

Одесский национальный университет имени И. И. Мечникова
Кафедра экспериментальной физики

ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Часть I
Введение в физику ядра

Методические указания к лабораторным работам
для студентов III курса
физического факультета

Одесса – 2007

Печатается по решению Ученого
Совета физического факультета

Составители:

Бабинчук Валентин Степанович

Ницук Юрий Андреевич

В методических указаниях рассмотрены строение атомного ядра, типы и особенности радиоактивных превращений. Приведены примеры практического применения радиоактивных изотопов.

СОДЕРЖАНИЕ

1.1. Строение атомов и ядер.....	4
1.2. Масса и энергия связи атомного ядра.....	5
1.3. Изотопы.....	6
1.4. Стабильные и радиоактивные изотопы.....	7
1.5. Типы радиоактивных превращений.....	8
1.6. Гамма – излучение.....	13
1.7. Состав ядер и их устойчивость.....	16
1.8. Закон радиоактивного распада.....	17
1.9. Активность источников.....	18
1.10. Радиоактивные излучения и их энергия.....	19
1.11. Свойства радиоактивных излучений.....	20
1.12. Схемы распада некоторых радиоактивных ядер.....	22
1.13. Основы практического применения радиоактивных изотопов.....	24
1.14. Основные понятия, определения и терминология.....	28

1.1. СТРОЕНИЕ АТОМОВ И ЯДЕР

Все тела состоят из атомов химических элементов, которые, связываясь, друг с другом в различных отношениях и различным способом, образуют многообразие форм вещества. Однако и **атомы имеют сложную структуру: они построены из более простых частиц — электронов, протонов и нейтронов, которые относятся к числу так называемых элементарных (простейших) частиц.**

Электрон принадлежит к наиболее легким из элементарных частиц. Его масса равна $9,1 \cdot 10^{-28}$ г, а электрический заряд равен одному отрицательному элементарному заряду

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Протон и нейтрон являются сравнительно тяжелыми частицами. Масса протона в 1836 раз, а нейтрона в 1839 раз больше массы электрона. Заряд протона равен одному положительному элементарному заряду. Нейтрон не имеет электрического заряда и является нейтральной частицей. В атоме тяжелые частицы, протоны и нейтроны, образуют наиболее плотную часть его — атомное ядро. Размер атомного ядра по порядку величины составляет 10^{-12} см, но в атомном ядре сосредоточена почти вся масса атома — 99,95 — 99,98%. Нейтроны и протоны удерживаются в ядре за счет особых ядерных сил, действующих между этими частицами.

Вокруг атомного ядра по замкнутым орбитам двигаются электроны. Электронные орбиты располагаются слоями и составляют **электронные оболочки атома**. Размер всего атома, т. е. диаметр его внешних электронных оболочек, составляет по порядку величины 10^{-8} см и примерно в 10^4 раз превышает размер его центральной части — атомного ядра.

Ближайшая к ядру оболочка называется *K*-оболочкой, следующая за ней — *L*-оболочкой; дальше от ядра расположены *M*-, *N*-, *O*-, *P*-электронные оболочки.

Атом в целом электрически нейтрален, так как сумма отрицательных зарядов всех электронов равна положительному заряду ядра. Все атомы данного химического элемента имеют одинаковое строение электронных оболочек. Атомы различных химических элементов различаются между собой строением электронных оболочек. Заряд ядра, выраженный в единицах элементарного заряда (заряд электрона), а следовательно, и число электронов в атоме равны порядковому номеру (*Z*) элемента в таблице Менделеева.

Атом водорода содержит один протон, поэтому заряд ядра водорода равен одному элементарному заряду. Вокруг ядра атома водорода движется один электрон.

Ядра следующего по порядку в таблице Менделеева элемента—гелия содержат два протона и два нейтрона. Заряд ядра гелия равен двум элементарным зарядам. Число электронов в атоме гелия равно двум. Эти два электрона заполняют *K*-оболочку.

В более сложных атомах, ядра которых несут заряд, превосходящий два элементарных заряда, число электронов на *K*-оболочке остается равным двум, остальные электроны размещаются на других оболочках, более удаленных от ядра. Например, азот (порядковый номер 7) имеет семь электронов, из которых два находятся на *K*-оболочке, а пять на *L*-оболочке.

Заполнение *L*-оболочки завершается, когда на ней расположены восемь электронов. Поэтому атом неона (порядковый номер 10) имеет заполненные *K*- и *L*-оболочки; у атома хлора (порядковый номер 17) заполнены *K*- и *L*-оболочки и, сверх того, семь электронов находятся на *M*-оболочке. Для заполнения *M*-оболочки необходимо 18 электронов, для заполнения *N*-оболочки—32 электрона и т. д.

1.2. МАССА И ЭНЕРГИЯ СВЯЗИ АТОМНОГО ЯДРА

Ядро атома характеризуется прежде всего зарядом и массой. В то время как заряд ядра определяется числом входящих в него протонов, масса ядра зависит как от числа протонов, так и от числа нейтронов, входящих в него. Массы всех ядер выражают в физической шкале масс, в которой масса одного из изотопов кислорода принята равной точно 16. В обычной шкале массы протона и нейтрона соответственно равны $1,6725 \cdot 10^{-24}$ г и $1,6749 \cdot 10^{-24}$ г, а в физической шкале 1,00812 и 1,00893. Округленные до ближайших целых чисел значения масс в единицах физической шкалы называются массовыми числами и обозначаются обычно буквой *A*.

В ядерной физике принято обозначать атомы и ядра элементов указанием символа элемента, его порядкового номера и массового числа. Например, запись ${}^{12}_6\text{C}$ обозначает атом или ядро атома углерода, порядковый номер которого (заряд ядра) равен 6, а массовое число 12.

Хотя масса ядра определяется числом входящих в него протонов и нейтронов, однако она не равна в точности сумме масс нейтронов и протонов. Масса ядра несколько меньше этой суммы.

Обозначим массу протона через m_p , а массу нейтрона через m_n , тогда масса ядра

$$M = Zm_p + (A-Z)m_n - \Delta M \quad (1.1)$$

Уменьшение массы на величину ΔM объясняется выделением энергии при соединении протонов и нейтронов в ядро атома.

Согласно данным современной физики всякому изменению энергии системы соответствует изменение ее массы, причем

$$\Delta E = \Delta M \cdot c^2 \quad (1.2)$$

где c —скорость света в вакууме, равная $3 \cdot 10^{10}$ см/с

Величина ΔE называется энергией связи ядра и имеет важное значение в ядерной физике, так как она равна той энергии, которую необходимо затратить для разложения ядра атома на составляющие его частицы—протоны и нейтроны.

1.3. ИЗОТОПЫ

Многие свойства химических элементов зависят от строения электронной оболочки их атомов. Так, **валентность определяется числом электронов на внешней, не полностью заселенной оболочке. Поэтому внешнюю оболочку часто называют валентной.** Например, атомы всех щелочных металлов (I группа элементов в таблице Менделеева), имеющие по одному электрону на внешней оболочке, являются одновалентными. Атомы всех щелочноземельных металлов (II группа в таблице Менделеева) имеют по два электрона на внешней оболочке; эти элементы двухвалентны. Аналогичным образом валентность элементов, входящих в другие группы таблицы Менделеева, также связана с числом электронов на внешних незаполненных оболочках. Химические элементы, атомы которых имеют полностью заселенные электронные оболочки, не обладают химической активностью. Это — инертные газы.

Оптические свойства атомов также определяются строением их внешних электронных оболочек. Испускание света атомами происходит при переходе электрона с одной орбиты на другую во внешних оболочках. В соответствии со сходным строением внешних оболочек элементы одной и той же группы в таблице Менделеева имеют сходное строение атомного спектра. Мы отмечали выше, что число электронов в атоме и строение электронных оболочек опреде-

ляются зарядом ядра. Поэтому **атомы с равным зарядом ядра будут химически тождественными.**

Следовательно, атомы, имеющие разные массы (за счет разного числа нейтронов в ядре) при одинаковом заряде ядра (равное число протонов в ядре) будут химически весьма трудно различимы.

Подобные **разновидности атомов, отличающиеся массой атомного ядра,** встречаются в природе у большинства элементов. Это — так называемые **изотопы данного химического элемента.** Например, обычный кислород является смесью трех изотопов $^{16}_8\text{O}$, $^{17}_8\text{O}$ и $^{19}_8\text{O}$ относительное содержание которых равно 99,76, 0,04 и 0,20%. Определение изотопного состава элементов основано на различии физических свойств изотопов. Например, от массы атомов зависят скорость диффузии в газах, плотность вещества и т. д.

Наиболее мощным средством разделения атомов с разной массой и одинаковым зарядом является воздействие электрического и магнитного полей на ионизованные атомы, т. е. на атомы, предварительно лишенные одного или нескольких электронов и потому заряженные положительно.

Скорость и траектория ионов, движущихся в электрическом или магнитном поле, зависят не только от заряда, но и от их массы. Поэтому, **применяя отклоняющие поля, можно пространственно разделить ионы различных изотопов.** Приборы, построенные на этом принципе, называются масс-спектрометрами и масс-спектрографами.

1.4. СТАБИЛЬНЫЕ И РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗОТОПЫ

В настоящее время известно около 100 различных химических элементов, каждый из которых представлен несколькими изотопами. Изотопы данного элемента делятся на стабильные (устойчивые) и радиоактивные. Радиоактивными называются изотопы, которые с течением времени самопроизвольно (т. е. без внешних воздействий) превращаются в изотопы других элементов. Радиоактивные изотопы, встречающиеся на земле в естественном виде, носят название естественно-радиоактивных. Естественно-радиоактивные изотопы принадлежат к элементам, расположенным в конце таблицы Менделеева, начиная с таллия ($Z=81$). Исключение составляют радиоактивные $^{40}_{19}\text{K}$, $^{87}_{37}\text{Rb}$, $^{152}_{62}\text{Sm}$ и некоторые другие.

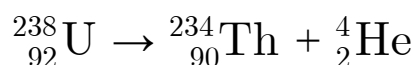
Общее число известных стабильных и естественно-радиоактивных изотопов равно 330.

В настоящее время можно искусственным путем вызвать изменение состава ядер стабильных и естественно-радиоактивных изотопов и создать новые, так называемые искусственно-радиоактивные изотопы. Это достигается бомбардировкой атомных ядер быстрыми заряженными частицами, нейтронами и электромагнитным излучением с весьма короткой длиной волны (фотоны большой энергии). Теперь получают радиоактивные изотопы всех существующих в естественном виде элементов, а также ряда элементов, в естественном виде не встречающихся. К последним относятся технеций ($_{43}\text{Tc}$), прометий ($_{61}\text{Pm}$), нептуний ($_{93}\text{Np}$), плутоний ($_{94}\text{Pu}$) и др. Общее число известных естественных и искусственных изотопов превосходит 800.

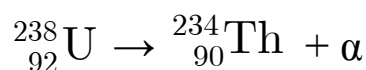
1.5. ТИПЫ РАДИОАКТИВНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ

Известны следующие виды радиоактивных превращений: альфа-распад, бета-минус-распад, бета-плюс-распад и электронный захват. Рассмотрим их особенности.

Альфа-распад. При α -распаде радиоактивное ядро излучает быстродвижущееся ядро атома гелия, называемое иначе α -частицей. Заряд α -частицы равен двум элементарным зарядам, а массовое число равно четырем. Поэтому излучение α -частицы приводит к уменьшению массового числа ядра на 4 единицы, а заряда ядра — на 2 единицы. Следовательно, в результате излучения α -частицы исходное ядро превращается в ядро элемента, у которого порядковый номер на 2, а массовое число на 4 единицы меньше, чем у исходного. Например, излучая α -частицу, уран $^{238}_{92}\text{U}$ превращается в изотоп тория $^{234}_{90}\text{Th}$, а полоний $^{210}_{84}\text{Po}$ в изотоп свинца $^{206}_{82}\text{Pb}$. Эти процессы записывают так:



Можно пользоваться и следующей формой записи:



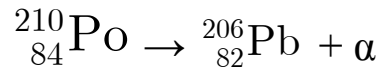


Схема такого процесса приведена на рис.1.1. Альфа-распад характерен для ядер элементов конца периодической системы Менделеева.

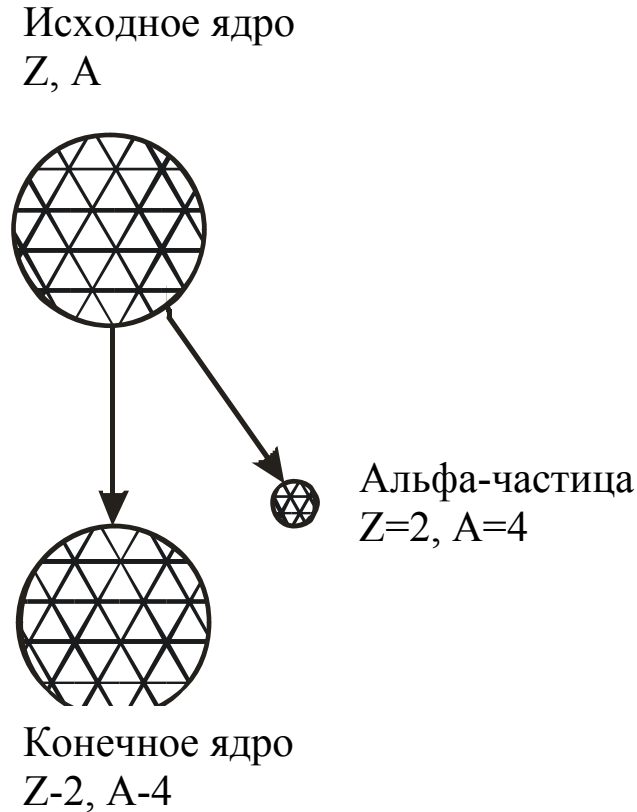


Рис. 1.1. Схема α -распада

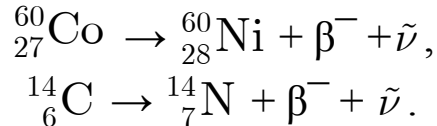
Бета-минус-распад (или электронный распад). Установлено, что свободный нейтрон с течением времени превращается в протон и две легкие частицы — электрон и антинейтрино. Нейтрино (антинейтрино) не обладает электрическим зарядом и крайне слабо взаимодействует с веществом, поэтому нейтрино (антинейтрино) в обычных условиях опыта себя никак не проявляет и на последующих рисунках не представлено.

В некоторых радиоактивных ядрах аналогичный процесс может происходить с одним из нейтронов ядра. При этом образующийся протон остается в ядре, а электрон и нейтрино вылетают из него. В результате такого процесса массовое число ядра остается без изменения, а его заряд увеличивается на единицу. Следовательно, ядро исходного элемента превращается в ядро, у которого порядковый номер на единицу больше, чем у исходного. Таким образом,

продуктом превращения будет элемент, стоящий на одну клетку дальше от начала таблицы Менделеева. Электрон, вылетающий из исходного ядра, носит название β^- -частицы. Схема β^- -распада изображена на рис. 1.2.

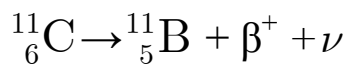
Приведем два примера. Изотоп кобальта ${}_{27}^{60}\text{Co}$, испуская β^- -частицу, превращается в никель ${}_{28}^{60}\text{Ni}$; изотоп ${}_{6}^{14}\text{C}$, испуская β^- -частицу, превращается в изотоп азота ${}_{7}^{14}\text{N}$.

Эти процессы записываются так:



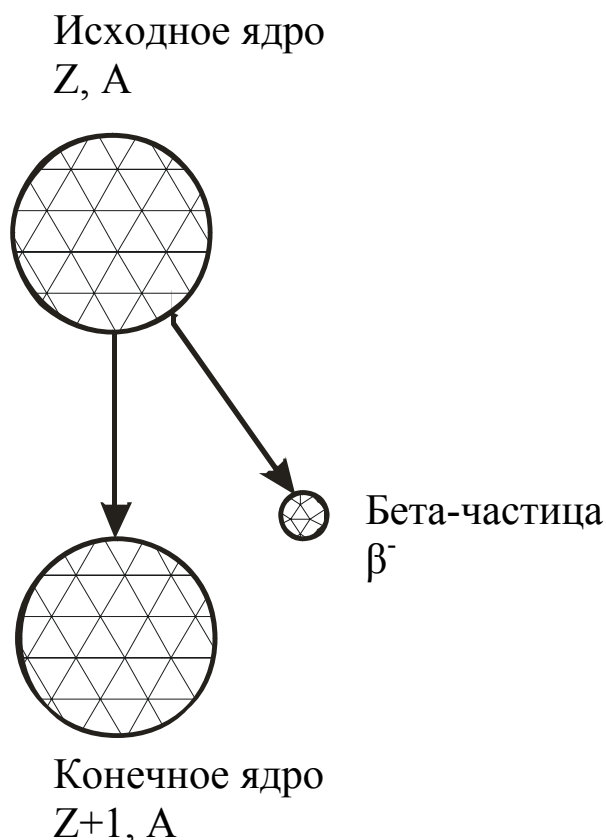
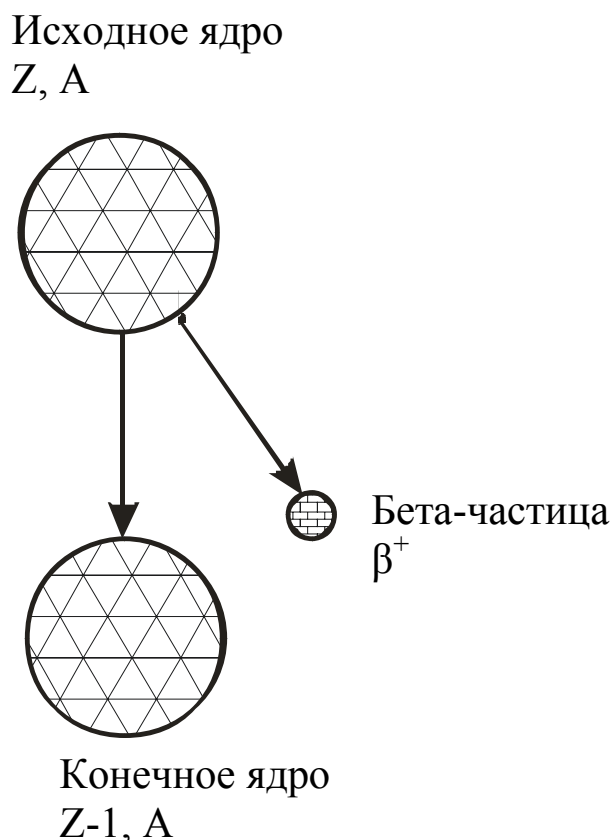
Бета-плюс-распад (или позитронный распад). Механизм позитронного распада следующий.

Один из протонов атомного ядра превращается в нейтрон, позитрон и нейтрино. Нейтрон остается внутри ядра, а позитрон и нейтрино вылетают из него. Позитрон—это элементарная частица, по свойствам подобная электрону, но отличающаяся от него знаком электрического заряда: позитрон заряжен положительно. В результате β^+ -превращения массовое число ядра остается без изменения, а его заряд уменьшается на единицу. Поэтому ядро исходного элемента превращается в ядро с порядковым номером, на единицу меньшим. Следовательно, продуктом превращения будет элемент, стоящий на одну клетку ближе к началу таблицы Менделеева. Схема β^+ -распада изображена на рис. 1.3. Примером этого типа распада может служить превращение изотопа углерода ${}_{6}^{11}\text{C}$ в изотоп бора ${}_{5}^{11}\text{B}$, происходящее по схеме

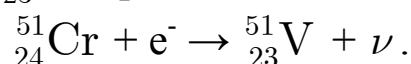


Электронный или K -захват. В известном смысле этот процесс противоположен β^- -распаду. При электронном захвате атомное ядро захватывает один из электронов с внутренних электронных оболочек атома и испускает нейтрино. Чаще всего электрон захватывается из ближайшей к ядру K -оболочки (рис. 1.4). Поэтому данный процесс называется обычно K -захватом. В результате захвата электрона один из протонов ядра превращается в нейтрон. Поэтому порядковый номер ядра, так же как и в случае β^+ -распада, уменьшается на единицу, а массовое число ядра остается неизменным. Следовательно, продуктом этого типа превращения является ядро элемента, находя-

щегося на одну клетку ближе к началу таблицы Менделеева, чем исходный элемент.

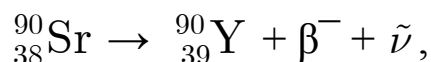
Рис. 1.2. Схема β^- -распадаРис. 1.3. Схема β^+ -распада

Примером может служить превращение радиоактивного изотопа хрома ${}_{24}^{51}\text{Cr}$ в ванадий ${}_{23}^{51}\text{V}$, происходящее по схеме



На место захваченного ядром электрона через весьма короткое время перейдет один из электронов, находящийся на более удаленной оболочке. Этот процесс сопровождается излучением характеристических рентгеновских лучей.

Продуктами радиоактивных превращений могут быть либо стабильные изотопы, либо радиоактивные. В последнем случае процесс превращения продолжается до тех пор, пока продуктом распада не окажется стабильный изотоп. Например, подобная цепочка радиоактивных превращений имеет место при распаде радиоактивного изотопа стронция ${}_{38}^{90}\text{Sr}$, который, распадаясь по схеме



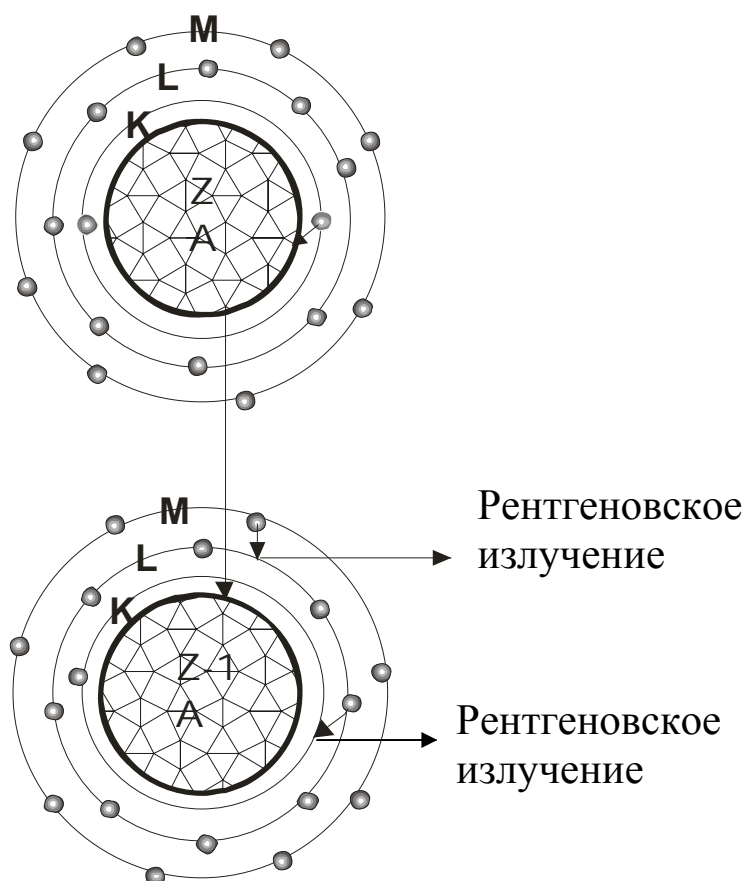
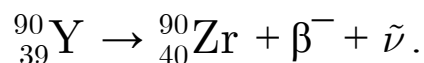
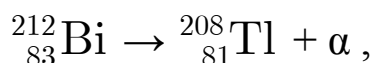


Рис.1.4. Схема E-захвата
K, L, M – электронные оболочки атома

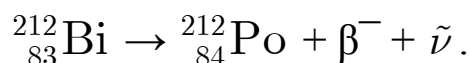
превращается в радиоактивный изотоп иттрия. Этот изотоп в свою очередь распадается и превращается в стабильный изотоп циркония ${}_{40}^{90}\text{Zr}$



У некоторых радиоактивных изотопов одна часть ядер претерпевает один тип распада, а другая часть ядер - какой-либо другой тип распада. Так, ядра изотопа висмута ${}_{83}^{212}\text{Bi}$ (Торий С') распадаются двумя путями: 33,7% ядер висмута превращаются в ядра изотопа таллия ${}_{81}^{208}\text{Tl}$ (Торий С'') с испусканием α -частиц по схеме



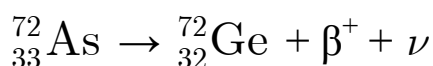
остальные 66,3% ядер висмута превращаются в изотоп полония ${}_{84}^{212}\text{Po}$ с испусканием β^{-} -частиц:



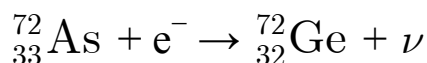
Распад такого типа с испусканием α - и β^- -частиц встречается сравнительно редко.

У ядер некоторых изотопов радиоактивное превращение может происходить как путем испускания α -частиц, так и путем электронного захвата.

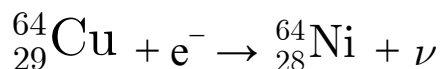
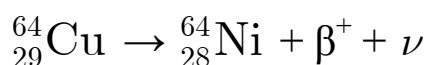
Многие изотопы испытывают одновременно β^+ распад и K -захват. В этом случае оба типа распада приводят к одному и тому же конечному ядру, например, мышьяк ${}_{33}^{72}\text{As}$ превращается в германий ${}_{32}^{72}\text{Ge}$ либо по схеме



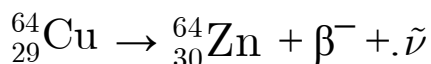
либо по схеме



У некоторых изотопов β^- -распад сочетается или с β^+ -распадом, или с K -захватом, или с тем и другим. Например, изотоп меди ${}_{30}^{64}\text{Zn}$ превращается в стабильный изотоп никеля ${}_{28}^{64}\text{Ni}$ как путем β^+ -распада, так и путем K -захвата:



Кроме того, часть ядер изотопа ${}_{29}^{64}\text{Cu}$ превращается в ядра стабильного изотопа цинка ${}_{30}^{64}\text{Zn}$ с испусканием β^- -частиц:



1.6. ГАММА – ИЗЛУЧЕНИЕ

Радиоактивные превращения многих изотопов сопровождаются испусканием жесткого электромагнитного излучения. Это — так называемые γ -лучи, которые по своим физическим свойствам не отличаются от жестких рентгеновских лучей.

Гамма-излучение возникает тогда, когда ядра — продукты радиоактивного превращения оказываются сначала в состоянии с избыточной энергией, а затем переходят в нормальное невозбужденное состояние. Например, изотоп золота ${}_{79}^{198}\text{Au}$, испуская β^- -частицы, превращается в изотоп ртути ${}_{80}^{198}\text{Hg}$, ядра атомов которого лишь по-

сле испускания γ -лучей переходят на стабильный энергетический уровень.

Как было сказано, γ -излучение испускается при переходах ядер из возбужденных энергетических состояний в основное или менее возбужденные состояния, а также при ядерных реакциях. В первом случае, согласно правилу частот Бора, энергия фотона γ -излучения равна разности энергий конечного и начального энергетических уровней ядра:

$$h\nu_{ik} = W_i - W_k = W_{ik} \quad (1.3)$$

где ν_{ik} – частота фотона, соответствующего переходу ядра из состояния с энергией W_i в состояние с энергией W_k . Величина энергии W_{ik} имеет величину от 0,1 МэВ до нескольких МэВ. Это значительно превышает разность энергий электронных уровней в атоме. γ -лучи являются очень коротковолновым электромагнитным излучением с длиной волны порядка 0,1 Å. Они имеют дискретный линейчатый спектр.

Следует подчеркнуть, что гамма-излучение не является самостоятельным типом радиоактивности. Оно сопровождает процессы α - и β -распадов и не вызывает изменения заряда и массового числа ядер. Установлено, что γ -лучи испускаются дочерним ядром, которое в момент образования оказывается возбужденным. Снятие энергии возбуждения ядра происходит за время $10^{-12} \div 10^{-13}$ с, что значительно меньше времени жизни возбужденного атома $\sim 10^{-8}$ с.

Учитывая происхождение и свойства γ -лучей, следует отметить наличие для этих лучей явления **внутренней конверсии**. Это явление фотоэффекта на электронах внутренних оболочек атома под действием γ -излучения его ядра. Электроны, образовавшиеся в результате такого внутреннего фотоэффекта, называются **конверсионными (электроны конверсии)**.

В ряде случаев вся энергия γ -лучей расходуется на явление внутренней конверсии и вместо γ -излучения наблюдаются только электроны конверсии. Энергия $e\varphi_n$ фотоэлектрона конверсии связана с энергией $h\nu$ фотона γ -лучей уравнением Эйнштейна для фотоэффекта

$$e\varphi_n = h\nu - A_n \quad (1.4)$$

где A_n – работа выхода электрона с n -й оболочки атома, численно равная энергии электронов, находящихся на определенных энергетических уровнях в атоме. Эти энергии известны из данных о характеристических рентгеновских спектрах атомов. γ -фотон с энергией $h\nu$

может удалить электрон из любой внутренней оболочки атома. Соответственно энергия электронов конверсии будет разная, и будет она зависеть от того, с какого уровня электрон был удален.

Результатом внутренней конверсии является потеря электронов из внутренних оболочек атома и, следовательно, создание условий для излучения линий рентгеновского характеристического спектра. Внутренняя конверсия сопровождается испусканием характеристических рентгеновских лучей. Тщательное измерение энергии конверсированных электронов, а также знание энергии рентгеновских уровней атома позволили убедиться в том, что ядро может испускать определенный ряд монохроматических γ -лучей, т.е. что **γ -лучи имеют линейчатый спектр**. Кроме того на экспериментах было показано, что γ -лучи испускаются не материнским, а дочерним ядром.

Все возбужденные энергетические уровни ядра имеют значения энергии, определенные с точностью до величины ΔW , определяемой из соотношения неопределенностей

$$\Delta W = \frac{h}{2\pi \cdot \Delta t} \quad (1.5)$$

где Δt - время жизни ядра в возбужденном состоянии.

Только для основного состояния стабильного ядра $\Delta t = \infty$ и $\Delta W = 0$, т.е. ядро имеет значение энергии, в точности равное W . Это в равной мере относится к энергетическим уровням электронов в атомах.

Например, ядро иридия ${}^{191}_{77}\text{Ir}$ за время Δt , которое можно принять равным периоду полураспада $T = 10^{-10}$ с, переходит из возбужденного состояния с энергией $W = 129$ кэВ в основное состояние, испуская γ -фотон. Величина ΔW неопределенности энергии оказывается равной $\Delta W \approx 5 \cdot 10^{-6}$ эВ.

Конечное время жизни возбужденных энергетических состояний ядра приводит к немонохроматичности γ -излучения, сопровождающего переход ядра из возбужденного состояния в нормальное. Эта немонохроматичность называется **естественной шириной линии γ -излучения**, а неопределенность ΔW величины энергии возбужденного состояния называется **естественной шириной Γ энергетического уровня ядра**. Эти определения справедливы также для перехода атома из возбужденного состояния в нормальное. В этом случае говорят о *естественной ширине спектральной линии и о естественной ширине энергетических уровней электронов в атоме*.

1.7. СОСТАВ ЯДЕР И ИХ УСТОЙЧИВОСТЬ

Ядро основного изотопа водорода ${}^1_1\text{H}$ состоит только из одного протона. В природе имеется другой стабильный изотоп водорода ${}^2_1\text{H}$, ядро которого содержит кроме протона один нейтрон. Этот изотоп называется тяжелым водородом, или дейтерием. Искусственным путем можно ввести в ядро дейтерия еще один нейтрон. Тогда получается изотоп водорода — тритий ${}^3_1\text{H}$, с одним протоном и двумя нейтронами. Ядра трития неустойчивы: они самопроизвольно распадаются с испусканием β^- -частиц и превращаются в ядра стабильного изотопа гелия ${}^3_2\text{He}$, который присутствует в природе в небольшом количестве наряду с обычным стабильным изотопом гелия ${}^4_2\text{He}$. Если в ядро изотопа ${}^3_2\text{He}$ добавить один нейтрон, то образуется ядро основного изотопа гелия ${}^4_2\text{He}$ (α -частица), содержащее два протона и два нейтрона.

Продолжая увеличивать число протонов и нейтронов в ядре, мы могли бы получить ядра всех существующих изотопов.

В ядрах стабильных изотопов, принадлежащих к легким элементам, т. е. расположенным в начале таблицы Менделеева (до кальция), содержится примерно равное число нейтронов и протонов. Ядра стабильных изотопов тяжелых элементов имеют некоторый избыток нейтронов по сравнению с числом протонов.

В стабильных ядрах отношение числа нейтронов к числу протонов возрастает с увеличением порядкового номера элемента, достигая для свинца значения 1,5. Отступления от этих соотношений делают ядра неустойчивыми — радиоактивными.

Если в ядре слишком много нейтронов, то через некоторое время один из них превратится в протон. Такие ядра претерпевают β^- -распад.

Если же в ядре имеется избыток протонов, то один из них в конце концов превратится в нейтрон, либо испуская позитрон (β^+ -распад), либо захватывая электрон из оболочки атома (K -захват).

Неустойчивость α -активных изотопов объясняется не отклонением от выгодного соотношения чисел нейтронов и протонов в ядре, а общей нестабильностью тяжелых ядер, обусловленной электрическим отталкиванием протонов ядра друг от друга. Поэтому все изотопы наиболее тяжелых элементов радиоактивны.

1.8. ЗАКОН РАДИОАКТИВНОГО РАСПАДА

Радиоактивный распад приводит к непрерывному уменьшению числа атомов исходного радиоактивного изотопа и к накоплению продуктов распада.

Интервал времени $T_{1/2}$, в течение которого распадается половина начального числа N_0 радиоактивных ядер, называется периодом полураспада радиоактивного изотопа. Период полураспада является одной из основных характеристик радиоактивного изотопа.

Для числа ядер, не распавшихся через время $T_{1/2}$, можно написать:

$$N_{T_{1/2}} = N_0 2^{-1} \quad (1.6)$$

По истечении времени, равного $2 \cdot T_{1/2}$, число нераспавшихся ядер будет равно

$$N_{2T_{1/2}} = N_0 \cdot 2^{-2} \quad (1.7)$$

Спустя время t равное n периодам полураспада $n = t/T_{1/2}$ остается нераспавшихся ядер

$$N_{nT_{1/2}} = N_0 \cdot 2^{-n} \quad (1.8)$$

или

$$N_t = N_0 2^{-\frac{t}{T_{1/2}}} \quad (1.9)$$

Если положить $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$, то основной закон радиоактивного распада

(9) можно написать в следующей форме:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.10)$$

Величина $\lambda = \frac{0.43}{T_{1/2}}$ называется **постоянной распада** и наряду с

периодом полураспада применяется для характеристики радиоактивных изотопов. Период полураспада есть величина постоянная для данного радиоактивного изотопа и практически не зависит от таких внешних факторов, как химическое состояние вещества, температура, давление и т. п..

Численное значение $T_{1/2}$ весьма различно для разных изотопов. Например, изотоп урана $^{238}_{92}\text{U}$ имеет период полураспада, равный $4,51 \cdot 10^9$ лет, а изотоп азота $^{12}_7\text{N}$ - равный 0,012 сек.

Для искусственных радиоактивных изотопов характерны величины периодов полураспада, измеряемые минутами, часами и днями.

Заметим, что один и тот же химический элемент может иметь как короткоживущие, так и долгоживущие радиоактивные изотопы. Например, у изотопа углерода $^{14}_6\text{C}$ период полураспада 5720 лет, а у изотопа $^{11}_6\text{C}$ - 20,4 минуты.

1.9. АКТИВНОСТЬ ИСТОЧНИКОВ

В препарате, содержащем радиоактивный изотоп, за единицу времени происходит распад некоторого числа радиоактивных ядер. Чем больше ядер в среднем распадается за единицу времени, тем активнее источник.

Из закона радиоактивного распада (10) следует, что число ядер, распадающихся за единицу времени, равно

$$-\frac{dN_t}{dt} = \lambda N_t = \frac{0.43}{T_{1/2}} N_t \quad (1.11)$$

Таким образом, активность источника прямо пропорциональна числу имеющихся в нем радиоактивных ядер и обратно пропорциональна периоду полураспада изотопа.

За единицу активности принята активность такого источника, в котором за одну секунду происходит $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов ядер. Выбор такой единицы был связан с тем, что в грамме радия за одну секунду распадаются $3,7 \cdot 10^{10}$ ядер. Эта единица активности называется Кюри, Ки. Для измерения активности применяют также милликюри (мКи) и микрокюри (мкКи): $1\text{мКи} = 10^{-3}\text{Ки}$, $1\text{мкКи} = 10^{-6}\text{Ки}$. В лабораторной практике чаще всего применяют источники, активность которых лежит в диапазоне микрокюри — кюри.

С течением времени активность источника убывает из-за уменьшения числа радиоактивных ядер. Убывание активности происходит по закону радиоактивного распада (4).

В настоящее время в системе единиц СИ за единицу активности принят 1 Беккерель. Это активность препарата, в котором за одну секунду происходит 1 распад.

1.10. РАДИОАКТИВНЫЕ ИЗЛУЧЕНИЯ И ИХ ЭНЕРГИЯ

Все радиоактивные превращения происходят с выделением некоторого количества энергии в виде кинетической энергии частиц, испускаемых радиоактивными ядрами, и энергии фотонов, излучаемых ядрами, образующимися после распада.

У α -активных изотопов эта энергия переходит в основном в кинетическую энергию α -частиц и в энергию фотонов (если α -распад сопровождается электромагнитным излучением). Обозначим через M_1 — массу исходного ядра, через M_2 — массу ядра-продукта в его основном состоянии, через m_α — массу α -частицы. Тогда разница между массой исходного ядра и массой продуктов α -распада равна

$$\Delta M = M_1 - M_2 - m_\alpha \quad (1.12)$$

Согласно (1.2) энергия, выделяющаяся из ядра при α -распаде равна

$$E_\alpha = (M_1 - M_2) \cdot c^2 - m_\alpha \cdot c^2 \quad (1.13)$$

В случае β^- -распада количество энергии, выделившейся из ядра атома, может быть найдено из аналогичного выражения

$$E_{\beta^-} = (M_1 - M_2) \cdot c^2 - m_e c^2 \quad (1.14)$$

Однако если измерить сумму кинетической энергии β^- -частиц и энергию фотонов, испущенных источником, то для любого случая β^- -распада сумма окажется меньше энергии E_{β^-} , потерянной ядрами источника. Отступление от закона сохранения энергии здесь только кажущееся, ибо, как отмечалось выше, при β^- -распаде излучаются не только β^- -частицы и фотоны, но также и нейтрино, которое уносит из ядра часть энергии.

Для β^+ -распада количество энергии, теряемое ядром, как и в случае β^- -распада, равно

$$E_{\beta^+} = (M_1 - M_2) \cdot c^2 - m_e \cdot c^2. \quad (1.15)$$

Здесь следует сделать существенное замечание. Величина E_{β^+} есть суммарная энергия, уносимая при E_{β^+} -распаде позитроном, нейтрино и фотонами γ -излучения ядра — продукта распада. Однако позитрон, спустя короткое время после вылета из ядра в результате взаимодействия с одним из электронов вещества превращается совместно с этим электроном в электромагнитное γ -излучение. Этот процесс называется аннигиляцией пары электрон — позитрон. Энергия, выделяющаяся при аннигиляции пары, равна сумме энергий покоя электрона и позитрона, т. е. $2m_e \cdot c^2$, так как электрон и позитрон имеют одинаковую массу. В процессе аннигиляции в подавляющем

большинстве случаев испускаются 2 γ -кванта, разлетающихся в противоположные стороны. Энергия каждого из аннигиляционных квантов равна $m_e \cdot c^2$. Если учесть энергию аннигиляции, то суммарная величина энергии излучения при β^+ -распаде окажется равной $E_{\beta^+} + 2m_e \cdot c^2$.

В случае K -захвата энергия радиоактивного превращения равна

$$E_K = (M_1 + m_e - M_2) c^2. \quad (1.16)$$

Эта энергия уносится нейтрино, квантом рентгеновского излучения, а также γ -излучением, если оно присутствует.

Здесь и выше мы принимаем за массу ядра продукта значение массы, которое имеет ядро в своем основном невозбужденном состоянии. Это существенно потому, что продуктом радиоактивного превращения часто оказываются ядра, находящиеся сначала в возбужденном состоянии, а затем переходящие в нормальное состояние с испусканием электромагнитного излучения (γ -излучение).

В качестве единицы энергии в атомной физике употребляют электрон-вольт (обозначается — эВ). Один электрон-вольт равен кинетической энергии, приобретаемой частицей с зарядом, равным одному элементарному заряду, при прохождении ускоряющей ее движение разности потенциалов в один вольт. Соотношение между этой единицей эргом и джоулем следующее:

$$1 \text{ эВ} = 1,601 \cdot 10^{-12} \text{ эрг},$$

$$1 \text{ эВ} = 1,601 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Явления, происходящие в атомах при испускании света и при ионизации, а также химические реакции сопровождаются изменениями энергии атомов или молекул на величину порядка одного электрон-вольта. Энергия ядерных превращений по порядку величины в миллион раз больше.

При описании ядерных явлений пользуются единицами килоэлектрон-вольт (кэВ) и мегаэлектрон-вольт (МэВ):

$$1 \text{ кэВ} = 10^3 \text{ эВ}, \quad 1 \text{ МэВ} = 10^6 \text{ эВ}.$$

В этих единицах энергия аннигиляционного γ -кванта равна $m_e c^2 = 510 \text{ кэВ} = 0,51 \text{ МэВ}$.

1.11. СВОЙСТВА РАДИОАКТИВНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Рассмотрим теперь особенности взаимодействия различных типов радиоактивного излучения с веществом, вытекающие из свойств излучения.

Альфа-излучение. Альфа-излучение — это поток α -частиц, т. е. ядер атомов гелия. Альфа-частицы вылетают из ядер радиоактивных элементов с большой кинетической энергией — несколько миллионов электрон-вольт, что соответствует значениям скорости 10^9 см/сек (напомним для сравнения, что скорость света в вакууме равна $3 \cdot 10^{10}$ см/сек). Движущиеся α -частицы можно отклонить сильными электрическим и магнитным полями. α -частицы способны проникать через тонкие слои вещества. Проходя через вещество, α -частицы претерпевают множество соударений с атомами. Часть соударений приводит к возбуждению атомов, т. е. к переводу электронов на орбиту с большим значением энергии. Возбужденные атомы спустя весьма короткое время возвращаются в нормальное состояние с испусканием света. Взаимодействие α -частиц с электронной оболочкой атомов может вызвать отрыв электронов от атомов, т. е. их ионизацию.

В результате этих процессов α -частица теряет свою энергию и замедляется. Хотя в каждом акте соударения α -частица расходует лишь небольшую долю своей начальной энергии, однако из-за чрезвычайно большого числа актов соударения на единице пути она быстро замедляется, пробегая до своей полной остановки сравнительно короткий путь. Длина пробега α -частицы в воздухе не превышает нескольких сантиметров. **Число ионов, создаваемых α -частицей на единице пути (т.н. плотность ионизации)** в воздухе, очень велико — несколько десятков тысяч на сантиметр.

Бета-излучение. Бета-излучение представляет поток электронов, движущиеся с весьма большой скоростью, приближающейся к скорости света.

При распаде ядер одного и того же изотопа испускаются β -частицы с разным значением энергии. **Наибольшее значение энергии β -частиц является величиной, характерной для данного изотопа. Оно называется верхней границей β -спектра.** Верхние границы β -спектра различных изотопов лежат в интервале от нескольких десятков кэВ до 15 МэВ. Для большинства β -активных изотопов верхняя граница β -спектра заключена между несколькими кэВ и 2 МэВ.

Движущиеся β -частицы отклоняются электрическим и магнитным полями в сторону, противоположную отклонению α -частиц. Проходя через вещество, β -частицы подобно α -частицам возбуждают и ионизируют атомы среды. Однако в силу большей скорости и меньшего заряда β -частицы претерпевают на единице пути меньше соударений, чем α -частицы. Поэтому длина пробега у β -частиц больше, а

вызванная ими плотность ионизации меньше, чем для α -частиц той же энергии. Длина пробега в воздухе для β -частиц средней энергии (порядка одного МэВ) составляет несколько метров. β -частицы, пролетая в электрическом поле ядер встречных атомов, заметно отклоняются в сторону от первоначального направления. Поэтому пучок β -лучей сильно рассеивается в веществе.

β^+ -частицы (позитроны), отличаясь от электронов знаком заряда, отклоняются электрическим и магнитным полями в ту же сторону, что и α -частицы. β^+ - и β^- -частицы тормозятся и рассеиваются в веществе одинаково.

γ -лучи. γ -излучение представляет собой жесткое электромагнитное излучение, распространяющееся со скоростью света. Фотоны γ -излучения не обладают зарядом и поэтому не отклоняются электрическим и магнитным полями. Энергия γ -фотонов имеет значения, достигающие нескольких МэВ.

γ -излучение взаимодействует с веществом значительно слабее, чем β -излучение, и проходит в воздухе пути в сотни метров, а в твердых телах—сантиметры или десятки сантиметров, в зависимости от их плотности и энергии γ -фотонов.

В отличие от α - и β -частиц γ -фотоны поглощаются в одном или нескольких актах взаимодействия с атомами вещества, вызывая при этом появление вторичных электронов. Вторичные электроны производят ионизацию атомов окружающей среды.

Кинетическая энергия α - и β -частиц и энергия γ -фотонов в конечном счете переходит в тепловую энергию. Это проявляется в повышении температуры среды, поглотившей излучение.

1.12. СХЕМЫ РАСПАДА НЕКОТОРЫХ РАДИОАКТИВНЫХ ЯДЕР.

Основной паспортной характеристикой любого радиоактивного изотопа является **схема распада**. Полная схема распада содержит информацию о заряде и массе исходного ядра и конечного продукта. На схеме обязательно указывается тип распада, энергия соответствующего перехода, период полураспада, вероятность данного перехода, если существует возможность двух или трех вариантов распада. Поскольку существует несколько сотен радиоактивных изотопов, то схемы распада сведены в большие специализированные справочники. На рис. 1.5. приведены несколько различных схем распада для знакомства с принципами построения и чтения таких схем.

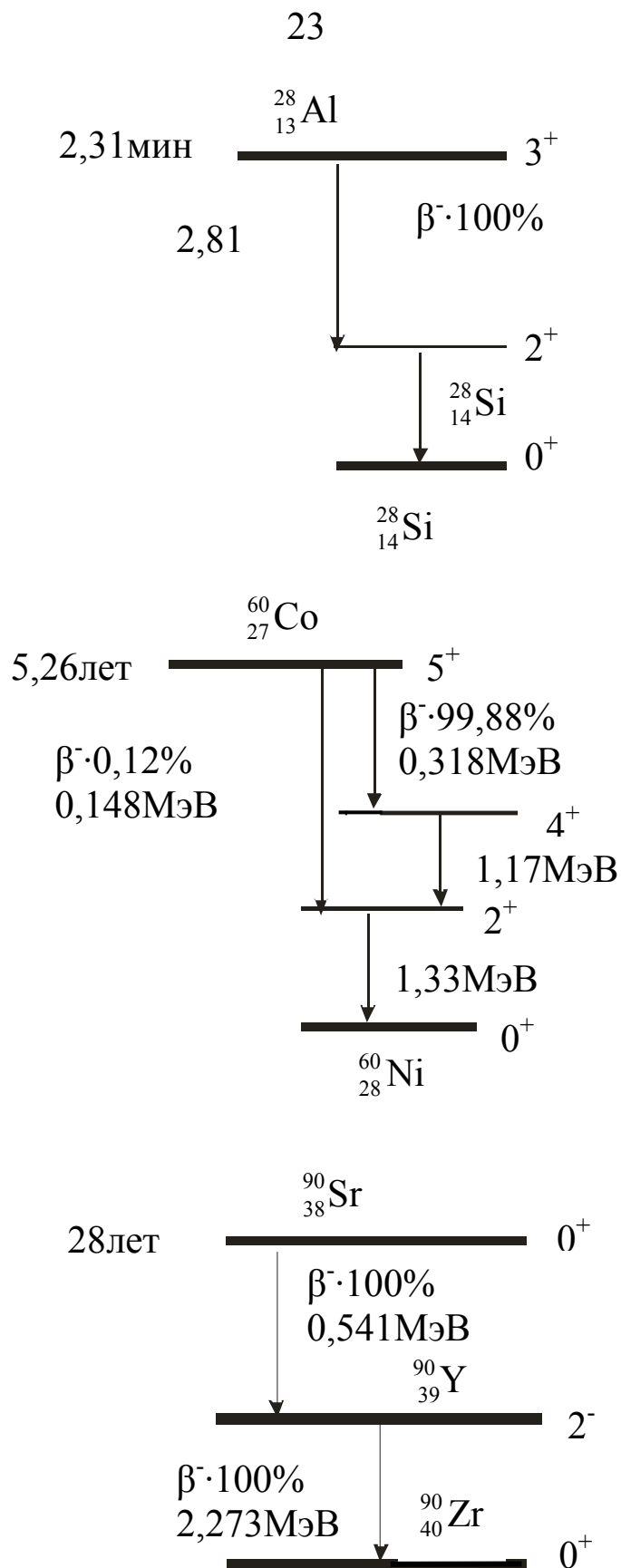


Рис. 1.5. Схемы распада некоторых радиоактивных ядер.

Принятые обозначения: β^+ - позитронный распад; β^- - электронный распад. Период полураспада обозначен цифрами слева. Справа показаны значения спина соответствующего уровня и четность волновой функции: положительная четность отмечена знаком „+”, отрицательная четность - знаком „-”. Энергия перехода показана в МэВ. В процентах показана интенсивность данного вида перехода.

1.13. ОСНОВЫ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ

Основными направлениями в использовании радиоактивных изотопов являются применения их в качестве источников излучения высокой энергии и в качестве индикаторов.

Первое направление охватывает дефектоскопию, измерение размеров, плотностей и концентраций, а также использование изменений, которые происходят в веществе под действием мощных потоков радиоактивного излучения.

Второе направление, несмотря на огромный круг охватываемых им конкретных применений, можно, по-видимому, свести к четырем типам задач.

В первом, наиболее часто встречающемся типе задач требуется узнать пространственное распределение в объекте введенного ранее вещества. Для этого в излучаемый объект (или систему объектов) вводят вещество с примесью радиоактивного индикатора. Спустя некоторое время измеряют активность различных участков объекта и таким путём узнают распределение в нем введенного вещества. К этому типу задач относится, например, исследование самодиффузии металлов, при котором на поверхность пробы наносят слой того же состава, какой имеет сама проба, но с добавкой радиоактивного изотопа. Через некоторое время измеряют активность слоев, расположенных на различных расстояниях от поверхности. По этим данным судят о скорости процесса самодиффузии.

Во втором типе задач требуется узнать, в каком количестве содержится в объекте тот или иной компонент.

С этой целью в излучаемый объект вводят вещество с физико-химическими свойствами, близкими к свойствам определяемого компонента. К вводимому веществу добавляют примесь изотопа, активность которого заранее измерена (часто необходимо знать также и количество вводимого вещества). После полного перемешивания введенного вещества с определяемым компонентом объекта производят

измерение удельной активности проб, отобранных от изучаемого компонента. Результаты измерения позволяют судить о начальном его количестве в объекте. Примером задач этого типа может служить химический анализ методом изотопного разбавления, применяемый для определения количества вещества, находящегося в растворе. Эти задачи решаются по следующей схеме. К раствору добавляют некоторое количество вещества того же химического состава, но содержащего радиоактивной изотоп известной активности. После того как произойдет полное перемешивание исследуемого и введенного веществ, производят их осаждение. По удельной активности осадка судят о количестве вещества, находившегося в растворе.

Задачи третьего типа состоят в определении промежутка времени между моментом введения того или иного вещества в некоторый участок объекта и моментом появления этого вещества в другом участке. Для решения подобных задач во вводимое вещество добавляют радиоактивный изотоп и регистрируют момент появления радиоактивных ядер в заданном месте объекта. Например, так определяют время, потребное для прохождения газов через доменную печь. К газу, вдуваемому через фурмы доменной печи, добавляют порцию радиоактивной газообразной примеси. Затем через равные промежутки времени берут пробы газа, выходящего из колошников, и измеряют их активность. Время прохождения газа через доменную печь равно интервалу времени, прошедшему между моментом введения радиоактивного вещества и моментом, когда взятая проба газа дает максимальную активность.

В задачах четвертого типа неизвестной величиной является время, прошедшее между двумя событиями. Решение задач этого типа основано на сравнении активности, бывшей у объекта некоторое время тому назад, с активностью, которую он имеет в данный момент. Зная закон распада или накопления радиоактивных ядер, можно таким способом измерять интервалы времени. Примером решения подобных задач может служить определение возраста геологических объектов органического происхождения по концентрации в них радиоактивного изотопа C^{14} . Этот изотоп, образующийся в воздухе под действием космических лучей, усваивается растениями наряду с обычным углеродом. После гибели растения этот процесс прекращается, и концентрация радиоактивного углерода в остатках растения начинает убывать вследствие распада. Поэтому по удельной активност

сти C^{14} в ископаемых объектах биологического происхождения можно судить об их возрасте.

Круг научных и технических задач, при решении которых оказывается целесообразным применять радиоактивные изотопы, очень широк. Во всех этих задачах используются специфические свойства радиоактивных изотопов: большая энергия α -, β - и γ -излучения, позволяющая регистрировать акты распада отдельных атомов и тем самым обнаруживать ничтожные количества радиоактивного вещества; независимость активности изотопа от условий, в которых находятся радиоактивные атомы (форма химического соединения, агрегатное состояние вещества, температура, наличие внешних электрических и магнитных полей и т. д.); тождественность химических свойств радиоактивных и стабильных изотопов одного и того же элемента; большая проникающая способность радиоактивного излучения; наличие разных типов излучения (α - и β -частицы, γ -фотоны), по-разному взаимодействующих с веществом. В некоторых областях практического применения радиоактивных изотопов используют какое-либо одно их свойство, в других областях — сочетание отдельных свойств.

Приведем несколько примеров.

а) Для изучения износа инструмента в его состав вводят радиоактивный изотоп. Измеряя активность стружки, уносящей продукты износа, можно установить скорость износа и влияние различных факторов. Ввиду того, что для измерения нужны ничтожно малые количества радиоактивного вещества, состав и технические свойства инструментов остаются при этом прежними.

Таким образом, целесообразность постановки подобных исследований основана главным образом на большой чувствительности обнаружения радиоактивных изотопов.

б) Изучается износ двух трущихся частей машины. Для решения задачи в материалы этих частей вводят два различных радиоактивных изотопа. Выбирают изотопы так, чтобы была обеспечена возможность раздельной регистрации в продуктах износа излучения одного и другого изотопов. Применяют, например, один β -активный, а второй γ -активный изотопы, или два β -активных изотопа с существенно различной верхней границей β -спектра.

В подобных исследованиях используется не только большая чувствительность метода, но и особенности регистрации различных

типов излучения или излучения одного типа, но с разной энергией частиц.

в) Изучаются в организме места скопления того или иного элемента, входящего в состав лекарственного препарата. Добавляя в препарат радиоактивный изотоп этого элемента, можно проследить за его перемещением в организме и получить сведения об органах, в которых он концентрируется. В подобных исследованиях основное значение имеет то обстоятельство, что радиоактивные и стабильные изотопы одного и того же элемента обладают общими химическими свойствами.

Кроме того, проникающая способность радиоактивного излучения позволяет в этих случаях определять извне местоположение источников излучения, находящихся во внутренних тканях живого организма.

г) Определяется уровень жидкости в непрозрачной трубе. Применяя поплавки, содержащий радиоактивный препарат, легко определить границу жидкости по положению источника излучения. В данном случае метод решения задачи основан на проникающей способности радиоактивного излучения, проходящего сквозь стенки трубы.

д) Зависимость степени ослабления пучка γ -фотонов от толщины экрана лежит в основе обширных областей технического применения радиоактивного излучения - так называемой γ -дефектоскопии, метода измерения толщин изделий и др.

е) Примером использования ионизирующего действия излучения служит метод лечения злокачественных опухолей. Метод основан на ионизации атомов и разложении молекул внутри клетки при облучении ее быстрыми заряженными частицами. Это приводит к гибели живых клеток. Повышенная чувствительность клетки, находящейся в состоянии роста и размножения, к воздействию излучения позволяет в ряде случаев без существенного ущерба для здоровых тканей полностью уничтожить или задержать развитие раковых опухолей.

Целесообразность использования радиоактивных изотопов в том или ином исследовании, а также план эксперимента и метод его осуществления определяются как характером поставленной задачи, так и физическими свойствами радиоактивных изотопов и их излучений. В равной мере должны быть приняты во внимание принципы действия и устройстве аппаратуры, применяемой для регистрации излучения.

1.14. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ, ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

Ионизирующее излучение - любое излучение, взаимодействие которого со средой приводит к образованию электрических зарядов разных знаков. Ультрафиолетовое излучение и видимый свет не относятся к ионизирующим излучениям.

В дальнейшем как сокращенная форма используется также термин **излучение**.

Гамма-излучение - электромагнитное (фотонное) излучение, испускаемое при ядерных превращениях или при аннигиляции частиц.

Характеристическое излучение - фотонное излучение с дискретным спектром, испускаемое при изменении энергетического состояния атома.

Тормозное излучение - фотонное излучение с непрерывным спектром, испускаемое при изменении кинетической энергии заряженных частиц. Тормозное излучение возникает в среде, окружающей источник β -излучения, в рентгеновских трубках, в ускорителях электронов и т. п.

Рентгеновское излучение - совокупность тормозного и характеристического излучений, диапазон энергии фотонов которых составляет 1 кэВ— 1 МэВ.

Корпускулярное излучение - ионизирующее излучение, состоящее из частиц с массой покоя, отличной от нуля (альфа- и бета-частиц, протонов, нейтронов и др.).

Флюенс Φ - число частиц (фотонов) dN , проникающих в сферу малого сечения dS , деленное на это сечение:

$$\Phi = dN/dS. \quad (1.17)$$

Плотность потока частиц (фотонов) φ - флюенс частиц $d\Phi$ за малый промежуток времени dt , деленный на этот промежуток:

$$\varphi = d\Phi/dt \quad (1.18)$$

Линейная передача энергии заряженных частиц в среде ЛПЭ (или L_{Δ}) - средняя энергия $d\bar{E}$ теряемая частицей в среде при соударениях с передачей энергии, меньшей Δ на малом отрезке пути dl , деленная на этот отрезок: $L_{\Delta} = (d\bar{E} / dl)_{\Delta}$

В качестве единицы измерения ЛПЭ используется килоэлектронвольт на микрометр воды, $1 \text{ кэВ/мкм} = 62,5 \text{ Дж/м}$.

Поглощенная доза D — средняя энергия $d\bar{E}$ переданная излучением веществу в некотором элементарном объеме, деленная на массу вещества dm в этом объеме:

$$D = d\bar{E} / dm \quad (1.19)$$

Единицей поглощенной дозы является джоуль на килограмм (Дж/кг).

Используется и сокращенный термин – **доза излучения.**

При расчете поглощенной дозы принимается следующий состав мягкой биологической ткани: 76,2% кислорода, 11,1% углерода, 10,1% водорода, 2,6% азота (по массе).

Рад – специальная единица поглощенной дозы; 1рад=100 эрг/г=1·10⁻²Дж/кг=0,01Гй. Производные единицы: микрорад (1мкрад=1·10⁻⁶рад); миллирад (1мрад=1·10⁻³рад); килорад (1крад=1·10³·рад); мегарад (1Мрад=1·10⁶рад).

Грей — новая единица поглощенной дозы в системе единиц СИ, Гй; **1 грей равен одному джоулю, поглощенному в килограмме вещества (Дж/кг): 1Гй=1Дж/кг=100рад.**

Мощность поглощенной дозы P – приращение поглощенной дозы dD за малый промежуток времени dt , деленное на этот промежуток:

$$P = dD/dt \quad (1.20)$$

Специальной единицей мощности поглощенной дозы является рад в секунду (рад/с).

Удельная поглощенная доза δ - поглощенная доза при флюенсе, равном 1 частица/см²;

$$\delta = D/\Phi \quad (1.21)$$

Экспозиционная доза X – полный заряд dQ ионов одного знака, возникающих в воздухе при полном торможении всех вторичных электронов, которые были образованы фотонами в малом объеме воздуха, деленный на массу воздуха dm в этом объеме:

$$X = dQ/dm \quad (1.22)$$

Единица экспозиционной дозы - кулон на килограмм, Кл/кг. Термин экспозиционная доза используется для фотонного излучения с энергией фотонов 1кэВ - 3МэВ. Мощность экспозиционной дозы определяется аналогично мощности поглощенной дозы.

Рентген — специальная единица экспозиционной дозы. Р; 1Р=0,285Кл/кг (точно). Производные единицы: микрорентген

(1мкР=10⁻⁶Р); миллирентген (1мР =10⁻³Р); килорентген(1кР=10³Р), мега-рентген (1МР=10⁶Р).

Эквивалентная доза H — величина, введенная для оценки радиационной опасности хронического облучения излучением произвольного состава и определяемая как произведение поглощенной дозы D на средний коэффициент качества излучения \bar{q} в данной точке ткани:

$$H = D\bar{q} = \sum_{i=1}^{\infty} D_i Q_i = D_1 Q_1 + D_2 Q_2 + \dots = \int_0^{\infty} D(L_{\infty}) Q(L_{\infty}) dL_{\infty} \quad (1.23)$$

где индексы 1, 2, 3... относятся к компонентам излучения с разным качеством излучения;

$$D = \sum_{i=1}^{\infty} D_i = D_1 + D_2 + D_3 + \dots; D(L_{\infty}) \text{ — распределение дозы по}$$

полной ЛПЭ (L_{∞}) ; $Q(L_{\infty})$ — регламентированная зависимость коэффициента качества от полной ЛПЭ.

Безразмерный коэффициент качества Q определяет зависимость неблагоприятных биологических последствий облучения человека в малых дозах от полной ЛПЭ излучения.

Регламентированная зависимость коэффициента качества q от полной ЛПЭ $Q(L_{\infty})$

L_{∞} , кэВ/мкм воды	≤ 3.5	7.0	23	53	≥ 175
$Q(L_{\infty})$	1	2	5	10	20

$$\bar{q} = \frac{D_1 Q_1 + D_2 Q_2 + \dots}{D} = \frac{1}{D} \int_0^{\infty} D(L_{\infty}) Q(L_{\infty}) dL_{\infty} \quad (1.24)$$

Эквивалентная доза и коэффициент качества должны использоваться только для целей радиационной безопасности при значении H не более 5ПДД.

Мощность эквивалентной дозы определяется аналогично мощности поглощенной дозы.

Бэр—специальная единица эквивалентной дозы;

$$1\text{бэр} = \frac{100\text{эрг/г}}{Q} = \frac{1 \cdot 10^{-2}\text{Дж/кг}}{Q} = \frac{0.01\text{Гй}}{Q} = 0.013\text{в}$$

Производные единицы: микробэр ($1\text{мкбэр}=1\cdot 10^{-6}\text{бэр}$); миллибэр ($1\text{мбэр}=1\cdot 10^{-3}\text{бэр}$).

Зиверт – новая единица эквивалентной дозы в системе единиц СИ, Зв; один Зиверт равен одному грею, деленному на коэффициент качества Q ;

$$1\text{Зв} = \frac{1\text{Гй}}{Q} = \frac{1\text{Дж/кг}}{Q} = \frac{100\text{рад}}{Q} = 100\text{бэр}$$

Удельная эквивалентная доза h - эквивалентная доза при флюенсе, равном 1 частица/см²; $h = H/\Phi$. Специальной единицей удельной эквивалентной дозы является бэр-см²/частица.

Максимальная эквивалентная доза H_M - наибольшее значение суммарной эквивалентной дозы от всех источников излучения в критическом органе (теле).

Коэффициент изотропности I определяется как отношение значения H_M при нормальном падении внешнего излучения на тело человека, к значению H_M при угловом распределении этого излучения в реальных условиях; используется при определении H_M по характеристикам поля излучения.

Активность A радиоактивного вещества — число спонтанных ядерных превращений dN в этом веществе за малый промежуток времени dt , деленное на этот промежуток:

$$A = dN/dt \quad (1.25)$$

Единицей измерения активности является одно ядерное превращение в секунду, которая в системе единиц СИ получила название беккерель, Бк.

Кюри — специальная единица активности, Ки. $1\text{Ки} = 3,700\cdot 10^{10}$ ядерных превращений в секунду. Производные единицы: милликюри ($1\text{мКи} = 1\cdot 10^{-3}\text{Ки}$); микрокюри ($1\text{мкКи} = 1\cdot 10^{-6}\text{Ки}$); нанокюри ($1\text{нКи} = 1\cdot 10^{-9}\text{Ки}$); пикокюри ($1\text{пКи} = 1\cdot 10^{-12}\text{Ки}$); килокюри ($1\text{кКи} = 1\cdot 10^3\text{Ки}$); мегакюри ($1\text{МКи} = 1\cdot 10^6\text{Ки}$).

Нуклид - вид атомов, характеризующийся массовым числом и атомным номером. Иногда нуклид определяется также энергетическим состоянием ядра. **Нуклиды с одинаковым атомным номером, но разным массовым числом называются изотопами.**

Источник излучения - вещество (или установка), испускающее или способное испускать ионизирующее излучение.

Закрытый источник - радиоактивный источник излучения, устройство которого исключает попадание радиоактивных веществ

в окружающую среду в условиях применения и износа, на которые он рассчитан.

Открытый источник - радиоактивный источник излучения, при использовании которого возможно попадание содержащихся в нем радиоактивных веществ в окружающую среду.

Гамма-эквивалент m_{Ra} источника - условная масса точечного источника ^{226}Ra , создающего на данном расстоянии такую же мощность экспозиционной дозы, как данный источник. Специальной единицей гамма-эквивалента является килограмм-эквивалент радия; 1кг-экв. радия на расстоянии 1см в воздухе от источника создает мощность экспозиционной дозы 2,33кР/с (точно), или $8,4 \cdot 10^6$ Р/ч, соответственно 1мг-экв. радия— $2,33 \cdot 10^{-3}$ Р/с, или 8,4Р/ч.

Внешнее облучение - воздействие на организм ионизирующих излучений от внешних по отношению к нему источников излучения.

Внутреннее облучение - воздействие на организм ионизирующих излучений радиоактивных веществ, находящихся внутри организма.

Естественный фон излучения - ионизирующее излучение, состоящее из космического излучения и излучения естественно распределенных природных радиоактивных веществ (на поверхности земли, в приземной атмосфере, в продуктах питания, в воде, в организме человека и др.).

Естественный фон внешнего излучения на территории Украины создает мощность экспозиционной дозы 4—20мкР/ч (40—200мР/год).

Критический орган - орган, ткань, часть тела или все тело, облучение которого в данных условиях причиняет наибольший ущерб здоровью данного лица или его потомства. Критические органы разделяют на группы, различающиеся по радиочувствительности.

Персонал (профессиональные работники, *категория А*) - лица, которые постоянно или временно работают непосредственно с источниками ионизирующих излучений.

Ограниченная часть населения (*категория Б*) - лица, которые не работают непосредственно с источниками излучения, но по условиям проживания или размещения рабочих мест могут подвергаться воздействию радиоактивных веществ и других источников

излучения, применяемых в учреждениях и (или) удаляемых во внешнюю среду с отходами.

Население (категория В) - население области, края, республики, страны.

Критическая группа - лица, которые по принадлежности к возрастной группе, по условиям жизни или другим факторам подвергаются наибольшему радиационному воздействию среди данного контингента людей.

Предельно допустимая доза ПДД - наибольшее значение индивидуальной эквивалентной дозы за год, которое при равномерном воздействии в течение 50 лет не вызовет в состоянии здоровья персонала (категории А) неблагоприятных изменений, обнаруживаемых современными методами; ПДД является основным дозовым пределом для лиц категории А.

Предел дозы ПД - предельная эквивалентная доза за год для ограниченной части населения (категории В); предел дозы устанавливается меньше ПДД для предотвращения необоснованного облучения этого контингента людей; предел дозы контролируется по усредненной для критической группы дозе внешнего излучения и уровню радиоактивных выбросов и радиоактивного загрязнения объектов внешней среды; ПД является основным дозовым пределом для лиц категории В.

Допустимые уровни - нормативные значения поступления радиоактивных веществ в организм, содержания радиоактивных веществ в организме их концентрации в воде и воздухе, мощности дозы, плотности потока и т. п., рассчитанные из значений основных дозовых пределов ПДД и ПД.

Предельно допустимое годовое поступление ПДП (для лиц категории А) - такое поступление радиоактивных веществ в организм в течение года, которое за 50 лет создает в критическом органе эквивалентную дозу, равную 1 ПДД. При ежегодном поступлении на уровне ПДП эквивалентная доза за любой год будет равна или меньше одной ПДД (в зависимости от времени достижения равновесного содержания радиоактивного вещества в организме).

Предел годового поступления ПГП (для лиц категории В) - такое поступление радиоактивных веществ в организм в течение года, которое за 70 лет создает в критическом органе эквивалентную дозу, равную 1 ПД.

Допустимое содержание ДС - такое среднегодовое содержание радиоактивных веществ в организме (критическом органе), при котором эквивалентная доза равна ПДД для *категории А* или ПД для *категории Б*.

Допустимая мощность дозы ДМД - отношение ПДД (или ПД) за год ко времени облучения T в течение года.

Для *категории А* время облучения T принимается равным $1700\text{ч}=1\cdot 10^5\text{мин}=6,1\cdot 10^6$ (в Украине для большей части персонала установлена 36-часовая рабочая неделя и 4-6-недельный отпуск).

Для *категорий В* время облучения $T=8800\text{ч}=5,3\cdot 10^5\text{мин}=3,2\cdot 10^7\text{с}$.

При установлении контрольных уровней могут использоваться и другие расчетные значения T в зависимости от условий облучения и фактической продолжительности облучения.

Допустимая плотность потока частиц (фотонов) ДПП - такая плотность потока, при которой создается допустимая мощность дозы ДМД.

Допустимая концентрация ДК - отношение ПДП (или ПГП) радиоактивного вещества к объему V воды или воздуха, с которыми оно поступает в организм человека в течение года.

Для *категории А* V воздуха принимается равным $2,5\cdot 10^6$ л/год. Для *категории Б* V воздуха - $7,3\cdot 10^6$ л/год, V воды — 800 л/год.

ДК радионуклидов благородных газов РБГ (аргона, криптона, ксенона) и короткоживущих радионуклидов углерода, азота и кислорода рассчитаны из значения ДМД их внешнего бета- и гамма-излучения.

Контрольные уровни - значения годового поступления радионуклида в организм, содержания радионуклида в организме, мощности дозы, плотности потока, концентрации радионуклида в воздухе (а для *категории Б* и в воде), загрязнения поверхности, устанавливаемые в целях ограничения облучения персонала и населения.

Контрольные уровни устанавливаются отдельно для *категории А* и *категории Б*.

Рабочее место - место (помещение) постоянного пребывания персонала для выполнения производственных функций в течение не менее 50% рабочего времени или двух часов непрерывно. Если при этом обслуживание процессов производства осуществляется в раз-

личных зонах помещения, то постоянным рабочим местом считается все помещение.

Минимально значимая активность - наибольшая активность открытого источника на рабочем месте, не требующая регистрации или получения разрешения органов Государственного санитарного надзора.

Радиационная опасность радионуклида - радиационно-гигиеническая характеристика радионуклида; все радионуклиды как потенциальный источник внутреннего облучения разделяются в порядке убывания радиационной опасности на пять групп с индексами А, Б, В, Г, Д.

Санитарно-защитная зона - территория вокруг учреждения или источника радиоактивных выбросов, на которой уровень облучения может превысить предел дозы ПД. В санитарно-защитной зоне устанавливается режим ограничений и проводится радиационный контроль.

Зона наблюдения - территория, где возможно влияние радиоактивных сбросов и выбросов учреждения и где облучение проживающего населения может достигать установленного предела дозы. На территории зоны наблюдения проводится радиационный контроль.