качестве пищевых добавок.

При установлении накопления цезия-137 в организме и выработке стратегии вывода радионуклидов надо иметь в виду, что время его полувыведения из организма составляет: для ребенка в возрасте 1 год – 14 дней, 5 лет – 21 день, 10 лет – 40 дней, 15 лет – 90 дней, для молодого человека 20 лет – 100 дней.

Пищевая добавка – пектиновый препарат обладает антидотными, антиоксидантными и радиопротекторными свойствами для обезвреживания и

выведения токсикантов, содержит витамины и другие вещества, благотворно влияет на функции кроветворения, мозгового кровообращения, сердечно-сосудистой системы, работу желудочно-кишечной системы, печени, способствует нормализации обмена веществ, повышению иммунитета и профилактики сердечно-сосудистых, аллергических и онкологических заболеваний. Наличие в пектиновых веществах свободных карбоксильных групп гелактуроновой кислоты обуславливает их свойство связывать в желудочно-кишечном тракте ионы металлов (свинец, ртуть, кадмий, цинк, хром, никель и их соединения), а также радиоактивный стронций, цезий, цирконий и др. с последующим образованием нерастворимых комплексов (пектинаты, пектаты), которые не всасываются и выводятся из организма. При применении пектиновых препаратов выявлена высокая эффективность очищения от тяжелых металлов (свинец, никель).

Поскольку пектиновые вещества представляют собой природные органические соединения – полисахариды, то и содержатся они в различных количествах в плодах, овощах, корнеплодах. Наиболее богаты пектинами яблоки, свекла столовая, морковь, перец, тыква, баклажаны, айва, вишни, сливы, груши, цитрусовые, ягоды.

Высоким содержанием пектинов характеризуются также фруктовые и овощные соки с мякотью (яблочный, морковный, яблочно-клюквенный, айвовый, персиковый, томатный), фрукты и ягоды, протертые с сахаром и его заменителем (яблоки, клубника, крыжовник, слива, смородина). Рекомендуются фруктовые пюре, напитки, кисели, сиропы, мармелад, драже, желе.

*Клиническое изучение эффективности пектиносодержащих препаратов показало, что они стимулируют ускоренное выведение радионуклидов из организма в среднем по гамма-спектру до 28.5 %, снижают содержание солей тяжелых металлов в среднем до 35 %, восстанавливают деятельность клеток организма, получивших радиационное повреждение, благодаря наличию в них антиоксидантов. Их применение препятствует старению клеток, развитию атеросклероза, защищает от разрушения и блокирует синтез опасных для организма лейкотриеновых веществ, вызывающих воспаление.*

Применение пектина увеличивает в 4 раза выведение тяжелых металлов через почки по сравнению с их выведением через желудочно-кишечный тракт.

Пектин не обладает побочными действиями и пригоден к ежеднев-

ному потреблению.

Пектин ингибирует преимущественно всасывание тяжелых металлов и не препятствует всасыванию физиологических ионов.

Эти результаты позволяют рекомендовать ежеквартальное проведение пектиновой профилактики для детей, проживающих в регионах, пострадавших от чернобыльской катастрофы, что позволит существенно снизить содержание радионуклидов и тяжелых металлов в их организме.

## 10. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ МАТЕРИИ

**Элементарные частицы** – это мельчайшие известные в настоящее время частицы материи, не являющиеся атомами или ядрами.

Особенности элементарных частиц:

- способность к взаимным превращениям;
- большинство элементарных частиц нестабильно – они спонтанно превращаются в другие частицы.

В настоящее время известно порядка 350 элементарных частиц и античастиц.

Стабильными частицами являются:

- фотон;
- электрон;
- нейтрино;
- протон;
- их античастицы.

Между элементарными частицами существует четыре вида взаимодействия (приведены в порядке убывания интенсивности):

### *1. Сильное*

Ответственно за связь нуклонов в ядре. Радиус действия порядка  $10^{-15}$  м.

Теория сильного взаимодействия строится аналогично электродинамике и называется квантовой хромодинамикой (КХД). Она стала развиваться после высказанной в 1964 году М. Гелл-Маном и Г. Цвейгом (США) гипотезы о существовании кварков. Эксперименты показали, что нуклоны не являются точечными объектами, а состоят из кварков. В настоящее время установлено существование шести разновидностей кварков  $u$ ,  $d$ ,  $s$ ,  $c$ ,  $b$ ,  $t$  и соответствующих им антикварков.

Их названия происходят от английских слов  $up$ ,  $down$ ,  $strange$ ,  $charm$ ,  $beauty$ ,  $truth$ . Кварки имеют дробный электрический заряд, равный  $+2/3$  заряда электрона ( $u$ -,  $c$ -,  $t$ -кварки) и  $-1/3$  заряда электрона ( $d$ -,  $s$ -,  $b$ -кварки). Антикварки имеют противоположные знаки зарядов. Нуклоны состоят из

трех кварков (например, протон –  $uud$ , нейтрон –  $udd$ ), а мезоны – из кварка и антикварка (например,  $\pi^+$ -мезон –  $u\bar{d}$ ,  $\pi^-$ -мезон –  $d\bar{u}$ ). Чтобы избежать противоречия с принципом Паули, при обсуждении строения  $\Omega^-(sss)$ –,  $\Delta^{++}(uuu)$ – и  $\Delta^-(ddd)$ – барионов Н.Н. Боголюбовым, Б.В. Струминским и А.Н. Тавхелидзе, а также М.И. Ханом и И. Намбу было введено новое квантовое число "цвет", принимающее три значения, условно названные "красный", "зеленый", "синий", причем сумма этих цветов дает бесцветное состояние, т. е. состояние, в котором квантовое число "цвет" равно нулю. Взаимодействие между кварками осуществляется путем обмена бозоном, названным глюоном. Это нейтральная безмассовая частица. Главная характеристика – ее цветовой заряд, аналог электрического заряда. Однако вместо двух типов электрических зарядов, названных "плюс" и "минус", в КХД имеются три цветовых (сильных) заряда – "красный", "синий", "зеленый" – и три соответствующих антизаряда. Таким образом, сильный заряд кварков может принимать три значения. Взаимодействие между кварками можно свести к обмену цветом. Глюон наделен двумя цветовыми зарядами. Условное обозначение цветами разных состояний кварков и глюонов дало название и теории взаимодействия кварков и глюонов – квантовая хромодинамика. Экспериментальным подтверждением КХД явилось обнаружение кварковых и глюонных струй в  $e^+e^-$ -аннигиляции.

В отличие от лептонов, которые наблюдаются в свободном состоянии, кварки и глюоны существуют только в связанном состоянии и не вылетают из адронов. Поэтому для сильных взаимодействий рассматриваются две области: область, для которой радиус взаимодействия  $r$  больше размера нуклона  $r_N$ , и область, для которой радиус взаимодействия  $r$  меньше  $r_N$ . В первом случае взаимодействие можно рассматривать как обмен пионом (квантом ядерного поля). В этом случае константа взаимодействия  $\alpha_s = g_s^2 / (\hbar c) \approx 15$ .

Во втором случае происходит обмен глюоном и константа взаимодействия имеет более сложный характер и выражается через фундаментальную постоянную КХД-теории  $\Lambda$  ( $\Lambda = 100 - 300$  МэВ/с), квадрат пере-

данного импульса  $q^2$  и имеет величину, существенно меньшую единицы при больших значениях  $q^2$

$$\alpha_s(q^2) \approx \frac{1}{\ln(q^2 / \Lambda^2)} \ll 1 \quad (10.1)$$

Поскольку на малых расстояниях взаимодействие между кварками очень слабое и константа взаимодействия  $\alpha_s < 1$ , это состояние называется асимптотической свободой. На больших расстояниях ( $r > r_N$ ) цветные силы возрастают, они как бы удерживают кварки и не дают им вылететь из адрона. Это состояние невылетания носит название конфайнмента.

### 2. Электромагнитное

Ответственно за взаимодействия между заряженными частицами. Радиус действия неограничен.

Наиболее полно и последовательно изучены электромагнитные взаимодействия, которым подвержены все заряженные частицы и фотоны. Переносчиком взаимодействия является фотон. Для электромагнитных сил константа взаимодействия численно равна постоянной тонкой структуры

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137} \quad (10.2)$$

Примерами простейших электромагнитных процессов являются фотоэффект, комптон-эффект, образование электрон-позитронных пар, а для заряженных частиц — ионизационное рассеяние и тормозное излучение.

### 3. Слабое

Ответственно за все виды бета-распада ядер, процессы взаимодействия нейтрино с веществом, за многие распады элементарных частиц. Короткодействующее.

Впервые слабые взаимодействия наблюдались при бета-распаде атомных ядер.

Как оказалось, эти распады связаны с превращениями протона в нейтрон в ядре и обратно:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$ ;  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ . Возможны и обратные реакции: захват электрона  $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$ ; или антинейтрино



$\tilde{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$ . Слабое взаимодействие было описано Энрико Ферми в 1934 году в терминах четырехфермионного контактного взаимодействия.

При очень высоких энергиях вместо фермиевского контактного взаимодействия слабое взаимодействие описывается как обменное, при котором осуществляется обмен квантом, наделенным слабым зарядом  $g$  (по аналогии с электрическим зарядом) и действующим между фермионами. Такие кванты были впервые обнаружены в 1983 году в ЦЕРНе. Это заряженные бозоны  $W^\pm$  и нейтральный бозон  $Z^0$ , их массы соответственно равны  $m_{W^\pm} = 80 \text{ ГэВ}/c^2$  и  $m_{Z^0} = 90 \text{ ГэВ}/c^2$ . Константа взаимодействия в этом случае выражается через константу Ферми

$$\alpha_w = \frac{G_F}{\hbar c \left( \frac{\hbar}{m_p c} \right)} = 1,02 \cdot 10^{-5} \quad (10.3)$$

Реакция взаимодействия антинейтрино с протоном, осуществляемая путем обмена  $W^\pm$ -бозоном, называется реакцией с заряженным током. Обмен нейтральным  $Z^0$ -бозоном называется реакцией с нейтральным током. После открытия нейтральных слабых токов получила подтверждение гипотеза С. Вайнберга, А. Салама, Ш. Глэшоу о том, что электромагнитные и слабые взаимодействия могут быть объединены в единую электро-слабую теорию.

#### 4. Гравитационное

В микромире ощутимой роли не играет. Радиус действия неограничен.

Гравитационное взаимодействие характеризуется гравитационной постоянной  $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2$ , входящей в выражение константы гравитационного взаимодействия  $\alpha_G = Gm_N^2 / (\hbar c) \approx 10^{-38}$ , где  $m_N$  – масса нуклона. Эта константа имеет очень малую величину для элементарных частиц.

Поэтому для массовой шкалы, принятой в физике высоких энергий, гравитационные силы пренебрежимо малы по сравнению с другими фундаментальными взаимодействиями (табл. 10.1).

Гравитационные эффекты могут быть важны только в том случае, когда гравитационная энергия системы сравнима с полной ее энергией, т.е.  $GM^2/r = Mc^2$ . Оценим, при каких энергиях это может произойти. Если принять расстояние взаимодействия  $r$  равным комптоновской длине волны  $r = \lambda = \hbar/(Mc)$ , получим  $M = \sqrt{\hbar c/G} \cong 10^{-5}$  г. Этой массе  $M$  соответствует энергия  $Mc^2 \cong 10^{19}$  ГэВ. Такая масса называется планковской массой.

Комптоновская длина волны, соответствующая планковской массе, имеет величину  $l_{пл} = \frac{\hbar}{M_{пл}} \cong 10^{-33}$  см. Эта величина интерпретируется как фундаментальная длина, а время  $t_{пл} = \frac{\hbar}{M_{пл}c^2} \cong 10^{-43}$  с – как элементарный временной интервал.

Релятивистской классической теорией гравитационных взаимодействий является общая теория относительности Эйнштейна, которая в пределе слабых гравитационных полей переходит в теорию тяготения Ньютона. В квантовой теории гравитационные взаимодействия переносятся гравитоном – частицей с нулевой массой и спином, равным 2 (табл. 10.2). Однако последовательная теория квантовой гравитации до настоящего времени не создана.

#### **Классификация элементарных частиц по времени жизни:**

- резонансы – распад происходит за счет сильного взаимодействия. Время жизни порядка  $10^{-23}$  с;
- нестабильные частицы – распад происходит за счет электромагнитного или слабого взаимодействия (табл. 10.3). Время жизни порядка  $10^{-20}$  с – квазистационарные;
- абсолютно стабильные частицы – фотон, электрон, протон, электронное, мюонное и таонное нейтрино и их античастицы – распад всех этих частиц на опыте не зарегистрирован.

Таблица 10.1

## Силы в природе

Силы	Сила взаимодействия (относительные единицы)	Полевой квант	Безразмерная константа взаимодействия	Область Проявления
Сильные	$\sim 15$	Пионы	$\alpha_s = \frac{g_s^2}{\hbar c}$	Атомные ядра.
	$\leq 1$	Глюоны	$\alpha_s = \frac{1}{\ln(q^2 / \Lambda^2)}$	Фундаментальные частицы
Электромагнитные	$\sim 10^{-3}$	Фотоны	$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$	Атомы, электротехника
Слабые	$\sim 10^{-5}$	$Z^0, W^\pm$ -бозоны	$\alpha_w = \frac{g_w^2}{\hbar c}$	Радиоактивный бета-распад, распадные процессы
Гравитационные	$\sim 10^{-38}$	Гравитон	$\alpha_G = \frac{g_G^2}{\hbar c}$	Массивные тела и фотон

Таблица 10.2

## Классификация элементарных частиц по спину

Бозоны (табл. 10.4) (спин равен нулю или целому числу)	Фермионы (табл. 10.5) (спин полуцелый, подчиняются принципу Паули)
Гравитон – переносчик гравитационного взаимодействия. Экспериментально не обнаружен. Спин равен двум.	Кварки
Фотон – переносчик электромагнитного воздействия. Спин равен одному.	Лептоны. Обладают лептонным зарядом. Не участвуют в сильных взаимодействиях.
Промежуточные векторные бозоны – переносчики слабого взаимодействия. Спин равен 1.	Барионы и барионные резонансы. Обладают барионным зарядом. При распаде бариона обязательно образуется барион.
Глюоны – переносчики сильного взаимодействия между кварками. Спин равен 1.	Их античастицы.
Мезоны и мезонные резонансы пи-мезоны – переносчики сильного взаимодействия между нуклонами.	
Античастицы всех перечисленных частиц	

Таблица 10.3

## Классификация элементарных частиц по участию во взаимодействиях

Переносчики взаимодействия	Лептоны (не участвуют в сильных взаимодействиях)	Адроны (участвуют в сильных взаимодействиях, а также в электромагнитном и слабом)	
	Фотон	Электрон и позитрон	Мезоны
Промежуточные бозоны	мюон <sup>-</sup> и мюон <sup>+</sup>	пи <sup>0</sup> -мезон, пи <sup>+</sup> -мезон, пи <sup>-</sup> -мезон, К <sup>+</sup> -мезон, К <sup>-</sup> -мезон, D <sup>0</sup> -мезон, D <sup>+</sup> -мезон, D <sup>-</sup> -мезон, F <sup>+</sup> -мезон, F <sup>-</sup> -мезон.	Нуклоны – протон и нейтрон
	Тяжелые лептоны таон <sup>-</sup> и таон <sup>+</sup>		
Гравитон	Электронное нейтрино и антинейтрино	Гипероны – сигма <sup>+</sup> , сигма <sup>-</sup> , сигма <sup>0</sup> , лямбда <sup>0</sup> , кси <sup>0</sup> , кси <sup>-</sup> , омега <sup>-</sup> .	
Глюоны	Мюонное нейтрино и антинейтрино		
	Таонное нейтрино и антинейтрино		

Таблица 10.4

Свойства фундаментальных бозонов ( $\mathbf{J} = \mathbf{n}\hbar, \mathbf{n} = 0, 1, \dots$ )

Название, символ	Заряд	Масса	Спин
Гравитон G	0	0	2
Фотон $\gamma$	0	$< 3 \cdot 10^{-27}$ эВ/с <sup>2</sup>	1
Заряженные векторные бозоны W <sup>-</sup> и W <sup>+</sup>	$\pm 1$	81.0 ГэВ/с <sup>2</sup>	1
Нейтральный векторный бозон Z <sup>0</sup>	0	92.4 ГэВ/с <sup>2</sup>	1
Глюоны g	0	0	0

Таблица 10.5

Свойства фундаментальных фермионов ( $\mathbf{J} = \left(\mathbf{n} + \frac{1}{2}\right)\hbar, \mathbf{n} = 0, 1, \dots$ )

Электрический заряд		Лептоны		Кварки	
		0	1	-1/3	+2/3
Первое поколение	Символ	$\nu_e$	e	d	u
	Масса	$< 15$ эВ/с <sup>2</sup>	0.511 МэВ/с <sup>2</sup>	7 МэВ/с <sup>2</sup>	3 МэВ/с <sup>2</sup>
Второе поколение	Символ	$\nu_\mu$	$\mu$	s	c
	Масса	$< 0.17$ МэВ/с <sup>2</sup>	105.7 МэВ/с <sup>2</sup>	0.15 ГэВ/с <sup>2</sup>	1.5 ГэВ/с <sup>2</sup>
Третье поколение	Символ	$\nu_\tau$	$\tau$	b	t
	Масса	$< 24$ МэВ/с <sup>2</sup>	1784 МэВ/с <sup>2</sup>	4.9 ГэВ/с <sup>2</sup>	180 ГэВ/с <sup>2</sup>